

Chapitre I :

Eléments constitutifs du sol

LES CONSTITUANTS SOLIDES DU SOL

Introduction

Le sol, objet d'étude de la **pédologie**, peut être défini comme étant la couche superficielle de l'écorce terrestre (couverture pédologique) qui possède des caractéristiques morphologiques et minéralogiques ainsi que des propriétés physico-chimiques distinctes de celles du matériau originel dont il dérive (un substrat géologique ou tout autre matériau apparenté), du fait de sa position à la surface de la lithosphère et de l'influence des facteurs du milieu qui y agissent. Selon le "Référentiel pédologique des principaux sols d'Europe", édité par l'INRA (Baize et Girard, 1992), il s'agit d'un objet naturel (c'est-à-dire dont l'existence initiale ne dépend pas de l'homme), continu et tridimensionnel.

L'étude des sols peut être abordée de diverses manières :

1. Une approche **agronomique** : le sol est envisagé comme le milieu naturel au sein duquel croissent les plantes cultivées. C'est donc la gestion correcte de ce "capital sol" qui intéressera l'agronome par l'amélioration de son niveau de fertilité ou par les mesures conservatoires qu'il peut lui apporter.

2. L'approche **écologique** vise plutôt à replacer le sol dans un contexte écosystémique. Le sol est situé à l'interface entre biosphère, lithosphère, atmosphère et hydrosphère, le sol a de multiples fonctions environnementales (filtre pour les eaux alimentant les nappes phréatiques, lieu de vie d'organismes) et joue un rôle économique essentiel, notamment dans l'alimentation des populations.

3. l'approche géologique définit le sol comme est la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants.

4. Enfin, dans une approche proprement **pédologique**, le sol sera envisagé comme la résultante de l'action des facteurs du milieu sur un matériau parent ou un substrat géologique déterminé. Dans ce cas, le sol constitue en lui-même un objet d'étude et on s'attachera donc à analyser et interpréter ses propriétés en relation avec les processus qui ont déterminés son développement, quel qu'en soit l'intérêt pratique.

Les constituants du sol

Le sol est constitué de trois fractions (tableaux.01 et 02)

Une **fraction solide** formée par des constituants minéraux (argile, sable, limon...) et des constituants organiques.

Une **fraction liquide** (appelée également **solution du sol**) formée d'eau dans laquelle sont dissoutes des substances solubles provenant à la fois de l'altération des roches, de la minéralisation de la matière organique et des apports extérieurs exemple : apports d'engrais solubles)

Une **fraction gazeuse**, ou l'**atmosphère du sol**, formée des mêmes gaz que l'air, avec en plus des gaz qui proviennent de la décomposition de la matière organique.

Tableau.01. la répartition des constituants du sol.

	% en volume
Constituants minéraux	45
Constituants organiques	5
Eau du sol	25
Air (atmosphère) du sol	25

L'origine des différents constituants est évidente : les constituants minéraux sont hérités du substrat géologique par désagrégation mécanique et/ou altération chimique plus ou moins prononcée. La matière organique est majoritairement d'origine végétale.

Les vides du sol occupés par de l'eau et de l'air constituent la **porosité du sol** : **porosité à l'eau** et **porosité à l'air**.

Tableau.02. les différents constituants du sol.

Constituants solides		Constituants liquides	Constituants gazeux
Constituants minéraux	Constituants organiques	= solution du sol	= air du sol
Terre fine du sol : Argiles, limons fins, limons grossiers, sables fins, sables grossiers.	Matière organique fraîche : ✓ Constituants des tissus végétales celluloses, hémicellulose, tanins... ✓ Déjections animales et animaux morts.	Eau du sol + éléments solubles dissous : ✓ Substances organiques (acides organiques, sucre...) ✓ Ions dans l'eau du sol : Ca^{2+} , K^+ , PO_4^{3-} , NO_3^- ...	✓ Constituants de l'air : O_2 , N_2 , CO_2 ✓ gaz issus de l'activité des animaux et de la décomposition de la matière organique : CO_2 , H_2 , CH_4 .
Eléments grossiers : Gravier, cailloux, pierres, blocs	Matière humique : Matière organique transformée		

Les constituants minéraux

On trouve dans les sols une variété assez grande de constituants minéraux; mais dès le départ, il est essentiel de faire une distinction fondamentale entre les minéraux dits **primaires**, ou **hérités** qui proviennent intacts ou, en tout cas, peu modifiés de la roche dont est issu le sol, et les minéraux **secondaires** formés dans le sol par transformation d'un minéral préexistant ou bien par synthèse après destruction complète des minéraux primaires.

