

Introduction

Le sol peut être défini comme étant *la couche supérieure de la croûte terrestre* composée de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes [1].

Le *sol* est un écosystème à part entière réunissant une quantité et une variété immense d'organismes vivants qui remplissent des fonctions écologiques essentielles. Celui-ci est caractérisé par différents facteurs microbiologiques, physiques, chimiques et mécaniques, il est donc le support d'une activité biologique intense.

Il en résulte que le *sol* est une ressource essentielle pour les sociétés humaines et les écosystèmes : une ressource économique pour la production alimentaire en étant à la base de 90% de l'alimentation humaine et animale, et comme un support de toute activité humaine [2].

En raison de sa position d'interface dans l'environnement, il joue un rôle déterminant dans le devenir des polluants notamment en ce qui concerne la qualité des eaux.

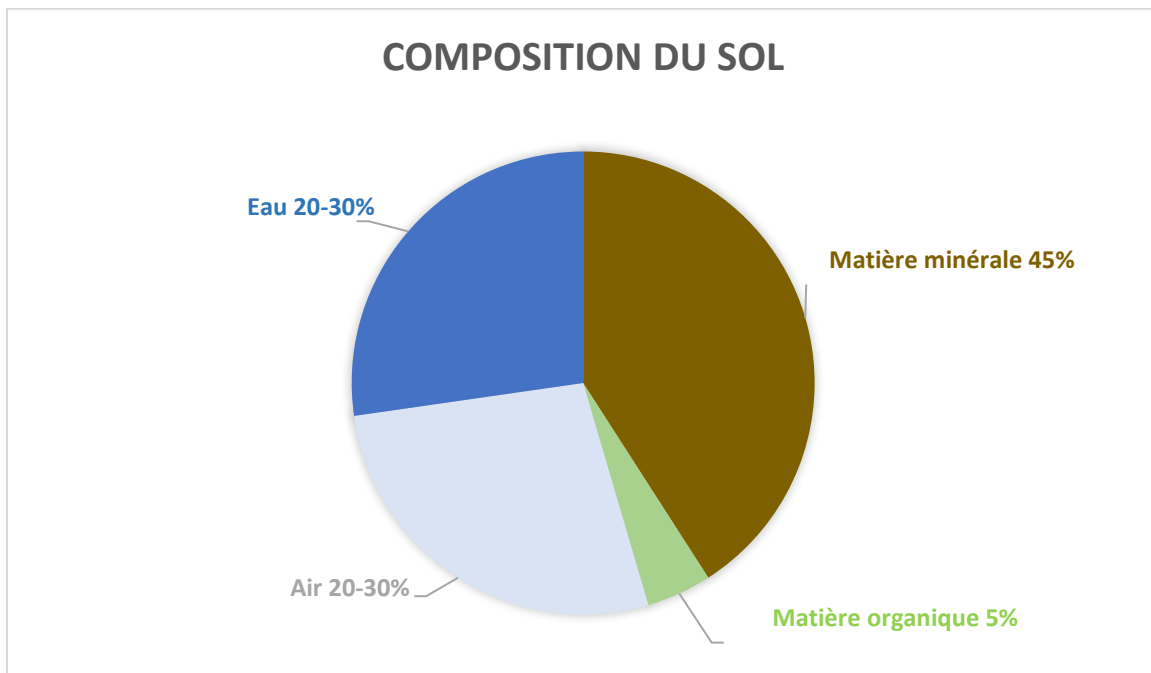


Figure 1. Composition du sol [3].

1. Analyse de la structure du sol

Les sols sont composés d'un ensemble de particules solides, de tailles, de formes et de natures diverses, formant ce que l'on appelle la matrice. La répartition en taille de ces particules permet de déterminer la texture (ou granulométrie) du sol.

La granulométrie ou la texture d'un sol correspond à la distribution de la taille des particules. En effet, c'est les différentes tailles des particules d'un sol qui déterminent sa texture.

Elle correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur, indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. La granulométrie fournit un renseignement précieux sur la pédogenèse.

