

Matière : AUTOECOLOGIE GENERALE

Partie : Facteurs édaphiques

I. Généralités

1. Définition du sol

Le sol est la couche externe de la croûte terrestre caractérisée par la présence de nombreux êtres vivants. Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol, en tant que partie de l'écosystème terrestre, occupe une position clé dans les cycles globaux des matières. Végétaux et animaux puisent du sol l'eau et les sels minéraux et trouvent l'abri et/ou le support indispensable à leur épanouissement.

✚ Formation

Le sol est résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de processus très lents : physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants.

2. Profil pédologique

Un sol bien structuré montre une succession de plusieurs horizons disposés verticalement et qui constituent le profil pédologique du sol. Ces différents horizons se distinguent par leurs constitutions, leurs organisations et leurs comportements d'ensemble.

Les horizons du sol sont désignés de manière conventionnelle par les lettres A-B-C. Chaque horizons peut se subdiviser en plusieurs sous types selon le degré de la variation et de la matière qui le compose.

- O : litière, matière organique.
- A : Couche humifère : gradients décroissants de matière organique.
- B : Couche d'accumulation : Les éléments lessivés de A (matière organique, Fe, Ca) se concentrent en B.
- C : Couche minérale : zone de transition vers la roche-mère.

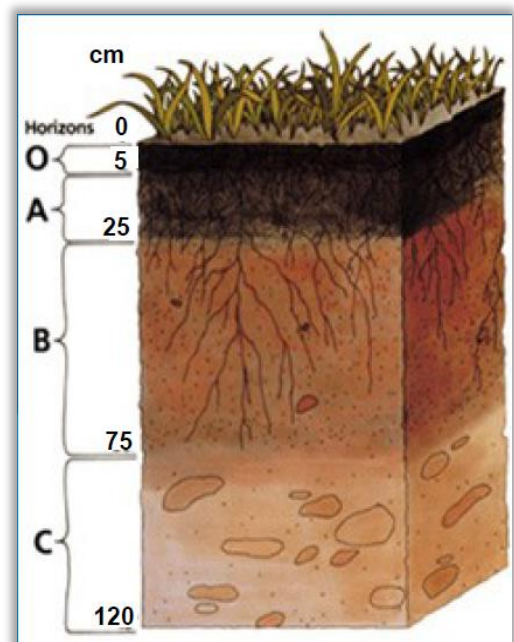


Figure 01. Profil du sol

3. Constituants du sol

Comme l'illustre le tableau ci-dessous, le sol est constitué de trois fractions :

- une fraction solide, composée de constituants minéraux (sables, argile,...) et de constituants organiques.
- une fraction liquide (encore appelée solution du sol), composée d'eau dans laquelle sont dissoutes des substances solubles provenant à la fois de l'altération des roches, de la minéralisation des matières organiques et des apports par l'homme (apports d'engrais solubles par exemple).
- une fraction gazeuse, ou atmosphère du sol, composée des mêmes gaz que l'air, avec en plus des gaz provenant de la décomposition des matières organiques.

Tableau 01. Constituants du sol

| CONSTITUANTS SOLIDES | | CONSTITUANTS LIQUIDES | CONSTITUANTS GAZEUX |
|--|--|--|---|
| Constituants minéraux | Constituants organiques | = Solution du sol | = air du sol |
| <p>Terre fine du sol : Argiles, limons fins, limons grossiers, sable fins, sables grossiers</p> | <p>Matière organique fraîche :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ constituants des tissus végétaux cellulose, hémicellulose, tanins... ➤ déjections animales et animaux morts | <p>Eau du sol Eléments solubles dissous :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ substances organiques (acides organiques, sucres,...) ➤ ions dans l'eau du sol : Ca^{++}, Mg^{++}, K^+, Na^+, NO_3^-, PO_4^{3-}, | <p>Constituants de l'air : O_2, N_2, CO_2</p> <p>Gaz issus de l'activité des animaux du sols et des processus de décomposition : CO_2, H_2, CH_4, ...</p> |
| <p>Eléments grossiers : Graviers, Cailloux, Pierres, Blocs</p> | <p>Matières humiques : matières organiques transformées</p> | | |

➤ **Les constituants solides**

i. Les constituants minéraux

1. Origine et types de constituants minéraux

Les constituants minéraux du sol sont primaires, hérités directement de la roche-mère, ou secondaires, issus de la transformation chimique des précédents et réunis alors dans le complexe d'altération.

Deux processus commandent l'évolution des roches, la désagrégation et l'altération.

2. Désagrégation physique et altération biogéochimique

Lors de la désagrégation physique, les agents climatiques tels que le vent, le gel, l'eau, fractionnent la roche en morceaux de plus en plus petits, tout en conservant la composition minéralogique de départ. La vitesse de transformation est particulièrement rapide sous les climats contrastes.

