



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR- DJELFA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET VÉTÉRINAIRES

COURS

Hydrogéochimie de la solution du sol

DESTINÉ AUX ÉTUDIANTS DE :

1^{ÈRE} ANNÉE MASTER, EAU ET ENVIRONNEMENT

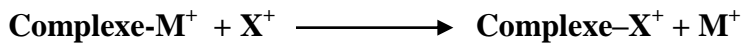
Présenté par : Dr. BOUTELDJAOUI Fatah, MCB, Université Ziane Achour- Djelfa

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

I.1. Généralités sur la chimie du sol

Le **sol** possède la propriété de retenir diverses **substances**. En effet, les **cations** et les **anions** peuvent être retenus par le **complexe absorbant** du **sol**, c'est à dire l'ensemble des colloïdes (**substances humiques, argile, sesquioxydes,**) dotés de **charges négatives** ou **positives**. Les ions y seront retenus sous forme **échangeable**. En d' autres termes, si on traite un sol par une solution contenant des **ions** différents de ceux retenus par le sol, il y aura **échange** entre les ions du complexe absorbant et ceux de la solution:



L'absorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible :

Les **ions échangeable** du **complexe absorbant** sont en équilibre avec la solution du sol provoque un changement de cet équilibre par échange : certains ions du complexe passent en solution (**désorption**) et sont remplacés par d'autres ions, qui était auparavant en solution (**adsorption**).

Le **pouvoir adsorbant** est la propriété que possède le complexe adsorbant du sol, de retenir a sa surface des ions provenant de la solution. Cette définition est illustre dans ce schéma si dessous (**figure 1**).

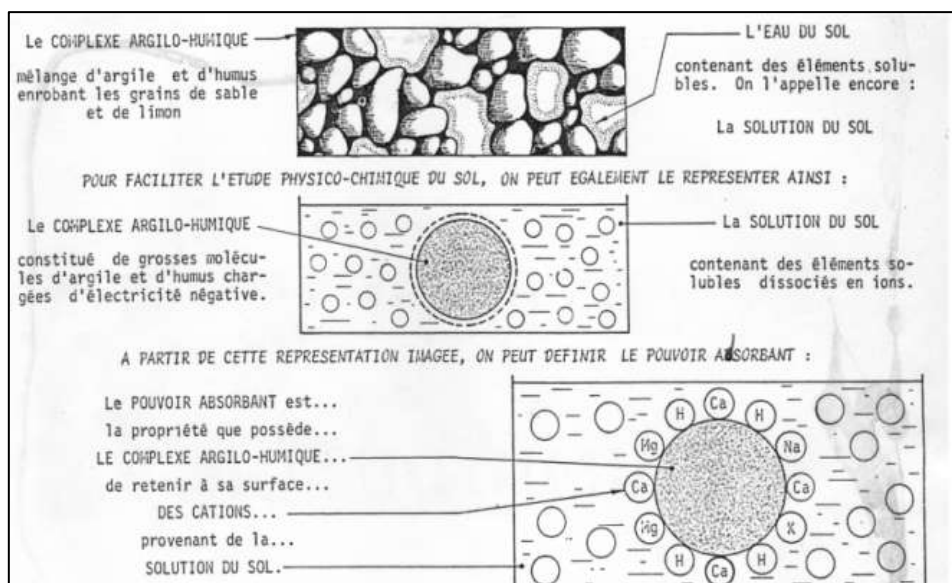


Figure 1 : Le complexe absorbant du sol

I.2. L'acidité et le pH des sols

L'**acidité du sol** est définie par la **concentration en ions H⁺** : on oppose l'**acidité effective**, qui correspond à la concentration en ions **H⁺ libre**, existant dans la **solution du sol**, a l'**acidité titrable** qui est représentée par les **ions échangeables** (beaucoup plus abondants) **fixés par les colloïdes** (**Figure 2 et 3**). Les **sols** ont une réaction **neutre, acide** ou **basique**. Leur degré d'acidité ou de

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

basicité (**alcalinité**) est exprimé par le **pH**. Le **pH** du sol dépend également du **complexe argilo-humique**. Des ions **H⁺ fixés** sont en équilibre avec les ions **H⁺ libres** de la solution du sol.