Tableau 1. Classification texturale USDA par classes de taille de grains

Matériau (texture)	Diamètre minimal	Diamètre maximal
Cailloux	20mm	200 mm
Graviers, gravillons	2 mm	20mm
Sable grossier	0,5 mm	2 mm
Sable moyen	250 µm	500 µm
Sable fin	100 µm	250 µm
Sable très fin	50 µm	100 µm
Limons (moyen, grossier)	20 µm	50 µm
Limons fin (silts)	2 µm	20 µm
Argile	0	2 µm

1.1.Classification des textures

Le sol est aussi classé en fonction de la proportion des grains. En effet, la texture ainsi que la porosité (le volume de vides laissés par les particules), agissent sur les propriétés physiques du sol (structure, aération, rétention de l'eau).

a. Sol sableux

Les sols sableux sont des sols bien aérés et facile à travailler. Ils sont « perméables » et « filtrants ». En effet la grosseur des particules de sable et les grands espaces qui les séparent favorisent la pénétration de l'eau et de l'air mais retiennent peu l'eau. Il est donc pauvre en réserve d'eau et en éléments nutritifs. Il a aussi une faible capacité d'échange anionique et cationique.

b. Sol limoneux

Les sols limoneux sont « *battants* » et « *asphyxiants* » : leurs particules fines laissent peu d'espace, ce qui conduit le sol à se tasser sous l'effet de la pluie et à retenir l'eau qui ne s'infiltre

pas en profondeur provoquant la suffocation des racines. L'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une substance massive accompagnées de mauvaises propriétés physiques.

c. Sol argileux

Les sols argileux sont chimiquement riches mais à mauvaises propriétés physiques. Ce sont des sols imperméables et mal aérés : leurs fines particules agissent comme une colle qui empêche l'infiltration de l'eau formant ainsi un obstacle à la pénétration des racines.

d. Sol équilibré

Une texture équilibrée ou franche *correspond à l'optimum*, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.

Exemple de granulométrie favorable à la culture :

20 à 25% d'argiles, 30 à 35% de limons, 40 à 45% de sables.

1.2. Le triangle de texture

Le triangle des textures a été élaboré dans les années 1930 par des chercheurs du **USDA (United States Department of Agriculture)**, au moment où se mettaient en place les premières grandes classifications agronomiques modernes. L'objectif de cet outil était de fournir une représentation graphique simple permettant de caractériser la structure physique d'un sol à partir de ses teneurs en sable, limon et argile.

En reportant ces trois proportions sur le triangle, on obtient un point qui se situe dans une zone précise correspondant à une classe texturale (par exemple : limono-argileux, sablo-limoneux, argilo-sableux).

Aujourd'hui, le triangle textural est devenu un **référentiel international**, largement utilisé par les instituts de recherche, les agronomes et même les jardiniers expérimentés pour décrire et comparer les sols.

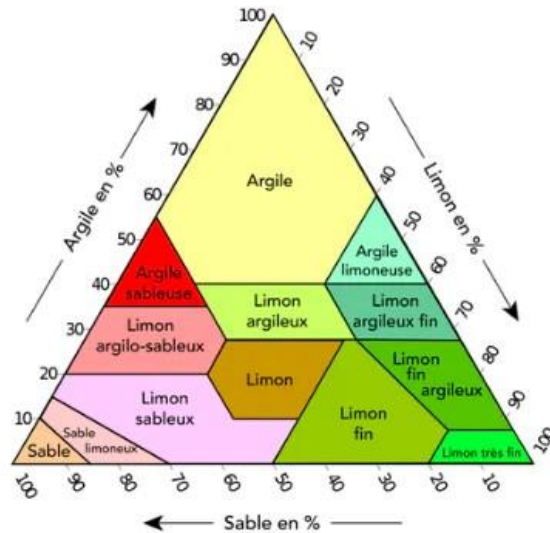


Figure 2. Le triangle de textures

Le triangle des textures permet de :

- Déterminer la texture du sol, qui constitue une propriété physique essentielle ;
- Mettre en évidence les atouts et les limites agronomiques d'un sol donné ;
- Sélectionner les plantes les mieux adaptées à cette texture ;
- Ajuster les besoins en eau, en amendements et en fertilisation en fonction du comportement du sol ;
- Prévoir certains risques tels que la battance, le mauvais drainage ou la compaction.