Les minéraux primaires

Il s'agit essentiellement de **silicates** et d'**aluminosilicates**, principaux constituants de l'écorce terrestre puisqu'ils y représentent à eux seuls près de 99 % de sa masse et de son volume. Ce sont, en général, les plus résistants des minéraux des roches-mères, ceux qui subissent le minimum de modifications par dissolution, hydrolyse, oxydation ou réduction dans le sol.

Le plus important est le **quartz** (un minéral quasi omniprésent et le plus souvent largement majoritaire dans les sols). Il faut un temps très long pour le faire disparaître des sols à cause de sa grande résistance. Les **feldspaths** sont également répandus dans tous les sols, où leur abondance est fonction de la nature du matériau parent et de l'intensité de l'altération à laquelle il a été soumis. Il s'agit d'un groupe de minéraux important au point de vue pédologique car leur altération libère non seulement des éléments nutritifs essentiels pour les plantes (calcium, magnésium, potassium), mais aussi les constituants nécessaires à la néoformation de minéraux secondaires tels que les argiles (silicium et aluminium). Les **micas** constituent le troisième groupe par ordre d'importance, après les feldspaths et le quartz. Ils constituent dans les sols, avec les argiles qui leur sont apparentées (illites) et les feldspaths K, la principale source de potassium. Les **amphiboles et les pyroxènes** sont peu abondants dans les sols, cela est expliqué par leur forte altérabilité, la plupart des pyroxènes et des amphiboles. Ils constituent néanmoins une source potentielle très importante en calcium, magnésium et oligoéléments, d'où la fertilité généralement élevée des sols formés sur les roches riches en ces minéraux. On peut également trouver des minéraux altérables comme les **péridots (olivines)**, ces derniers indiquent alors que l'on a affaire à un sol peu évolué, ou bien que l'on est près de la zone de départ.

Les sols peuvent également contenir deux autres minéraux primaires accessoires comme l'**apatite**, le **zircon**, la **tourmaline**, etc., ces minéraux sont très résistants à l'altération et se retrouvent dans la fraction sableuse des sols évolués.

Les minéraux secondaires

Les minéraux secondaires du sol sont essentiellement représentés par les **minéraux argileux** (argiles minéralogiques) et les formes cristallines des **oxyhydroxydes** de fer, d'aluminium et, dans une moindre mesure, de manganèse.

Dans certains sols, une partie ou l'intégralité des **carbonates** (en majorité des carbonates de calcium) peuvent également être considérés comme des minéraux secondaires lorsqu'ils sont formés par recristallisation à l'issue d'une phase préalable de dissolution de carbonates primaires.

Minéraux argileux

Le terme "minéraux argileux" recouvre des **phyllosilicates** de petite taille (microcristaux phylliteux de diamètre < 2 µm) et généralement bien cristallisés. Il s'agit de constituants typiques du complexe d'altération des sols. Le comportement physique et les principales propriétés physico-chimiques des sols sont dans une large mesure dominés par les

minéraux argileux. Ce sont notamment leurs propriétés de surface qui jouent un rôle majeur au niveau des phénomènes de structuration des sols et des phénomènes d'adsorption ou de fixation des cations.