L'altération biogéochimique des roches, qui fait intervenir l'eau, associée ou non à l'oxygène, au gaz carbonique ou à des acides organiques, suit cinq voies, l'hydratation, la dissolution, l'oxydation, la réduction et l'hydrolyse:

- L'hydratation, qui altère avant tout les roches ferrugineuses (riche en fer), en les faisant changer de volume, de couleur et légèrement leur qualité minéralogique par l'adjonction de molécules d'eau qui les fragilisent.
- La dissolution, par laquelle l'eau et les substances qu'elle contient altère les roches solubles tels, le sel et le gypse.
- L'oxydation permet la libération, sous forme ferrique Fe(III), de fer présent à l'état Fe(II) dans les réseaux cristallins de certains silicates, qu'elle déstabilise.
- La réduction solubilise le fer (II) à partir d'oxydes et d'hydroxydes de fer (III), présents par exemple dans des ciments ferrugineux de certains grès. Elle concerne des milieux mal aérés.
- L'hydrolyse provoque un réarrangement important des réseaux cristallins. Elle dépend des conditions climatiques, favorisée par une température et une humidité élevées.

3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sol consiste à classer les éléments minéraux du sol d'après leur grosseur, et à déterminer le pourcentage de chaque fraction.

A la suite d'une convention internationale, les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre :

Tableau 02. Constituants minéraux du sol

| | | |
|--------------------|------------------|----------------------------------|
| Terre fine | argile | particules de moins de 2 μ m |
| | limons fins | 2 à 20 μ m |
| | limons grossiers | 20 à 50 μ m |
| | sables fins | 50 μ m à 200 μ m |
| | sables grossiers | 200 μ m à 2mm |
| Éléments grossiers | graviers | 2 à 20 mm |
| | cailloux | 2 à 7,5 cm |
| | pierres | 7,5 à 20 cm |
| | blocs | >20 cm |

3.1. Les éléments grossiers

Les éléments grossiers forment le squelette du sol car ils constituent la part essentielle dans la composition du sol.

Leurs rôles peuvent être résumés de la façon suivante :

- ils constituent la réserve minérale du sol : leur altération chimique libère des éléments minéraux qui contribuent à l'alimentation des plantes.
- ils augmentent la perméabilité du sol à l'eau et à l'air.
- ils diminuent le volume de sol prospectable pour les plantes.
- ils peuvent avoir une action sur la chaleur du sol, en tant que réservoir de chaleur.
- ils peuvent participer à constituer une réserve d'eau : certaines roches poreuses (calcaires par exemple) peuvent retenir un peu d'eau.

3.2. Les sables grossiers

Ceux-ci :

- favorisent la pénétration de l'eau et de l'air : ils rendent le sol perméable.
- ils retiennent peu l'eau : le sol est filtrant.
- ils facilitent les échanges de température : le sol se réchauffe vite au printemps.
- ils ne peuvent s'agglomérer en mottes : le sol est léger et facilement pénétrable par les racines.

3.3. Les limons et sables fins

Ils rendent le sol « battant » : le sol a tendance à se tasser en surface sous l'effet des pluies et à former des croûtes.

Ils ont tendance à retenir l'eau en s'opposant à son infiltration en profondeur : le sol est imperméable en surface, asphyxiant pour les racines.

3.4. Les fractions colloïdales minérales ou argile pédologique

Les éléments sableux que nous venons d'étudier sont enrobés d'une sorte de pâte, une sorte de « colle », qui les réunit en petits agrégats. Tout comme un édifice, le sol est donc construit, il possède une structure, dont la forme et la solidité dépendent, nous le verrons, du pourcentage des éléments qui le constituent mais surtout de la nature de cette pâte que l'on nomme « les colloïdes du sol ». Parmi ceux-ci, on distingue les colloïdes organiques (substances composant l'humus) des colloïdes minéraux.

Classés d'après leurs propriétés minéralogiques, les constituants de l'argile pédologique se répartissent comme suit :

- argiles minéralogiques ;
- silice amorphe (colloïdale) et silice cristallisée ;
- sesquioxydes cristallisés ou amorphes ;
- minéraux résiduels.

3.4.1. Les argiles minéralogiques

3.4.1.1. Généralités

L'argile est une matière première utilisée depuis la plus haute antiquité. Le mot argile vient du grec "argilos" dérivé de "argos" qui veut dire blanc, ou du latin "argila"; c'est la couleur du matériau utilisé en céramique qui a conduit les anciens à lui donner ce nom.

A) Les grandes familles de minéraux argileux

Ce sont des phyllosilicates d'aluminium dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres $\text{Al}(\text{OH})_6$ et de couches de tétraèdres SiO_4 reliées par les atomes O et OH mis en commun. La distance inter-réticulaire d sépare 2 feuillets successifs. Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets.