Ainsi, savoir lire et interpréter correctement le triangle textural est une compétence fondamentale pour toute démarche de jardinage raisonné ou d'agriculture durable

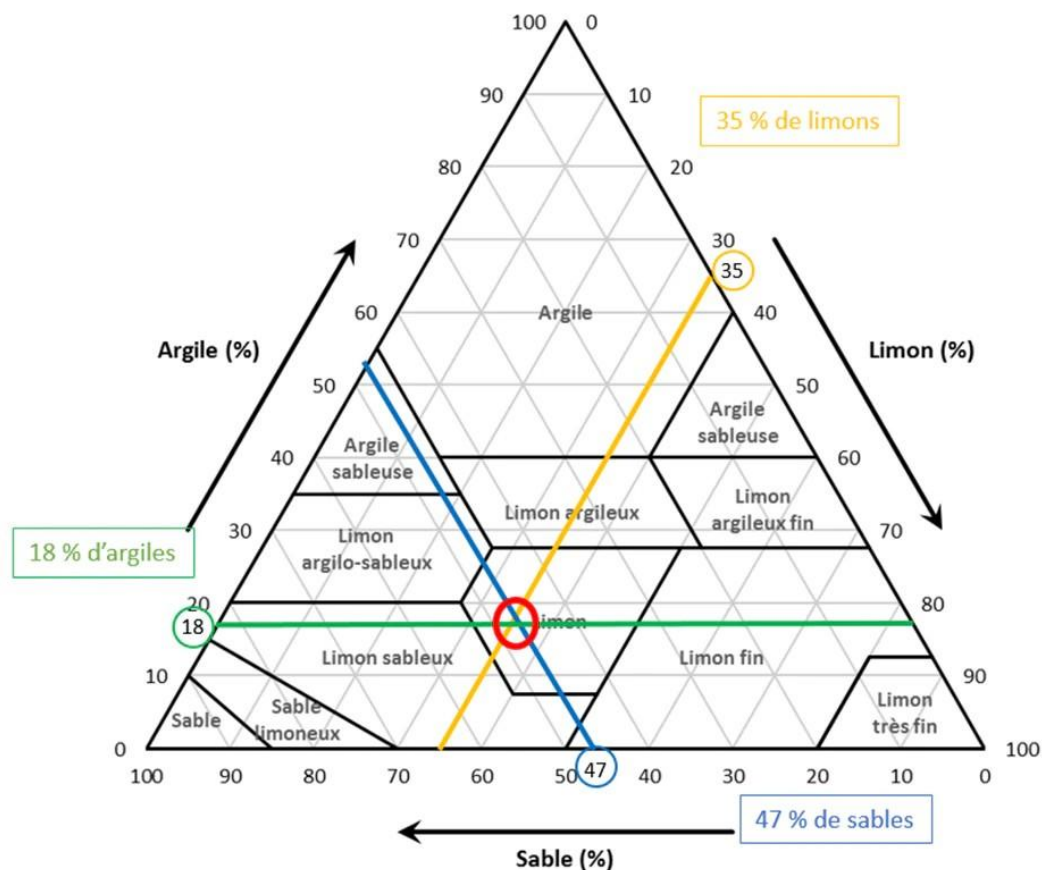


Figure 3. Explication du triangle de textures

a. Comment lire le triangle de texture ?

Le triangle est constitué de **trois axes**, chacun représentant la proportion d'un élément du sol :

- **Sable** : axe incliné **de gauche vers la droite** (ligne qui descend).
- **Limon** : axe incliné **de droite vers la gauche** (ligne qui monte).
- **Argile** : axe **vertical**, qui descend du haut vers le bas.

Étapes pour utiliser le triangle

- 1- Déterminez les pourcentages de sable, limon et argile dans votre sol.
Vous obtenez ces valeurs grâce à une analyse granulométrique : soit avec un kit, soit via un laboratoire.
- 2- Tracez les lignes correspondant à chaque pourcentage :
 - Argile : tracez une ligne horizontale (de gauche à droite), en partant du pourcentage d'argile sur l'axe vertical.

- Limon : tracez une ligne inclinée vers le bas (de droite vers la gauche).
- Sable : tracez une ligne inclinée vers le haut (de gauche vers la droite).

3- Repérez le point où les trois lignes se croisent. Ce point tombe dans une zone précise du triangle : c'est la classe texturale du sol (exemples : *limono-sableux*, *sablo-argileux*, *franc*, etc.).

4- Identifiez cette classe en vous aidant de la légende du triangle. Le triangle USDA ou sa version française contient 12 classes texturales.