Caractéristiques générales des minéraux argileux

Les argiles minéralogiques sont des édifices minéraux microcristallins qui présentent trois caractéristiques essentielles :

1. Une structure **phylliteuse**, c'est-à-dire un réseau cristallin discontinu présentant des espaces interfoliaires actifs vis-à-vis de l'eau ambiante et des ions qui y sont dissous. Cette structure lamellaire et le pouvoir d'hydratation plus ou moins important qui en résulte, expliquent notamment les propriétés de plasticité qui sont très développées chez bon nombre de minéraux argileux.

2. Une taille généralement inférieure à 2 μm et même souvent à 0,2 μm (microcristaux). Les argiles minéralogiques ne sont pas strictement limitées à la fraction granulométrique < 2 μm , mais lorsque leur taille est plus petite que ce diamètre, leur influence sur les propriétés du sol est généralement accentuée.

3. Une surface chargée électriquement. Elle a pour conséquence de créer des forces ioniques interparticulaires et donc un comportement colloïdal des minéraux argileux : ils sont susceptibles d'être dispersés en milieu aqueux pour former des suspensions colloïdales. Leur charge électrique justifie aussi leurs propriétés d'échange (adsorption – désorption) vis-à-vis des cations contenus dans la solution du sol.

La classification des minéraux argileux seront surtout abordées au fiche TD n°02.

Oxyhydroxydes

Avec les minéraux argileux, les **oxyhydroxydes** composent l'essentiel du complexe d'altération des sols. Ce sont des constituants omniprésents dans les fractions fines du sol et notamment la fraction argileuse ; ils peuvent également être présents dans des fractions granulométriques plus grossières : limons et sables.

A l'origine, les oxyhydroxydes des sols proviennent en majorité de l'altération de minéraux primaires, essentiellement des minéraux ferromagnésiens. En principe ce sont donc des minéraux de **néoformation**. Cependant, dans le cas de sols formés sur des matériaux d'origine sédimentaire, une part importante – sinon majoritaire – des oxyhydroxydes sont en fait des minéraux d'héritage puisqu'ils préexistent dans le matériau parental. Les oxyhydroxydes les plus abondants dans les sols sont à base de **fer** et d'**aluminium** exemple : goethite (oxyhydroxyde de fer), gibbsite (oxyhydroxyde d'aluminium).

Carbonates

Avec les chlorures et les sulfates, les carbonates sont caractérisés par leur solubilité relativement forte comparée à celle des silicates.

Le carbonate le plus abondant est la calcite (CaCO_3). Les autres minéraux carbonatés que l'on peut rencontrer dans les sols sont la dolomite [$\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$], la sidérite (FeCO_3) et le carbonate de sodium (Na_2CO_3), ce dernier n'étant présent que dans les sols halomorphes alcalins, à pH supérieur ou égal à 8,5.

L'**analyse granulométrique** du sol consiste à classer les constituants minéraux du sol d'après leur grosseur. L'ensemble formé par les argiles, les limons et les sables constitue la terre fine du sol, tandis que, les graviers, les cailloux, les pierres et les blocs forment les éléments grossiers (tableau.03). La classification granulométrique sert à déterminer la **texture**.

Tableau.03. les constituants minéraux.

TERRE FINE	Argile	Particule de moins de $2\mu\text{m}$
	Limon fin	$2\mu\text{m}$ à $20\mu\text{m}$
	Limon grossier	$20\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$
	Sable fin	$50\mu\text{m}$ à $200\mu\text{m}$
	Sable grossier	$200\mu\text{m}$ à 2mm
ELEMENTS GROSSIERS	Graviers	2 à 20mm
	Cailloux	2 à 7.5 cm
	pierres	7.5 à 20cm
	Blocs	Plus de 20cm

Les éléments grossiers

Les éléments grossiers forment le squelette du sol. Leurs rôles peuvent être résumés de la façon suivante :

- ✓ Ils constituent la réserve minérale du sol, leur altération libère des éléments minéraux qui contribuent à l'alimentation des plantes ;
- ✓ Ils augmentent la perméabilité du sol à l'eau et l'air ;
- ✓ Ils peuvent avoir une action sur la chaleur du sol, en tant que réservoir de chaleur
exemple : les terrains calcaires ;
- ✓ Ils peuvent participer à constituer une réserve d'eau, le cas des roches poreuses.