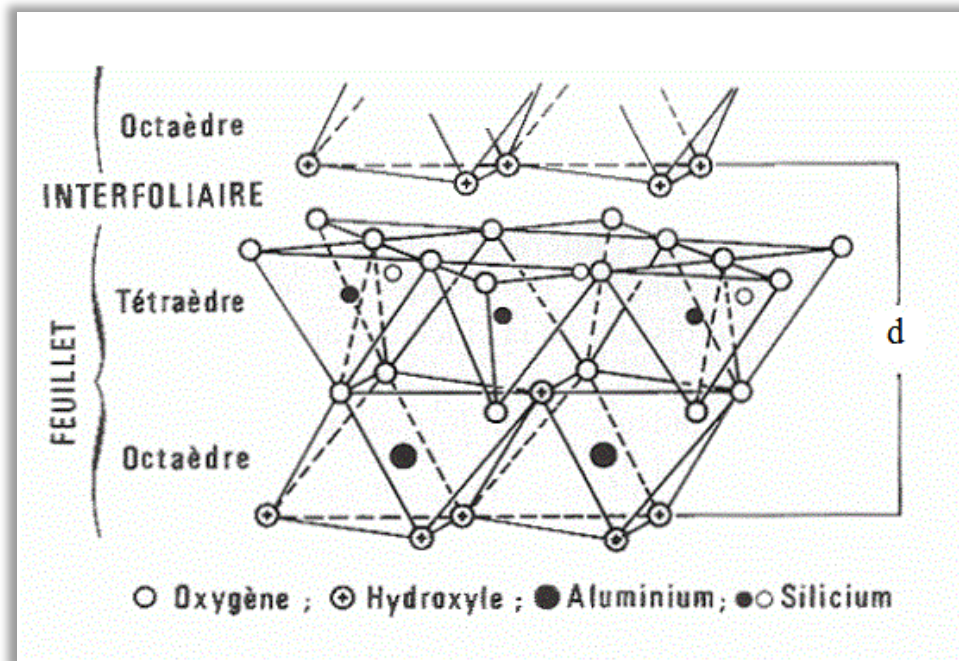


Figure 2. Notion de feuillet, d'inter feuillet et de distance basale d pour un minéral.

B) Les types de minéraux argileux

Selon le nombre de couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), on distingue trois principaux types de minéraux: (Fig.3)

- les minéraux de type 1:1 (ou T-O) à une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres. L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1 Å. A ce type correspond le groupe de la kaolinite;
- les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å selon le contenu de l'inter feuillet. A ce type correspondent les groupes des illites et des smectites.
- les minéraux de type 2:1:1(ou T-O-T-O) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques, et inter feuillet constitué par une couche d'octaèdre l'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å ; à ce type correspond le groupe de chlorite.