Exemple simple

Pour un sol contenant :

- 60 % sable
- 25 % limon
- 15 % argile

Le point d'intersection tombe dans la zone « **sablo-limoneux** ».

b. Comprendre les différentes classes texturales

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque classe texturale, les proportions moyennes en sable/limon/argile, ainsi que leurs avantages et limites agronomiques. Il s'appuie sur les classifications du triangle des textures (USDA).

Tableau 1. Classification du triangle des textures

Classe texturale	% Sable	% Limon	% Argile	Avantages principaux	Inconvénients majeurs
Sol sableux	> 65%	< 20%	< 15%	Léger, facile à travailler, bon drainage	Pauvre en nutriments, faible rétention d'eau
Sol limoneux	20-30 %	> 40%	< 20%	Fertile, facile à ameubler, retient bien l'eau	Sensible à la battance et à l'érosion
Sol argileux	< 20 %	< 40%	> 40%	Très riche, grande capacité de rétention d'eau	Compact, collant à l'humide, dur à sec
Sol équilibré (franc)	30-40%	30-40%	20-30%	Bon compromis entre rétention, aération, fertilité	Rare à l'état naturel, nécessite un bon entretien
Sol sablo-limoneux	40-60%	20-40%	< 20 %	Facile à travailler, bonne infiltration	Risque de tassement si mal géré
Sol argilo-limoneux	20-30 %	30-50 %	20-40 %	Fertile, bonne tenue, apte à de nombreuses cultures	Drainage difficile, compactage fréquent
Sol sablo-argileux	40-60 %	< 20 %	20-40 %	Bon drainage, assez stable	Moins fertile, nécessite des apports réguliers

2. Analyse de l'acidité du sol et sa capacité d'échange cationique

L'acidité du sol et sa capacité d'échange cationique (CEC) sont deux paramètres essentiels pour comprendre son fonctionnement chimique et sa fertilité.

2.1. Acidité d'un sol

Le pH du sol mesure sa concentration en ions H^+ . Il indique si le sol est acide, neutre ou alcalin.

Ce paramètre influence directement :

- la disponibilité des éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg, oligo-éléments),
- l'activité des micro-organismes,
- la solubilité de nombreux minéraux,
- la croissance racinaire.

Un sol trop acide ou trop alcalin peut limiter la nutrition minérale de la plante. L'analyse du pH est donc un préalable indispensable à tout diagnostic de fertilité.

2.2. Capacité d'échange cationique d'un sol

La **capacité d'échange en cations (CEC)** correspond à la quantité maximale de cations qu'une masse donnée de sol peut retenir sur ses particules.

Elle joue un rôle essentiel dans la nutrition minérale des plantes, car elle détermine la disponibilité d'éléments tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ou NH_4^+ . La CEC dépend principalement du **complexe argilo-humique**, c'est-à-dire de l'association entre les particules d'argile et la matière organique, mais aussi de la **teneur en argile**, de la **qualité de la matière organique** et de la **nature des minéraux argileux** présents dans le sol.

Les sols riches en argile ou en humus présentent généralement une CEC élevée, leur permettant de retenir efficacement les nutriments et de les libérer progressivement pour les plantes.

À l'inverse, les sols sableux, pauvres en colloïdes, possèdent une CEC très faible et sont donc sujets à un **lessivage rapide** des éléments nutritifs.

L'apport de matière organique est alors un levier important pour améliorer la CEC des sols sableux, tandis que dans les sols argileux, il contribue à stabiliser les particules d'argile, limiter

le lessivage et renforcer encore la capacité d'échange, ce qui améliore durablement la fertilité du sol.

3. Constituants du sol (Matière organique et minérale d'un sol)

Le sol est un milieu poreux au sein duquel se déroulent de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques. Il s'agit d'un système ouvert triphasique, composé d'une phase solide, d'une phase liquide (eau) et d'une phase gazeuse (air ou vapeur d'eau).

3.1.Phase gazeuse (Constituants gazeux, air du sol)

L'air du sol, ou la phase gazeuse du sol contient en général les mêmes éléments que l'air atmosphérique (O_2 , N_2 , CO_2) mais sa composition ainsi que la teneur de chaque composant peuvent être très différentes en raison, en particulier, de l'activité biologique.

A la surface, l'oxygène et le dioxyde de carbone jouent un rôle important.

- Le dioxyde de carbone influe significativement sur l'acidité du sol ainsi que sur la chimie des carbonates.
- L'oxygène assure les conditions aérobies qui agissent sur la mobilité des polluants dans le sol.