L'**acidité effective** est mesurée avec le **pH** mètres après le contact **sol/ eau** déterminé. C'est le **pH eau**.

L'**acidité titrable** est mesurée soit par **titration**, soit par échange avec une solution saline, par exemple avec une solution de **KCl**. On échange ainsi une partie des ions **H⁺** adsorbés par du potassium. C'est le **pH-KCl**.

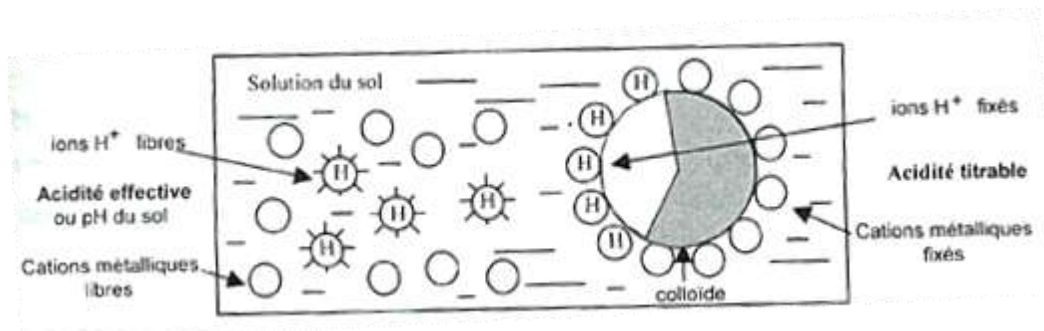


Figure 2. L'acidité effective et l'acidité titrable

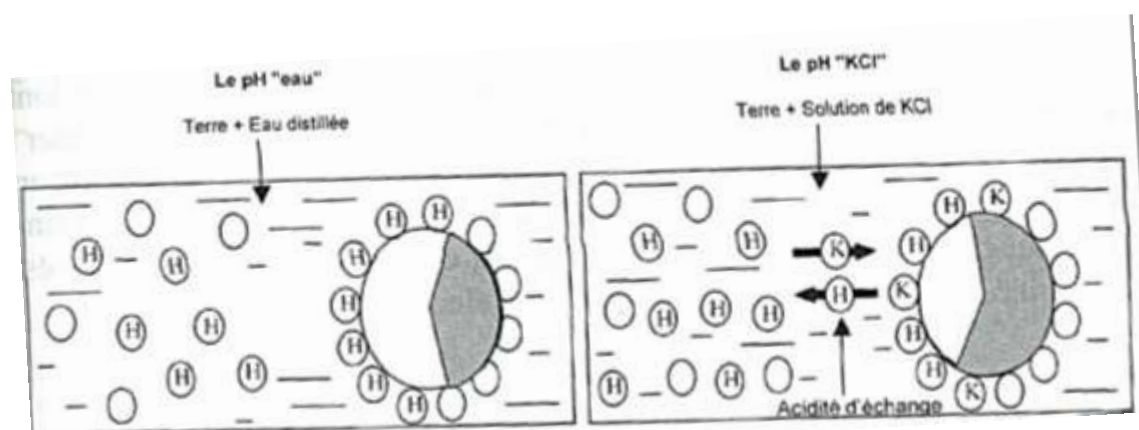


Figure 3. Les deux mesures du pH

Tableaux 1. Le pH des sols

Valeur du pH	Statut acido-basique
$\text{pH} \leq 5,5$	Sol très acide
$5,5 < \text{pH} \leq 6$	Sol acide
$6 < \text{pH} \leq 6,5$	Sol peu acide
$6,5 < \text{pH} \leq 7$	Sol neutre
$7 < \text{pH} \leq 7,5$	Sol peu alcalin (peu basique)
$\text{pH} > 7,5$	Sol alcalin (basique)

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

I.3. La capacité d'échange de cations (CEC) (Figure. 4)

La capacité d'échange Cationique (CEC) d'un sol est la **quantité totale de cations (ions $^+$) (pour 100 g de matière sèche)** que ce sol peut **adsorber** sur **complexe** et **échanger** avec la solution **environnante** dans des conditions de **pH bien définies**. Pour un sol, la capacité d'échange cationique est due aux **substances colloïdales** (au sens large du terme) portant des charges **négatives** tels que les **minéraux argileux**, la **matière organique** et la **silice colloïdale**.