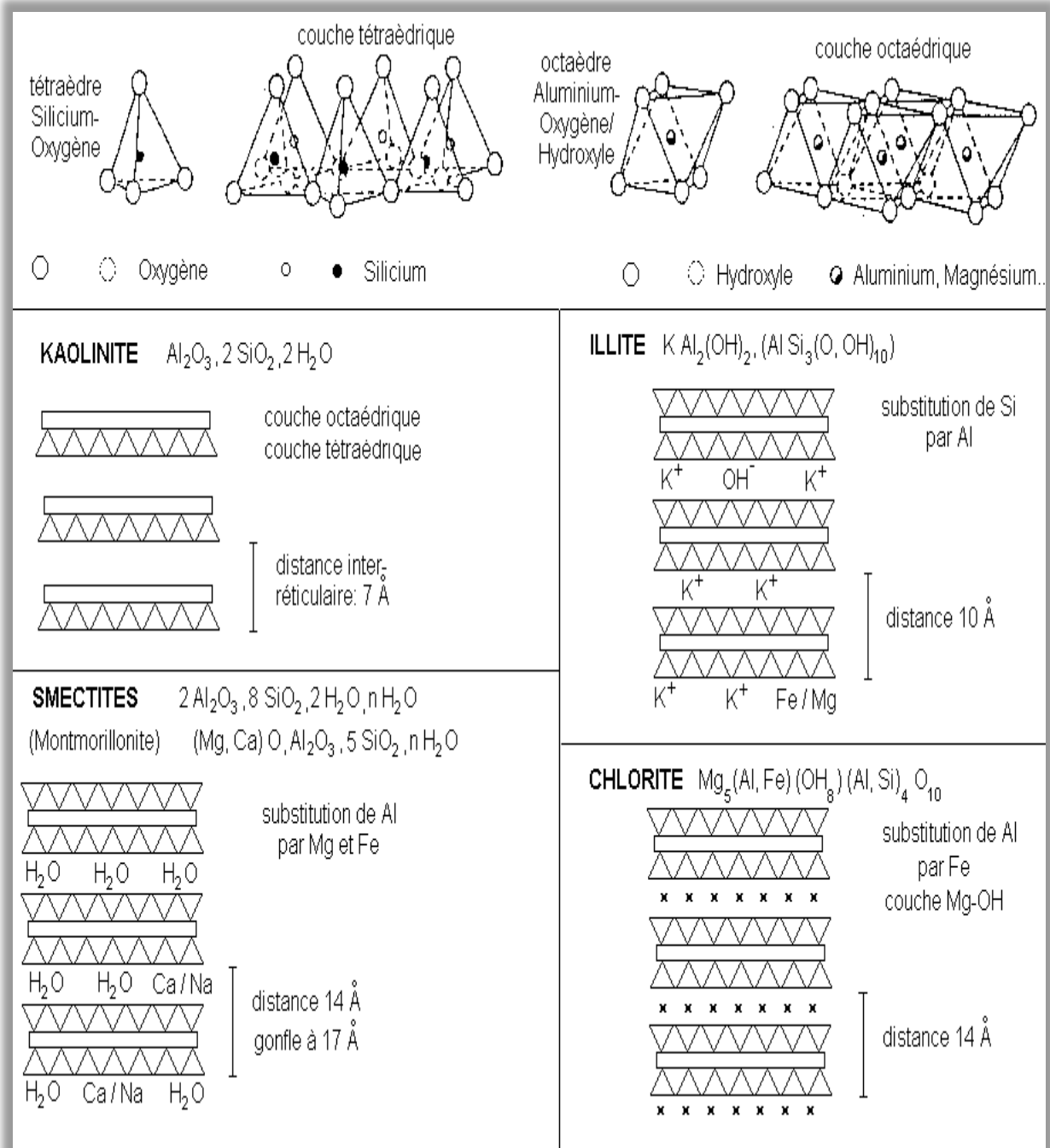


Figure 3. Les types des minéraux argileux

C) Provenance des argiles

A l'origine, les argiles sont issues de l'altération des roches par hydrolyse de minéraux silicates. Dans les sols, les argiles proviennent souvent de la désagrégation et de la dissolution des roches détritiques qui les avaient piégées lors de leur sédimentation sous-marine et de leur diagenèse, et dont elles peuvent constituer une partie importante.

3.4.1.2. Propriétés physico-chimiques des argiles

A) Propriétés colloïdales

Les argiles possèdent sur leur surface des charges négatives : ce sont des colloïdes négatifs. Ces particules, toutes chargées négativement peuvent alors se repousser mutuellement (répulsion électrostatique) : c'est ce qui se passe dans l'eau distillée (voir figure 4 ci-dessous).

A ce moment, les argiles restent en suspension (appelée suspension colloïdale), à l'état dispersé (ou peptisé).

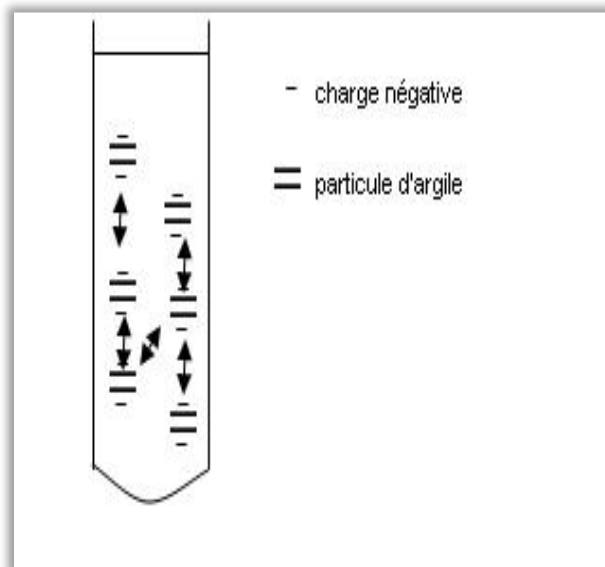


Figure 4. Les particules d'argiles restent longtemps en suspension dans l'eau à cause des charges négatives qu'elles portent et qui provoquent des phénomènes de répulsion entre particules.

Par contre, si l'on introduit dans le liquide un acide, qui libère des ions H^+ , ou un sel de calcium (figure 5 ci-dessous) qui libère des cations Ca^{++} , ces ions positifs vont induire la neutralisation des charges négatives des micelles, qui peuvent alors s'agglutiner et se déposer : ce phénomène s'appelle la floculation (précipitation).

En fait, les ions positifs supplémentaires vont refouler vers les micelles d'argile les ions positifs qui les entouraient déjà. Ces ions venant s'y accoler, neutralisent les charges négatives des micelles.