Dans les profondeurs les plus importantes où le taux d'oxygène est très faible (conditions anaérobiques), Les microorganismes produisent du gaz comme NO , NO_2 , NH_3 , CH_4 et H_2S . Ces gaz existent dans les sols, soit à l'état libre, soit dissous dans la solution des sols.

La teneur en oxygène de la phase gazeuse du sol joue un rôle déterminant dans de nombreux processus biologiques.

L'oxygène a une influence directe sur la croissance racinaire et elle permet des biotransformations en milieu aérobique qui conduisent à la production de substances nutritives comme le nitrate et l'ortho phosphate

3.2.Phase liquide (constituants liquides, solution du sol)

La phase liquide est essentiellement constituée d'eau, dans laquelle sont dissous des ions minéraux et diverses molécules organiques.

Sa composition dépend essentiellement du milieu géologique avec lequel elle est en contact, mais également de la composition de l'eau de pluie et de l'eau de surface.

L'eau du sol s'enrichit de plusieurs cations tels que : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et d'anions comme HCO_3^- , NO_3^- , etc.

Lorsque la solution du sol est en contact avec des sulfures comme la **pyrite** (FeS_2), des processus d'oxydation chimique ou biologique peuvent produire des concentrations élevées en **fer** et en **sulfates**, conduisant parfois à la formation d'**eaux acides** — un phénomène important dans la pollution des sols.

3.3.Phase solide (constituants minéraux et organiques)

La phase solide constitue entre 50 et 70 % du volume total du sol. Environ 90 % de cette phase est formée d'éléments inorganiques, sauf dans les sols très riches en matière organique (>50 %).

3.3.1. Les constituants minéraux

Ils proviennent de la désagrégation physique et de l'altération chimique de la roche-mère et sont principalement constitués de:

- **Terre fine du sol** : sable, limon, argile
- **Éléments grossiers** : gravier, cailloux, pierres

a. Minéraux sableux

Les minéraux de silice sont les composés inorganiques les plus abondants dans les milieux naturels. Ils sont basés sur l'anion silicate qui a une structure tétraédrique. Les principaux représentants de ces minéraux sont le *quartz* et le *feldspath*. Ils font partie de la fraction la plus grossière où la taille des particules varie de 50µm à 2mm.

b. Minéraux argileux

Les minéraux argileux résultent de l'altération et de la dégradation des roches.

L'altération peut être *physique* sous l'effet de variation de température ou encore *chimique*, au contact de l'eau.

L'altération *chimique* conduit à une dégradation en particules de moins de 2µm de diamètre.

Les minéraux argileux se caractérisent par leurs formes leurs surfaces spécifiques, leurs capacités d'adsorption et de gonflement et la multiple possibilité d'échange ioniques.

Principaux groupes :

- i. **Kaolinite** : Présente peu de site d'échange et se situe dans la zone de rupture latérale des feuillets. Sa capacité d'échange cationique est assez faible (5-10meq/100g)
- ii. **Illites** : Ont une capacité d'échange réduite par la présence des ions K^+ fixés sur la face interne des feuillets (20-50meq /100g). De ce fait, seules les faces externes sont disponibles pour les échanges.
- iii. **Vermiculites** : La charge des feuillets est voisine de celle des illites, mais en plus, les cations peuvent s'échanger facilement.
- iv. **Smectites** : Groupes de minéraux argileux en feuillets à trois couches de 10 Å à teneurs variables en Na, Al, Fe, Mg dotés de propriétés adsorbantes et gonflantes.
- v. **Montmorillonite** : C'est un minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté et appartenant au groupe de la smectite, de la famille des phyllosilicates.

c. Oxydes et oxyhydroxydes

Les oxydes et oxyhydroxydes de fer (hématite, goethite) et de manganèse sont très fréquents dans les sols. Selon Soulier (1995) « *ce sont des minéraux de petite taille, finement dispersés, qui ont tendance à recouvrir d'autres particules de plus grande taille, comme le quartz* ».

Ils jouent un rôle important dans :

- l'adsorption des métaux lourds,
- la mobilité des polluants,
- la coloration du sol.

d. Carbonates

Les minéraux carbonatés les plus courants dans les sols sont la calcite (CaCO_3), la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), la magnésite (MgCO_3) et la sidérite (FeCO_3).

La calcite et la dolomite apparaissent comme des minéraux primaires ainsi que des minéraux secondaires.