Le total des charges négatives du sol disponibles (essentiellement dues au **complexe argilo-humique**) est également appelé le **complexe adsorbant**.

Autrement dit, cette mesure représente le total des **charges négatives** du **sol** disponible pour la fixation :

- Des ions **H⁺** et **Al³⁺**
- Des cations appelés **bases échangeables** : **Ca²⁺**, **Na⁺**, **K⁺**, **Mg²⁺**

On peut exprimer la CEC en milliéquivalents (**désignes par méq**) pour **100 g** de matière sèche. Les valeurs sont alors données en charges électriques unitaires.

Un (1) milliéquivalents = (Poids atomique / Valence)

-Si par exemple la CEC d'un sol est de **20 méq / 100 g** et que le sol est saturée par le calcium, cela veut dire que l'échantillon retient : **(40/2)×20= 400 mg de calcium par 100 mg**.

-Si C' est le potassium qui sature l'échantillon, celui-ci retient **(39/1) ×20= 780 mg de potassium par 100 g**.

Exemple : Un sol qui a une CEC de **20 milliéquivalents (meq)** pourrait retenir :

En Ca²⁺ : **20 meq × 40/2 = 400 mg de Ca²⁺/100 g de sol**

En Na⁺ : **20 meq × 23/1 = 460 mg de Na⁺ /100 g de sol**

En K⁺ : **20 meq × 39/1 = 780 mg de K⁺ par 100 g**.

Tableaux 2. Capacité d'échange cationique des principaux échangeurs d'ions

Composants du complexe	CEC (méq/100 g)
Composés humiques	100 à 500
Argiles Kaolinite	5 à 10
Montmorillonites	80 à 150
Vermiculites	100 à 150
Illites	20 à 50

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

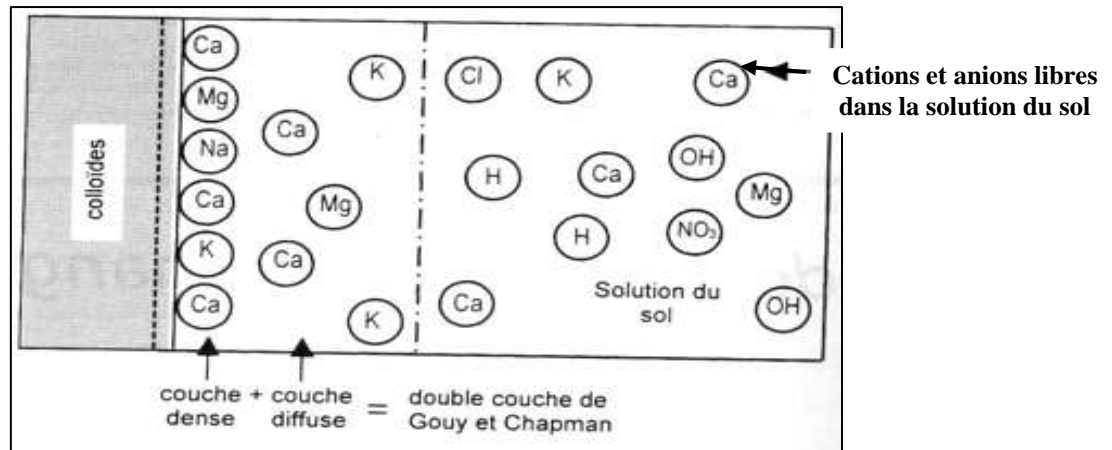


Figure 4. Représentation imagée du pouvoir adsorbant de la solution du sol

I.4. Les processus physico chimiques dans la solution du sol :

L'adsorption de molécules de soluté à la surface du solide provoque leur immobilisation. Ce phénomène résulte des forces d'attraction ou de répulsion existant entre les ions ou les molécules des différentes phases.

L'adsorption physique qui est le résultat de réactions impliquant de liaisons physico-chimiques de faible énergie (échange d'ions et forces de Van der Waals),

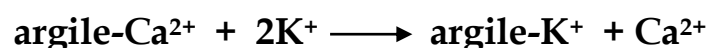
L'adsorption chimique qui concerne les liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes).

- Les ions bivalents Ca^{2+} et Mg^{2+} sont plus énergiquement retenus que les ions monovalents K^+ , Na^+ ,....