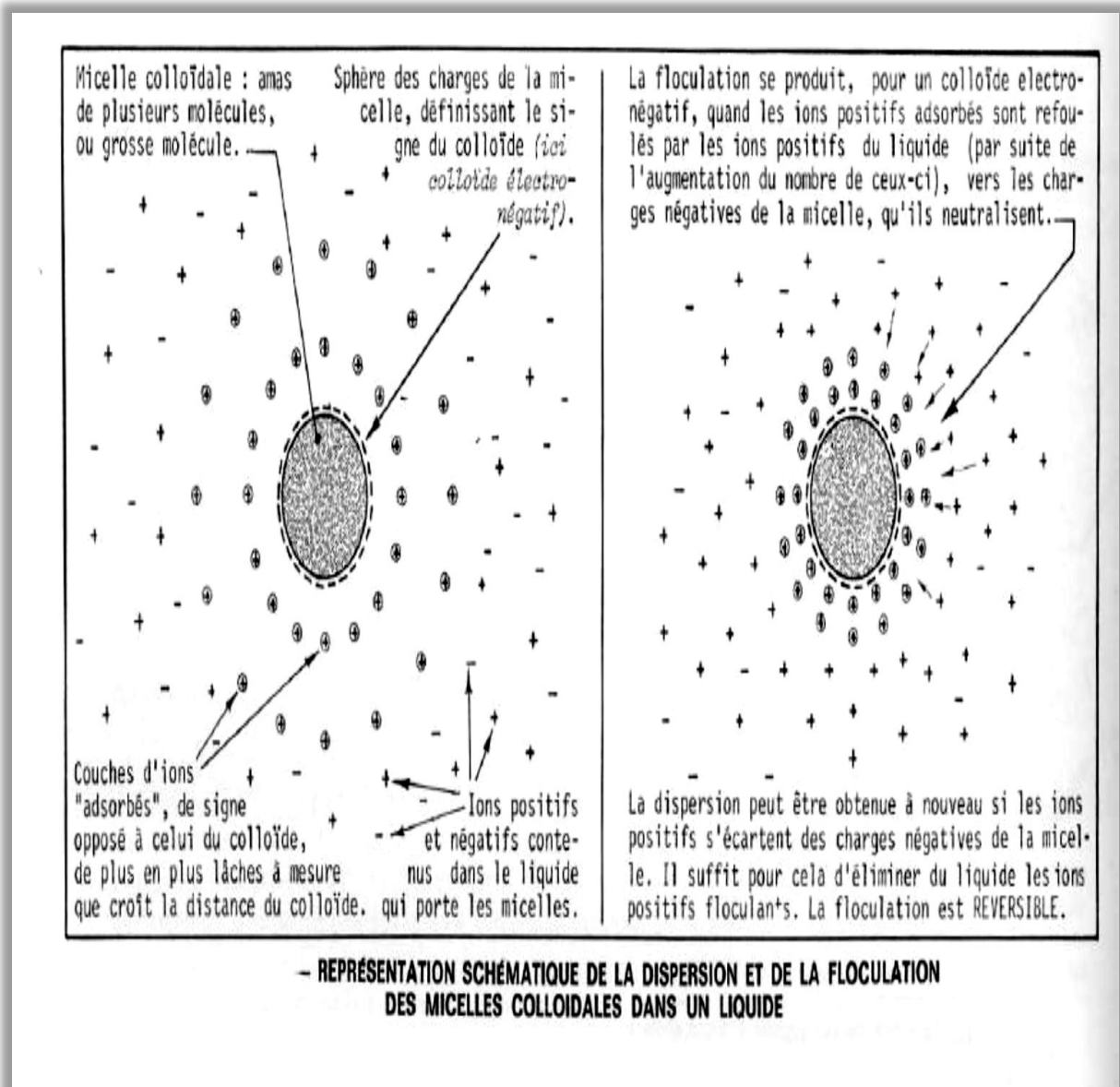


Figure 5. Floculation et dispersion des argiles (tiré de SOLTNER, 1992)

B) Propriétés de l'argile

L'argile est hydrophile, c'est-à-dire l'aptitude de fixer l'eau (entoure les micelles ou y pénètre). Cette aptitude entraîne trois autres propriétés de l'argile :

- la plasticité, aptitude à être modelée,
- l'adhésivité, faculté de coller,
- le gonflement et le retrait, aptitude de l'argile à changer de volume selon l'humidité par exemple : la montmorillonite.

L'argile, en tant que colloïde négatif, intervient dans la fertilité chimique du sol en fixant les cations tels que K, Mg, Ca,.... Signalons en outre, que l'argile peut également fixer des ions négatifs par l'intermédiaire des hydroxydes d'Al ou de Fe ou par l'intermédiaire des charges positives qu'elle porte.

L'argile peut être à l'état dispersé ou floculé :

- à l'état dispersé : l'argile dispersée perd son aptitude à souder solidement les agrégats car elle cherche à reformer avec l'eau un mélange homogène : sous l'effet des pluies, il y a dégradation de la structure qui devient compacte et asphyxiante pour les racines.
- à l'état floculé : l'argile forme des agrégats en soudant les différents éléments du sol. La structure de surface résiste à la dégradation par la pluie : le sol reste perméable à l'eau et à l'air, meuble, entretenant la vie des racines et de la microflore du sol.

3.4.2. La silice

L'altération des minéraux silicatés peut libérer de la silice colloïdale se présentant sous forme de gel. Sous cet état, la silice est un colloïde négatif.

3.4.3. Les sesquioxydes

Ce sont les oxydes et hydroxydes de fer et d'alumine. Au début de leur formation, ils sont amorphes, mais évoluent rapidement vers des formes cristallisées. Ils proviennent de l'altération des minéraux silicatés.

Ce sont des colloïdes positifs et jouent un rôle dans la capacité de fixation anionique du sol.

ii. Les constituants organiques

1. Généralités

La transformation par décomposition des débris organiques (d'origine végétale ou animale) abandonnés sur le sol ou enfouis dans le sol conduit à l'apparition de matières humiques.

L'ensemble de la matière organique des sols comporte donc :

- des produits frais ou peu évolués (peu transformés) : ce sont les matières organiques fraîches (M.O.F.).
- des produits évolués : ce sont les matières humiques (M.H.). Elles constituent l'humus au sens strict du terme.

L'ensemble (M.O.F. et M.H.) constitue l'humus au sens large (Mull, Moder, Mor).

L'humification est le terme servant à désigner la transformation de la M.O.F. en M.H. dans des conditions écologiques « normales », c'est-à-dire d'aération et de richesse chimique suffisante. En conditions anaérobies, il y a putréfaction ou tourbification.

La minéralisation concerne l'ultime phase de la transformation des substances organiques. Elle se traduit par la libération dans l'atmosphère et le sol de produits minéraux tels l'eau, le gaz carbonique, acide nitrique, ammoniac, sels minéraux solubles (K^+ ,...).

2. Les matières organiques génératrices d'humus

Les substances végétales interviennent pour la presque totalité (99 %) dans l'élaboration de l'humus.