Les sables grossiers et fins

Ces derniers :

- ✓ Favorisent la pénétration de l'eau et de l'air : ils rendent le sol perméable ;
- ✓ Ils retiennent peu d'eau, le sol est filtrant ;
- ✓ Ils facilitent les échanges de température, le sol se réchauffe vite au printemps ;
- ✓ Ils ne peuvent pas s'agglomérer en grumeaux, le sol est léger et la pénétration des racines est facile.

Les limons grossiers et fins

- ✓ Ils rendent le sol battant (le sol a une tendance à se tasser sous l'effet des fortes pluies et à former des croustes)

- ✓ Ils sont imperméable en surface et asphyxiant pour les racines en profondeur.

Les argiles

Les argiles possèdent sur leur surface des charges négatives : ce sont des **colloïdes négatifs**. La présence des acides, libérant les ions H^+ , provoque la **floculation** des argiles, au contraire, les bases libèrent les ions OH^- et provoquent la **dispersion** des argiles.

La nature des ions (cations) influence sur la floculation des argiles : K^+ , H^+ , Na^+ n'ont qu'un faible pouvoir floculant, tandis que Ca^{2+} , Mg^{2+} et Al^{3+} flocculent bien les argiles.

L'argile est **hydrophile**, c'est-à-dire l'aptitude de fixer l'eau. Cette aptitude entraîne trois propriétés d'argile :

- ✓ La **plasticité** (aptitude à être modelé) ;
- ✓ L'**adhésivité** (faculté de coller) ;
- ✓ Le **gonflement** et **retrait** (l'argile change de volume selon l'état d'humidité).

L'argile en tant que colloïde négatif, intervient dans la **fertilité chimique** du sol en fixant des cations tels que K, Mg, Ca.... on note aussi que l'argile peut également fixer des ions négatifs par l'intermédiaire des charges positives qu'elle porte (voir le complexe argilo-humique).

Les constituants organiques

La fraction organique du sol, bien que ne représentant que quelques % de la masse totale du sol, joue un rôle physico-chimique capital et est souvent déterminante au point de vue de sa fertilité. Elle est toutefois constituée d'un ensemble de substances de natures et de propriétés très variées.

Le terme **matière organique** du sol regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Le contenu en matière organique des sols est influencé globalement par :

- les facteurs climatiques,
- la végétation,
- la texture du sol,
- les conditions topographiques, influençant le microclimat et le drainage,
- les pratiques culturales.

Quant à l'évolution des matières organiques dans le sol, elle se caractérise par un grand nombre de mécanismes et de voies de transformation qui interviennent simultanément.

Composition de la fraction organique du sol

La fraction organique du sol est excessivement complexe et il faut être conscient que certaines subdivisions sont parfois arbitraires. On distingue habituellement au sein de la matière organique du sol les catégories suivantes :

1. Débris d'origine végétale, animale et microbienne peu transformés, à structure encore organisée ; l'appellation "**matière organique fraîche**" est consacrée à cette fraction qui facilement décomposable et qui peut comprendre des feuilles, des tiges, des racines mortes, des résidus de récolte, des exsudats foliaires et racinaires, des cellules microbiennes mortes, des cadavres d'animaux mais aussi des déjections.

2. **Matière organique fortement transformée**, d'origine végétale, animale ou microbienne ; il s'agit de substances humifiées regroupées fréquemment sous le terme "**humus**" (au sens strict) ou matière organique humifiée. C'est la composante principale du carbone du sol (60 à 70 % du C total du sol, sauf dans certains horizons holorganiques).

3. Produits de composition intermédiaire entre 1 et 2, c'est-à-dire encore plus ou moins proches de la matière organique peu transformée.

4. **Biomasse du sol** (matière organique vivante): pédofaune et microflore (à l'exclusion de la macrofaune), mais surtout microorganismes (bactéries, champignons, actinomycètes). Dans les terres arables, la biomasse microbienne peut représenter de 1 à 3 % du carbone total du sol.