- Les ions faiblement hydratés (Mg^{2+} et surtout Ca^{2+}), c'est à dire entourés d'une faible couche d'eau (voir Figure 5 ci-dessous) sont mieux fixés que les ions fortement hydratés (K^+ et Na^+).

I.3.1. Les réactions d'échange ionique

Ce processus s'ajoute à l'adsorption. L'existence de charges électriques non neutralisées à la surface et / ou à l'intérieur des minéraux en est à l'origine. Des ions de charges opposées viennent se fixer sur ces charges non neutralisées et créent ainsi une double couche électrique. On distingue les échanges de cations et les échanges d'anions suivant la charge électrique des éléments en présence.

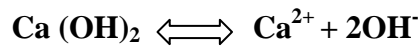


Exemples d'échange de cations :

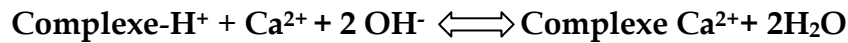
Exemple1 : Le remplacement des ions H^+ par des cations Ca^{2+} (Figure 6)

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

Lorsque l'on introduit de la **chaux** dans un **sol**, ses molécules se dissocient :



La concentration d'ions Ca^{2+} augment dans la solution du *sol* et cette concentration se communique au complexe, par exemple un complexe **argilo-humique** abondamment garni d'ions H^+ : un cation Ca^{2+} prend la place de **deux** ions H^+ , qui se combinent aux anions OH^- apportés par la chaux pour former de l'eau :



Exemple 2 : L'échange de cations Ca^{2+} contre des cations K^+

Si dans un **sol enrichi en calcium** par **chaulage**, on introduit du **chlorure de potassium (KCl, engrais potassique)** ce sel se **dissout**, puis se dissocie en anions Cl^- et cations K^+ . Ces derniers augmentant la **concentration** en ion K^+ de la **solution**, provoquent un **échange** avec le **complexe** : ils prennent sur celui-ci la place d'ions Ca^{2+} remis en solution forment, avec les anions Cl^- du CaCl_2 , **sel soluble** qui peut être **lessivé** : cet apport d'**engrais potassique** a provoqué une **décalcification** du sol :