La matière organique fraîche se compose :

- de sucres, d'amidons et d'autres hydrates de carbone solubles dans l'eau ;
- de cellulose, polysaccharide provenant de la condensation de molécules de glucose ;
- de lignines, qui sont des produits de condensation de polyphénols ; de tanins ;
- de graisses, de cires, d'huiles,...
- de protéines et dérivés ;
- de constituants minéraux (cendres) : P, S, K, Ca,...

Pour fixer les idées sur l'importance des quantités de matières organiques fraîches arrivant au sol en forêt, le tableau ci-dessous livre quelques chiffres intéressants :

Tableau 3. Quantités de matières végétales retournées au sol par quelques forêts

| Quantités de matières végétales retournées au sol (en tonnes/ha/ an de matières sèches) | |
|---|-------------|
| Forêts feuillue tempérée | 3-9 t/ha/an |
| Forêts résineuses tempérées | 3-6 t/ha/an |
| Forêt subtropicale | 20 t/ha/an |
| Forêt équatoriale | 25 t/ha/an |

3. Les agents de l'humification

La flore du sol (bactéries, champignons) et la pédofaune, fragmentent et transforment les résidus végétaux et animaux. Agents de l'humification, ils interviennent tour à tour dans un réseau trophique complexe et encore peu connu jusqu'à nos jours.

Tableau 4. La répartition des organismes édaphiques en nombre (Coyne M., 1999 in Calvet R, 2003.)

| Organismes Nombre par litre de sol | |
|---|------------------|
| Protozoaires | $1,0 \cdot 10^9$ |
| Nématodes | $3 \cdot 10^4$ |
| Acariens | $2,0 \cdot 10^3$ |
| Lombricides | 2 |
| Collemboles | $1,0 \cdot 10^3$ |
| Arthropodes (dont insectes), Myriapodes | 100 |

Les uns (lombrics, myriapodes) fragmentent les débris végétaux, lesquels sont ensuite transformés par les bactéries.

D'autres animaux (acariens, collemboles) ne fragmentent que les débris « prédigérés » par la microflore.

A. La microflore du sol

a) Les algues

Les algues autotrophes (possèdent de la chlorophylle) abondent surtout dans les deux premiers centimètres du sol. Certaines espèces sont cependant hétérotrophes et vivent dans des couches plus profondes, dégradant les matières organiques.

Les algues fabriquent un mucilage qui les entoure et qui héberge de nombreuses bactéries.

b) Les bactéries

Leur rôle est très important dans les processus d'humification. Du point de vue pédologique, une des principales distinctions à faire entre bactéries est leur répartition entre organismes aérobies et anaérobies.

Les bactéries aérobies interviennent de manière prépondérante dans l'humification proprement dite.

Les bactéries anaérobies interviennent surtout dans les processus de tourbification.

Les bactéries jouent un rôle important dans le cycle des éléments fondamentaux du sol : N, S, Fe, Mn.

c) Actinomycètes

Intermédiaires entre bactéries et champignons, les actinomycètes jouent un rôle important dans la décomposition des litières d'une part, dans l'humification d'autre part. Ils semblent jouer un grand rôle dans la transformation de certains composés organiques et minéraux du sol, mais ce rôle est encore mal connu : ils seraient susceptibles de décomposer les composés de la M.O.F. tels que la lignine et certains tannins, et d'élaborer certains acides humiques.

d) Champignons

Ils résistent mieux que les bactéries à la sécheresse et à l'acidité. Mais à la différence des bactéries, ils sont toujours hétérotrophes et aérobies; et ne prolifèrent pas dans les milieux mal aérés.

Leur rôle dans le sol est considérable et très varié : il exerce surtout dans la phase de décomposition de la M.O.F., qui précède l'humification : la plupart sont aptes à décomposer la cellulose, certains sont capables de décomposer des composés phénoliques plus résistants tels que la lignine et les tannins.

Certains champignons sont associés aux racines des plantes et des arbres, en formant des mycorhizes, à vie symbiotique, qui facilitent la croissance et la nutrition des espèces concernées.

B. La faune du sol

Elle est divisée suivant la taille des organismes, en micro-, méso- et macrofaune :

- Microfaune (moins de 0,2 mm) : constituée essentiellement de protozoaires et de nématodes : ils sont abondants dans les milieux très humides et s'attaquent à la flore bactérienne et aux actinomycètes.
- Mésofaune (0,2 mm à 2-4mm) : Acariens et Collemboles qui caractérisent surtout les milieux acides. On y trouve aussi des nématodes.
- Macrofaune (taille supérieure à 2-4 mm) : on y trouve :
 - les lombrics qui jouent un rôle essentiel dans la structuration des horizons A des mull actifs et peu acides.
 - les enchytraéides, qui caractérisent surtout les milieux acides.
 - les larves d'insectes (diptères, coléoptères) : plus abondants dans les milieux acides et secs (moder).
- Mégafaune : mammifères (taupes, mulots,...).

Le rôle des représentants les plus importants de la faune du sol :

a) Protozoaires

Ces organismes sont très nombreux dans le sol. Leur pullulation exige l'existence d'un haut degré d'humidité. Ils s'enkystent par sécheresse. Ils se nourrissent surtout de bactéries. A ce titre, ils jouent un rôle important dans la composition et les activités microbiologiques du sol.

b) Nématodes (Vers inférieurs, embranchement des Némathelminthes)

Ce sont des petits vers ronds de taille variant entre 0,5 et 2 mm. Ils sont nombreux dans le sol et dans les litières : après les protozoaires, ce sont les plus abondants colonisateurs du sol.