Parmi toutes ces composantes de la fraction organique du sol, les substances humiques sont sans conteste les plus importantes et ce pour deux raisons majeures :

1) les composés humiques présentent une forte réactivité vis-à-vis des minéraux argileux, des oxyhydroxydes et des cations.

2) leur structure biochimique, très complexe, leur assure généralement une stabilité plus grande que les composés carbonés originels dont ils dérivent ; leur vitesse de décomposition (= de minéralisation) est donc souvent beaucoup plus faible que celle des substances carbonées non humifiées. En d'autres termes, les substances humiques ont une "durée de vie" (ou "temps de résidence") beaucoup plus longue dans le milieu édaphique que les composés carbonés dont ils sont issus.

En outre, les composés humiques sont des substances hydrophiles et présentent de ce fait une importante capacité de rétention pour l'eau, particulièrement appréciable en sol sableux.

On distingue, trois grandes catégories de produits humifiés :

- 1) Une fraction non extractible par les réactifs alcalins = **Humine**.
- 2) Une fraction extractible en milieu alcalin mais insoluble dans les acides = **Acides humiques**.
- 3) Une fraction extractible en milieu alcalin et soluble dans les acides = **Acides fulviques**.

Le processus de minéralisation

Il est capital au point de vue du recyclage des éléments contenus majoritairement dans la fraction organique : azote (formes minérales : $N.NO_3$ et $N.NH_4$) et éléments associés (phosphore, soufre, oligoéléments), les rendant disponibles pour la végétation.

Ce processus de minéralisation affecte aussi bien les composés organiques peu transformés que la fraction humifiée du sol. Mais si la matière organique "fraîche" est rapidement dégradée sous l'action des organismes du sol, les composés humiques sont quant à eux minéralisés plus lentement, la composition cette fraction est plus résistante à la biodégradation.

La minéralisation aboutit à la libération de composés minéraux simples et solubles (NO_3^- , NO_2^{2-} , NH_4^+ , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} ,...) ou libérés à l'état gazeux (NH_3 , CO_2). La libération de CO_2 correspond à ce que l'on appelle la "respiration du sol" ; elle est le reflet de son activité biologique et microbiologique.

Le processus de l'humification

L'humification est le terme servant à désigner la transformation de la matière organique fraîche en matière humique dans les conditions écologiques normales, c'est à dire d'aération et richesse chimique suffisante. En conditions anaérobies, il y a putréfaction ou tourbification.

La microflore du sol et la pédofaune fragmentent et transforment les résidus végétaux et animaux, la biochimie des processus de transformation de ces résidus reste l'un des domaines de la chimie des humus les moins bien connu.

Complexes colloïdaux

Dans l'écosystème, le sol est le siège privilégié de la rencontre entre les mondes minéral et organiques. Cette rencontre donne naissance au complexe argilo-humique : c'est «l'ensemble des substances du sol constituées par l'association des molécules organiques humifiées et des argiles» (Jabiol et al. dans Gobat et al., 1998). Cette association est rendue possible par l'intermédiaire des ions Ca^{2+} , Fe^{3+}

Fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

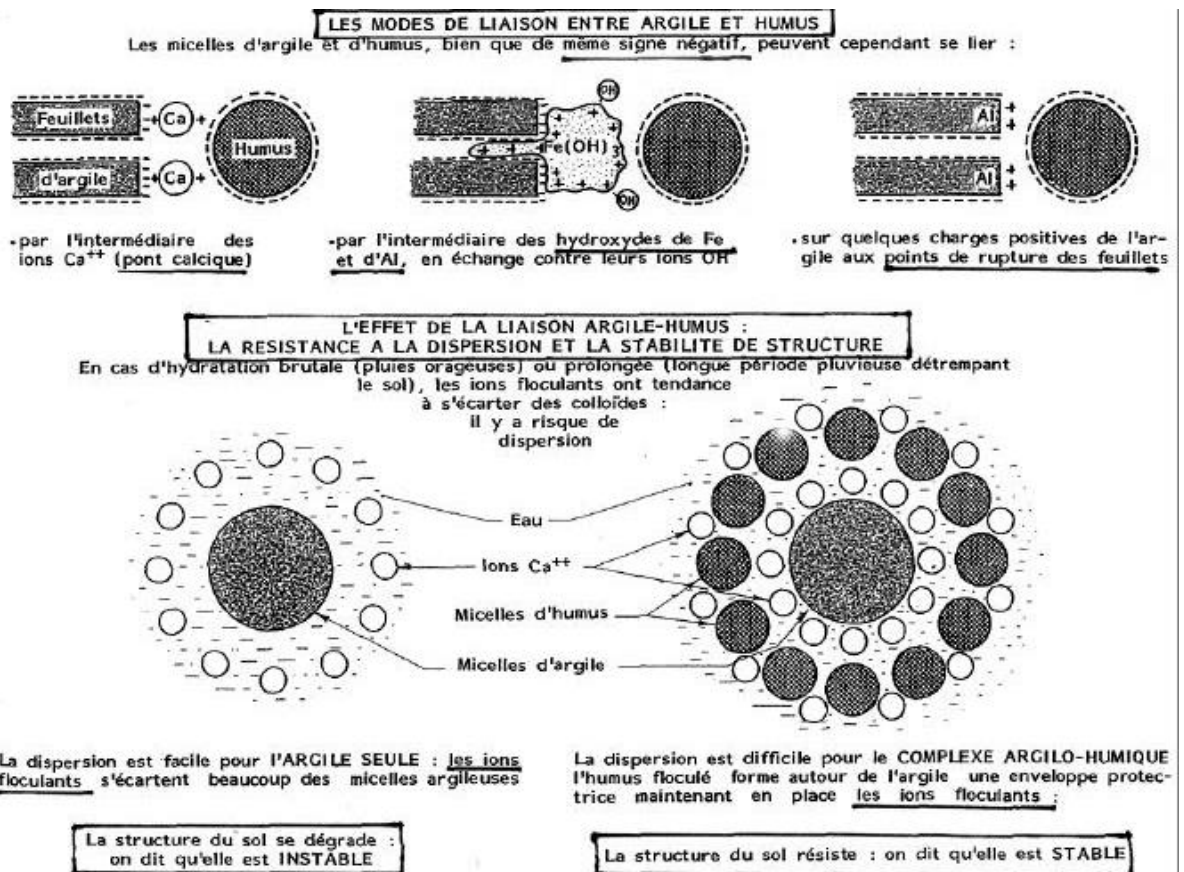
Dans les sols de culture, le complexe argilo-humique, chargé négativement, adsorbe les cations dans l'ordre d'affinité décroissante : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Na^+ .
L'adsorption* des ions H^+ varie suivant l'acidité du milieu (fig. 7).