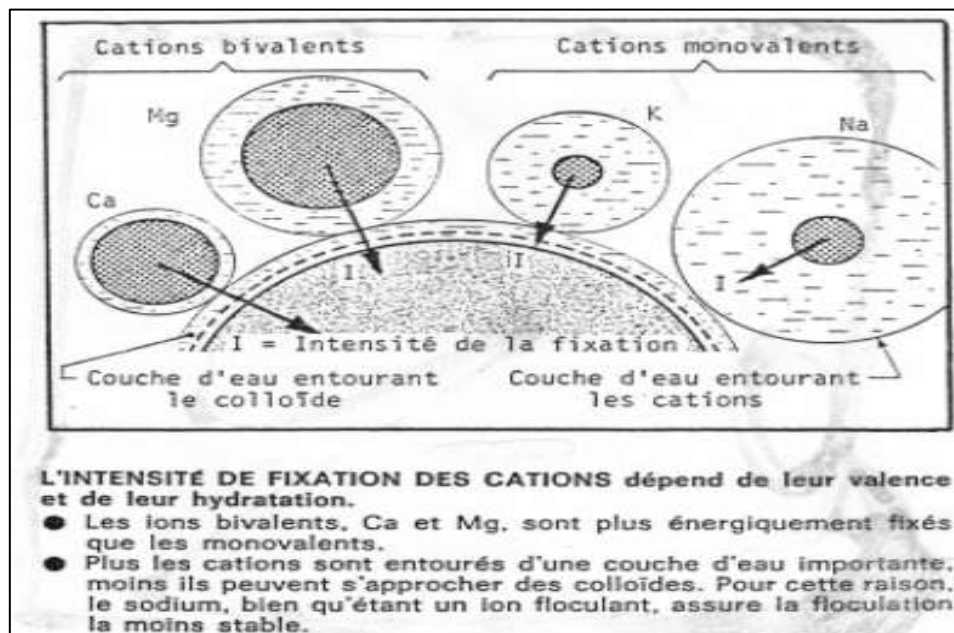


Figure 5. La fixation des cations : valence et degré d'hydratation

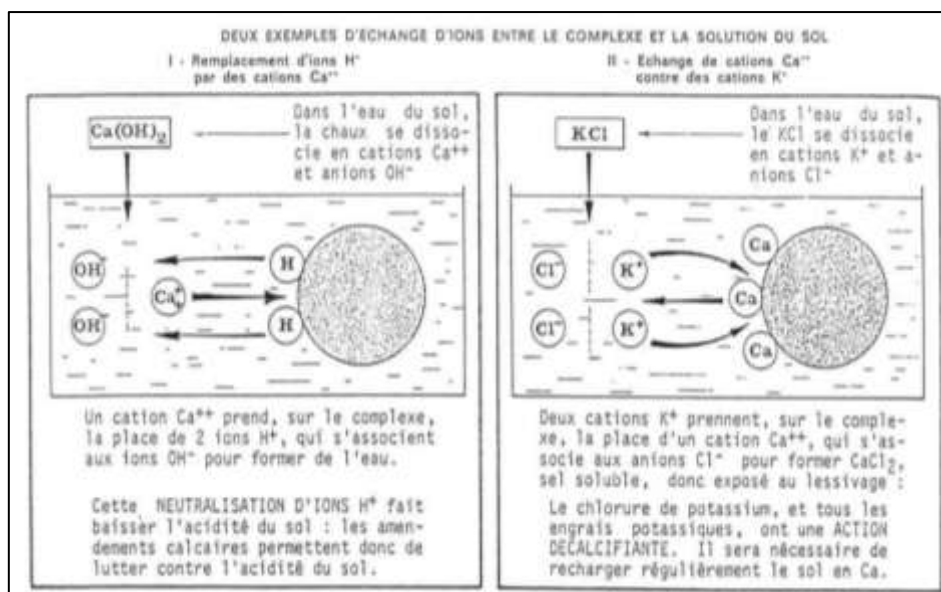


Figure 6. Deux exemples d'échange d'ions entre le complexe et la solution du sol

3.2. Précipitation et dissolution des minéraux

Ces réactions sont aussi importantes que les **phénomènes d'adsorption** ou **d'échange ionique**. Elles se produisent dans **l'eau des pores** ou en **surface des particules du sol**. Ce processus a pour action de **précipiter** les **solutés dissous** dans **l'eau**.

L'enrichissement en **sels** de la **solution du sol** dépend de la **concentration** par **évaporation** et des processus de **précipitation** et de **dissolution** de **minéraux**. En fait, le processus de **concentration de la solution du sol** s'accompagne des précipitations successives des minéraux, du moins soluble au plus soluble d'entre eux. Si l'on considère la réaction de **précipitation-dissolution** d'un minéral **AB** :

$$A^+ + B^- \longrightarrow AB$$

(Forme ionique) (Forme moléculaire solide)

A⁺ et **B⁻** désignent respectivement le **cation** et **l'anion** issus d'**AB**. L'équilibre de la **réaction** est défini par la **constante d'équilibre K_s** ou par le **produit de solubilité p_{ks}** définis de la façon suivante :

$$-K_s = [A^+] * [B^-]$$

$$-pK_s = \log_{10}[A^+] + \log_{10}[B^-]$$

K_s désigne une donnée **thermodynamique** du minéral **AB**, constante à **une pression** et à une **température données**, et désigne les **activités des ions** en solution. Ces réactions peuvent être **modélisées** à l'aide des **constantes d'équilibre** ou des **produits de solubilité** que l'on peut trouver dans les **bases de données thermodynamiques**.

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

ANNEXE I (Éléments constitutifs du sol)

Les minéraux argileux

Les minéraux argileux (**Figure 1**) sont des **phyllosilicates d'aluminium** dont les feuillets sont constitués de **couches d'octaédres $Al(OH)_6$** et de **tétraèdres SiO_4** reliées par les **atomes d'oxygène (O)** et **d'hydroxyle (OH)** mis en commun. Ils sont des **silicates d'aluminium microcristallins** dont le diamètre n'excède pas **2 μm** selon la définition de l'**Association Internationale de la science du sol**. Les **argiles** sont des adsorbants importants pour les **métaux lourds** avec une **surface spécifique importante (jusqu'à 800 m^2/g)**, des charges négatives et des groupements de surface réactifs, leur conférant une capacité d'échange cationique (**CEC**) élevée, jusqu'à **1500 $m\acute{e}q/Kg$** . Le **Tableau 1** présente quelques valeurs de surface spécifique et de **CEC** pour certains **minéraux argileux**.