Ils s'enkystent dès que l'humidité du sol devient insuffisante. On distingue parmi les nématodes plusieurs espèces se différenciant par leur mode d'alimentation, on distingue en effet des espèces :

- parasites de végétaux (problèmes bien connus en agriculture et en horticulture) ;
- saprophages : interviennent dans la décomposition des débris végétaux et animaux ;
- prédateurs : se nourrissent de protozoaires ;
- bactériophages ;
- mycétophages : se nourrissent de mycéliums.

Les nématodes bactériophages et mycétophages exercent donc un certain contrôle sur la microflore.

c) Mollusques

Ils se trouvent toujours en milieu humide. Beaucoup sont herbivores ou saprophages. Ils exercent une certaine activité de décomposition (cellulose) et de brassage de la matière organique.

d) Les Annélides (embranchement)

Ce sont des agents très actifs d'humification, surtout en ce qui concerne certaines familles appartenant à la classe des Oligochètes.

- Les Enchytraéides : Ce sont des vers minuscules (de 5 à 15 mm), de couleur généralement blanchâtre et abondants dans les litières. Ils se nourrissent essentiellement de petits débris végétaux peu décomposés. Ces vers sont les principaux agents d'humification dans les milieux forestiers acides.

- Les Lombricidés: Ils réagissent rapidement aux modifications du milieu. Leur présence est donc un excellent reflet des conditions écologiques.

En effet, les conditions favorables à leur développement sont :

- une humidité modérée ;
- une bonne aération ;
- un PH voisin de 6-7.

e) Les Arthropodes

On regroupe ici les insectes, les arachnides, les crustacés (cloportes,...) et les myriapodes.

Ils peuvent être assez nombreux dans les sols. Ils vivent surtout dans les litières qu'ils fragmentent et ingèrent. Ils produisent des boulettes fécales.

Certaines espèces se nourrissent également de champignons (mycétophages), de bactéries et d'algues (microphytophages), de déjections animales (coprophages), de proies vivantes (prédatrices ou parasites).

Contrairement aux vers de terre, ils ne mélangent pas à la terre minérale les aliments qu'ils ingèrent. En revanche, ils fragmentent ceux-ci plus finement, augmentant ainsi la surface d'attaque pour l'action des champignons et bactéries.

f) Les Mammifères : taupes, mulots, etc. Ils ont un rôle mécanique.

4. Composition de l'humus

A) Les différentes fractions de l'humus

Une méthode permettant d'analyser la composition des substances organiques constituant l'humus, consiste à réaliser un fractionnement chimique par solubilisation différentielle dans des réactifs divers. Cette méthode est illustrée dans la figure 6.