La calcite primaire est le produit de la désagrégation des silicates contenant du calcium, comme les pyroxènes ou amphiboles.

La calcite, minérale secondaire, est le résultat de la précipitation de la solution du sol souvent enrichie en magnésium : on parle de magnésium calcite ($\text{Ca}_{1-x}\text{Mg}_x\text{CO}_3$).

3.3.2. Les constituants organiques du sol

La matière organique du sol regroupe l'ensemble des composés d'origine végétale, animale et microbienne présents dans le sol. Elle représente généralement **4 à 5 %** de la masse totale du sol, mais joue un rôle déterminant dans sa fertilité, sa structure et sa capacité à immobiliser ou mobiliser les polluants.

La matière organique évolue continuellement sous l'effet de l'érosion, de l'activité microbienne, de l'oxydation et de divers processus physico-chimiques, conduisant progressivement à la formation d'humus et, à terme, à des formes minéralisées.

a. Matière organique fraîche (MOF)

La matière organique du sol est composée d'organismes vivants, de résidus de végétaux MOF et d'animaux, de tannins, de produits de décomposition, et de substances humiques [4].

Elle ne représente en général que quelques pourcents (4 à 5%) de la masse du sol.

Sous l'action de l'érosion, des micro-organismes, de l'oxydation naturelle et des processus physico-chimiques, la matière organique se transforme en matière minérale.

Les tannins sont des substances naturelles phénoliques qui peuvent précipiter les protéines à partir de leurs solutions aqueuses.

L'humus est une terre brune noirâtre provenant de la décomposition des débris végétaux et/ou animaux dans le sol et qui contribue à sa fertilité.

b. Organismes vivants (biomasse microbienne)

Bien que très petits, les micro-organismes vivants *ont une importance dans le sol* qui est de loin supérieure à leur taille. Ils décomposent les résidus animaux, synthétisent l'humus et les aliments de cycles tels que le carbone et l'azote. Les sous-produits chimiques des réactions microbiennes lient ensemble les particules du sol sous forme d'agrégats stables résistant à l'érosion.

L'activité biologique des organismes vivants du sol contribue à construire et à maintenir la structure du sol et à le garder meuble. Les fourmis, les insectes et les vers de terre par exemple, creusent des tunnels (macropores) qui permettent à l'eau de pénétrer dans le sol et d'y circuler rapidement

c. La lignine

Les matières végétales constituent la principale source de carbone du sol. Certains composés tels que la cellulose ou les hémicelluloses sont facilement décomposables et disparaissent rapidement contrairement aux lignines très résistantes aux attaques fongiques et bactériennes. Très répandue dans certains tissus végétaux, la lignine représente une fraction souvent importante de la masse végétale (18 à 35 % dans les bois, 20 à 30 % dans les pailles)

d. Substances humiques (humus)

Les substances humiques constituent le produit final de la dégradation de la matière organique.

Elles sont formées de composés complexes, riches en noyaux aromatiques, souvent associés à des radicaux libres.

L'humus se caractérise par :

- une grande stabilité chimique,
- une capacité élevée d'échange cationique,
- un rôle majeur dans la rétention de l'eau, de l'air et de la chaleur,
- une contribution essentielle à la fertilité du sol.

Il constitue la principale source naturelle d'azote organique disponible à long terme.

e. Les sulfures et composés du soufre

Le soufre existe dans le sol sous forme organique (à plus de 95% dans les sols des régions humides et semi humides) et inorganique.

La proportion entre le soufre organique et inorganique varie largement avec le type de sol et la profondeur.

La teneur en soufre total dans le sol varie de 0.5‰ dans les sols sableux à 3‰ dans les sols riches en matière organique. Dans les sols cultivés, la teneur oscille entre 0,5% et 0.1%.

Le soufre peut provenir :

- De l'altération de la roche mère ;
- Des engrais chimiques sulfatés : sulfate d'ammoniaque superphosphate ;
- Des engrais organiques ;

- Des retombées atmosphériques (la majeure partie du SO_2 présent dans l'atmosphère résulte de la combustion du charbon, ou le SO_2 se transforme en acide sulfurique rapidement, ce qui explique les pluies acides : ex: Ghazaouet) ;
- Des restitutions des cultures ;
- Des produits parasites...