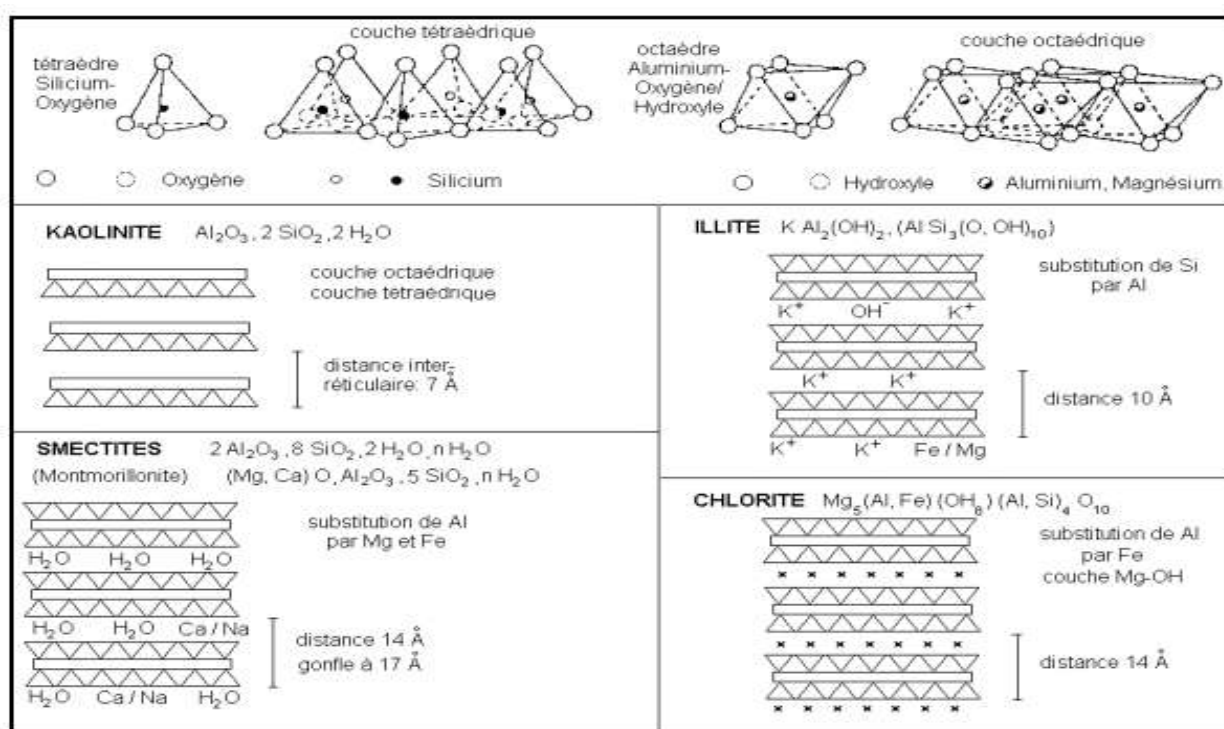


Figure 1. Structure des minéraux argileux

Minéral	Surface spécifique (m^2/g)	CEC ($m\acute{e}q/kg$)
Kaolinite	1-10	50-150
illite	20-175	100-400
smectites	80-800	800-1500
vermiculite	80-760	1000-1500
chlorite	100-175	100-400

Tableau 1. Surface spécifique et CEC de quelques minéraux argileux (Morel, 1996)

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

Les composés organiques :

Les **composés organiques** spécifiques des **sols** (**acides fulviques**, **humiques**, humine) ont une structure complexe (**Figure 2**), dont la structure primaire comprend des **radicaux COOH** ou **OH dissociables** qui là encore sont la source de **charges négatives** capables de retenir les **cations**