Précision de principe établie par J. Lavollay en 1943

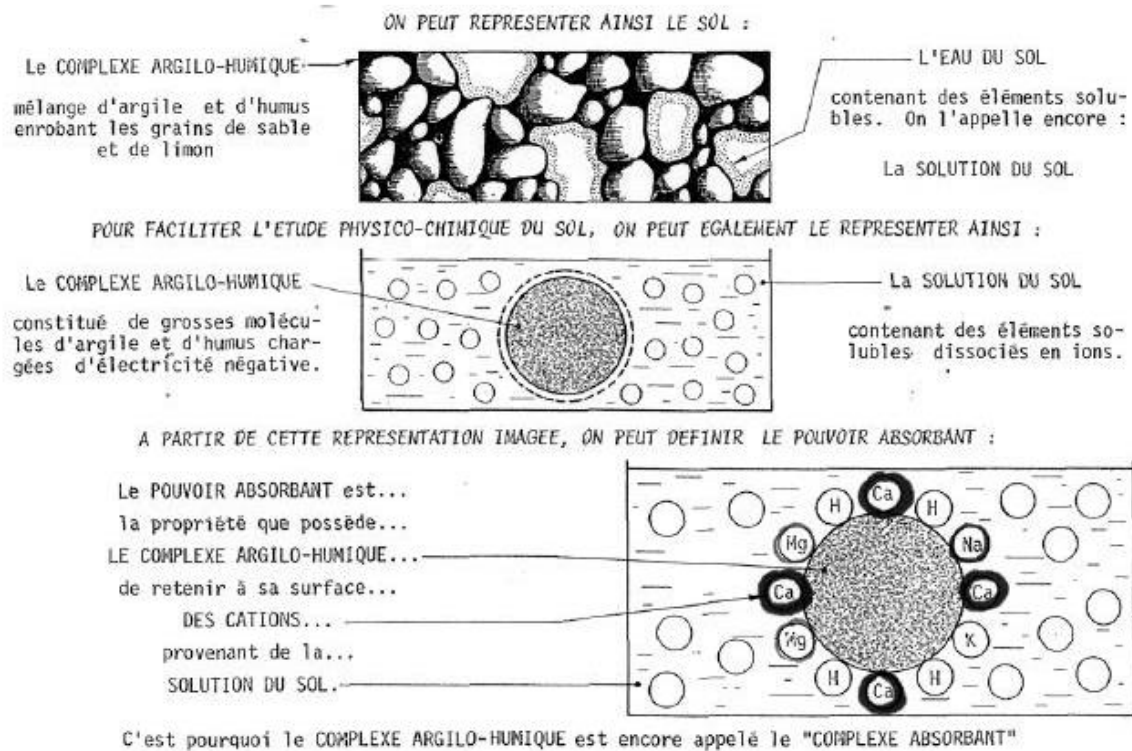
— Fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

Mais comment deux structures chargées négativement, alors qu'elles devraient se repousser, peuvent-elle être si étroitement liées ? Par l'intermédiaire de ponts cationiques chargés positivement et de « colles biologiques » :

- Le calcium a une action stabilisatrice. Il s'intercale entre l'humus et les feuillets des argiles, formant des ponts calciques très résistants et aérant la structure du sol.
- Le magnésium forme lui aussi des ponts cationiques mais avec une action de resserrement de la structure.
- Des ponts constitués d'hydroxydes de fer peuvent également se mettre en place, mais ils sont moins solides que les ponts calciques.
- Enfin, l'activité biologique a un rôle fondamental. La présence de molécules organiques permet d'enrober les complexes, ce qui les stabilise en présence d'eau.



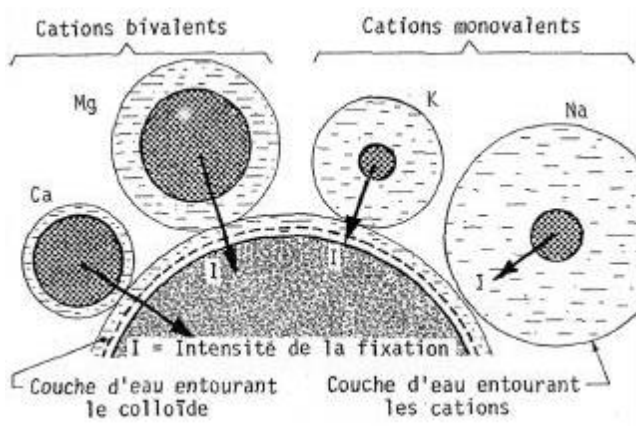
Les charges négatives de ce colloïde lui permettent de fixer les cations de la solution du sol : il a un **pouvoir absorbant**



D'après Soltner, 2000

La fixation des ions sur les colloïdes du sol

Le complexe argilo-humique échange constamment des ions avec la solution du sol, l'intensité de fixation des cations dépend de leur valence et de leur hydratation



Les ions bivalents Ca et Mg, sont plus énergiquement fixés que les monovalents. Plus les cations sont entourés d'une couche d'eau importante, moins ils peuvent s'approcher des colloïdes. Pour cette raison, le sodium, bien qu'étant un ion floculant, assure la floculation la moins stable.

D'après Soltner, 2000