3.3.2.1. Rôle de la matière organique et complexe argilo-humique

La matière organique du sol, comprenant la matière organique fraîche, les substances humiques et la biomasse microbienne, joue un rôle central dans la fertilité, la structure et la chimie des sols. L'humus issu de la décomposition de la matière organique s'associe aux particules d'argile pour former le **complexe argilo-humique**, un colloïde stable qui contribue à la cohésion et à la stabilité du sol.

Dans ce complexe, l'humus protège l'argile en retenant l'eau et en évitant sa dispersion, tandis que l'argile protège l'humus de la minéralisation rapide par les micro-organismes. Les deux sont liés par des **cations** tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} ou Fe^{3+} . Tous les cations n'ont pas le même pouvoir flocculant : $\text{Ca}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, ce qui influence la cohésion et la fertilité du sol.

L'un des rôles majeurs du complexe argilo-humique est sa contribution à la **capacité d'échange cationique (CEC)**, c'est-à-dire la quantité maximale de cations qu'une masse de sol peut retenir. La CEC conditionne la disponibilité des éléments nutritifs essentiels pour les plantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , etc.). Les sols riches en argile ou en humus présentent généralement une CEC élevée, tandis que les sols sableux, pauvres en colloïdes, ont une CEC faible et présentent un risque de lessivage rapide des nutriments.

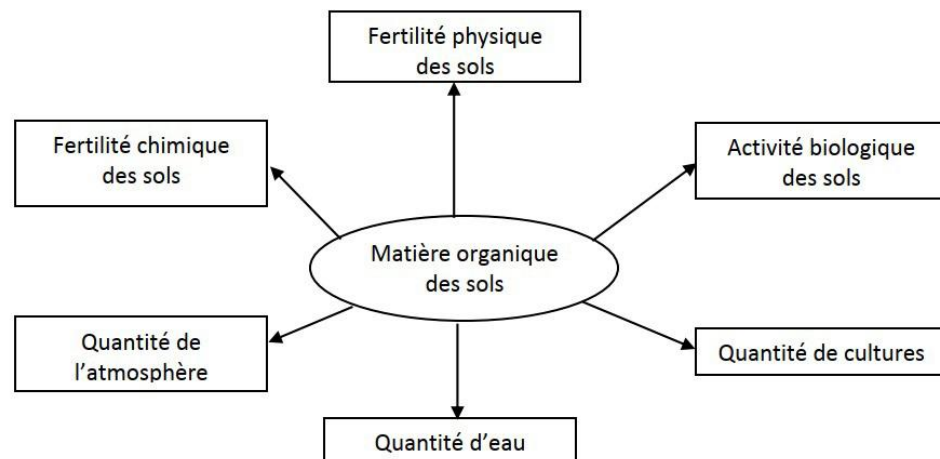
L'ajout de matière organique permet :

- d'**augmenter la CEC des sols sableux**, en améliorant leur capacité de rétention des éléments nutritifs,
- de **stabiliser les sols argileux**, en limitant le lessivage et en renforçant la rétention des cations, améliorant ainsi la fertilité globale du sol.

En résumé, le complexe argilo-humique illustre parfaitement comment la matière organique et les particules minérales interagissent pour **structurer le sol, retenir l'eau et les nutriments, et réguler la mobilité des polluants**, ce qui est fondamental dans le contexte de la pollution des sols.

3.3.2.2. Importance et fonctions de la matière organique du sol

Dans le sol, les matières organiques assument de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales synthétisées sur la figure suivante



- Elles assurent le stockage et mise à disposition, par minéralisation, des éléments nutritifs dont elle a besoin.
- Elles stimulent l'activité biologique, étant à la fois source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol.
- Elles ont un rôle central dans la structuration du sol et participent à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (pluies, tassement...).
- Elles favorisent le réchauffement du sol (coloration plus sombre des matières organiques).

- Elles contribuent à la perméabilité, l'aération du sol et la capacité de rétention en eau.
- Elles jouent un rôle fondamental pour les autres compartiments de l'environnement en participant au maintien de la qualité de l'eau par leur forte capacité de rétention des polluants organiques (pesticides, hydrocarbures...) et minéraux (éléments trace métalliques).
- Elles peuvent être aussi source de polluants potentiels, comme les nitrates et les phosphates.
- Elles influencent également la qualité de l'air par le stockage ou l'émission de gaz à effet de serre. Elles ont un rôle de puits ou d'émetteur de carbone (principalement sous forme de CO_2).