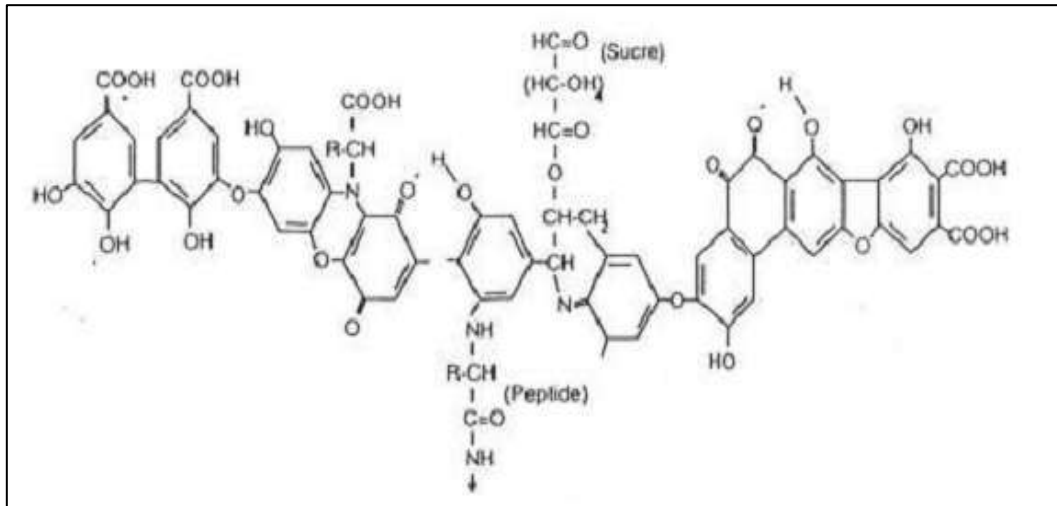


Figure 2. Modèle de structure d'un composé humique :

Les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium

Les oxydes et **hydroxydes de fer** et **d'aluminium** et certains **phyllosilicates neutres** (**kaolinites**) ont pour leur part des charges variables avec le **pH** (**Figure3**) : **positives** au-dessous du **ZPC** (**point de charge nulle**), **négatives au-dessus**. Les conditions de **pH** réalisées dans les sols font que le plus souvent ces constituants ont une **charge positive**.

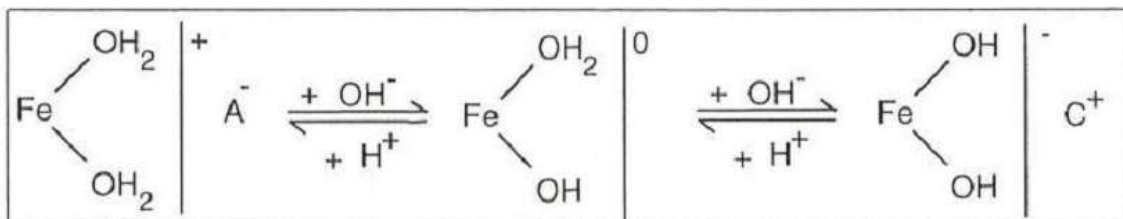


Figure 4 — Comportement des minéraux à charge variable en fonction du pH.

Chapitre I. Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

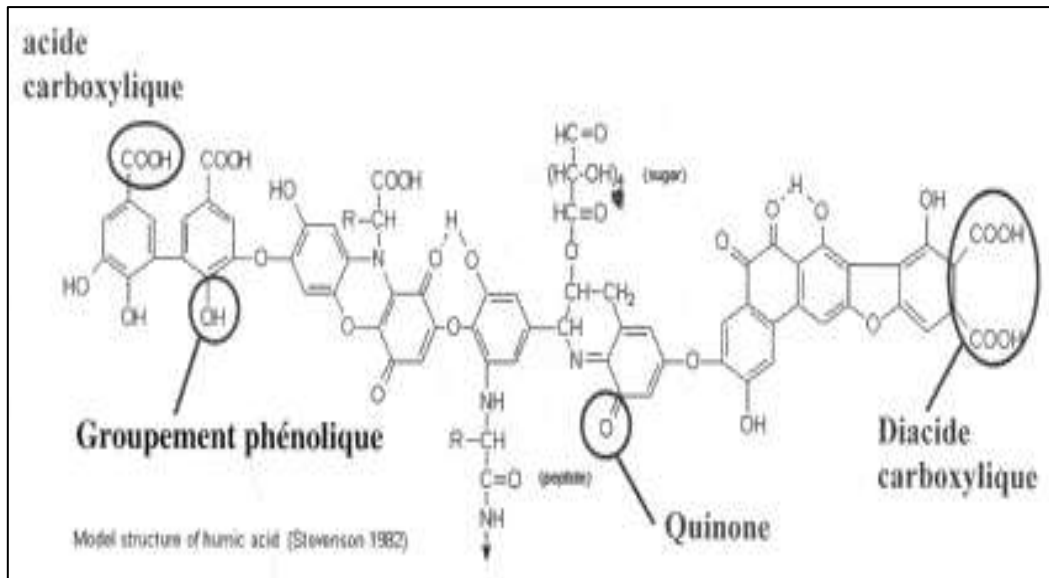


Figure 4. Structure chimique de l'humus (acide humique)

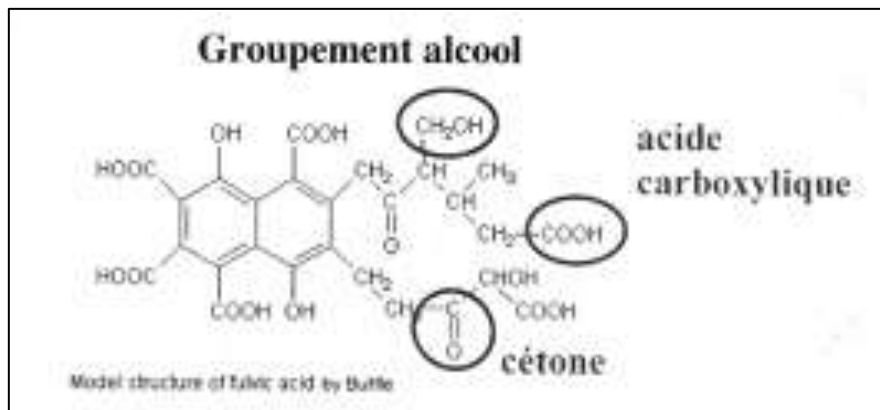


Figure 5. Structure chimique de l'humus (acide fulvique)

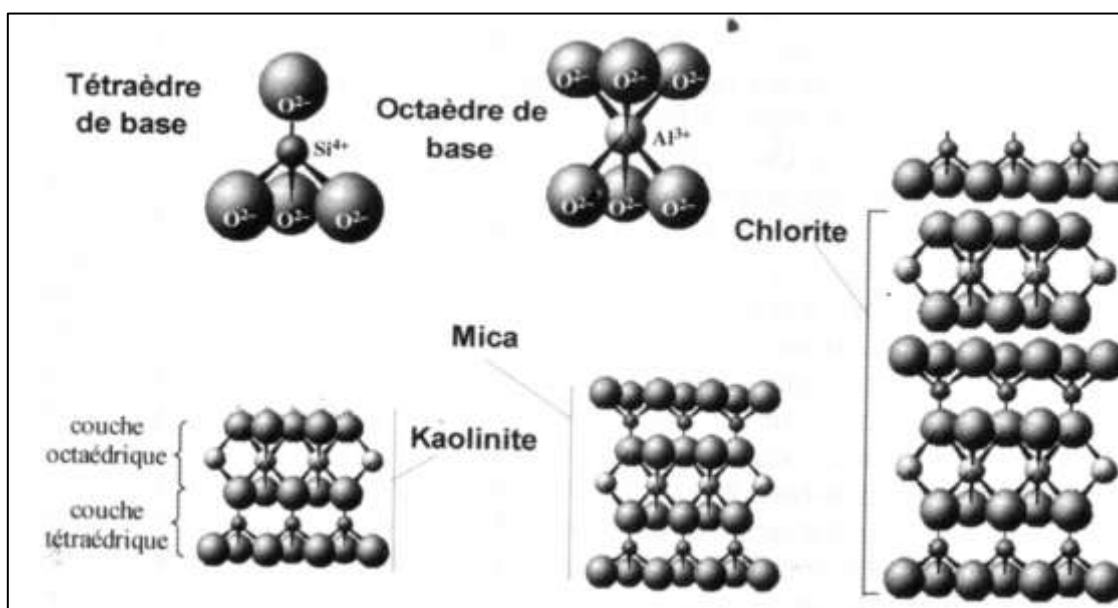


Figure 6. Structure de base des argiles