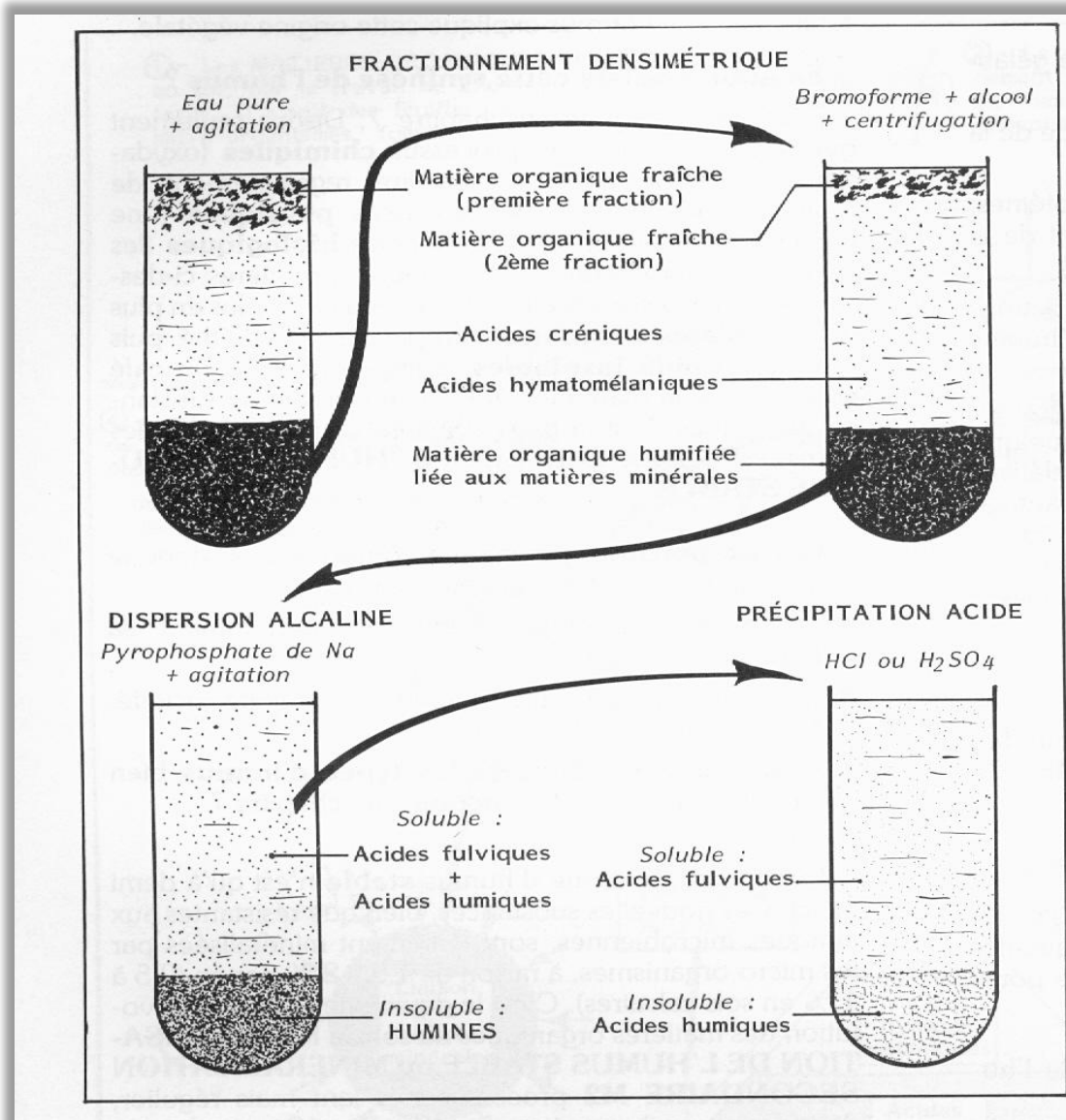


Figure 6. Les différents composés humiques : extractions par différence de densité et par solubilisation dans différents solvants (tiré de Soltner, 1992)

Par différence de densité, d'abord dans l'eau, puis dans un mélange alcool + bromoforme (densité 1,8), on sépare la matière organique fraîche de la matière humique.

Par une série de solvants, on isole ensuite les différentes fractions de l'humus :

- les acides créniques : solubles dans l'eau ;
- les acides hymatomélaniques : solubles dans l'alcool ;
- les acides fulviques : solubles dans le pyrophosphate de Na ainsi que dans les acides HCl ou H₂SO₄.
- les acides humiques : solubles dans le pyrophosphate de Na mais insolubles dans les acides HCl ou H₂SO₄.
- l'humine : insoluble dans tous les solvants.

Tous ces constituants humiques se distinguent par leur degré de polymérisation, c'est à dire la grosseur de leur molécule. Celle-ci augmente depuis les acides créniques vers les humines.

B) Evolution générale des matières organiques dans le sol : de la M.O.F. aux substances humiques

Nous avons vu précédemment que la matière organique fraîche est composée de diverses substances qui diffèrent par leur vitesse de décomposition :

Certaines, faciles à décomposer, serviront surtout d'aliments énergétiques et plastiques aux bactéries, et disparaîtront très vite : ce sont les sucres, la cellulose et les protéines.

D'autres au contraire seront attaquées plus lentement et moins complètement, laissant d'importants résidus : il s'agit de la lignine, des matières grasses, des résines, des tannins, etc.

Sitôt leur arrivée au sol, ces substances sont attaquées par des animaux (vers, insectes, protozoaires,...) et par la microflore qui leur font parcourir toute une série de décompositions et transformations successives.

La plus grande partie de la M.O.F. se décompose et se minéralise rapidement : c'est la minéralisation primaire qui donne des molécules simples : CO₂, eau, nitrates, phosphates, sulfates, etc.

Ces molécules simples peuvent ensuite prendre cinq destinations :

- perdues dans l'atmosphère ;
- absorbées par les plantes ;
- fixées par l'argile et l'humus (colloïdes négatifs) ;
- perdues par lessivage ;
- reprises par des micro-organismes.

Les constituants végétaux ne subissant pas la minéralisation primaire peuvent donner :

- des composés phénoliques solubles ;
- des résidus peu transformés (cas des constituants riches en lignine).

Ensuite, on arrive à l'étape de l'humification c'est-à-dire de l'élaboration des différentes matières humiques. Les matières premières de la synthèse de l'humus sont :

- des résidus de lignine plus ou moins transformée par oxydation ;
- des composés phénoliques solubles, issus de la décomposition de la lignine, de la cellulose et des sucres solubles ;
- des matières azotées (protéines, acides aminés, ammoniac) ;
- des éléments minéraux qui se lient aux molécules des constituants humiques.

Parmi les composés humiques formés lors de l'humification, on distingue plusieurs types d'humines :

- L'humine d'insolubilisation : elle se forme à partir de molécules semblables qui s'associent les unes aux autres. Ces unités de base, les composés phénoliques solubles ont la propriété:
 - de se souder les uns aux autres pour constituer un noyau de plus en plus gros ;
 - de fixer à la périphérie de ce noyau des chaînes carbonées allongées dites « chaînes aliphatiques ».

Ainsi on peut représenter sous forme d'une pyramide les composés humiques qui se forment des plus solubles, simples et à faible poids moléculaire (les acides créniques) au plus insolubles, complexes et à poids moléculaire élevé (humine).

L'humine qui se forme par polymérisation ou polycondensation est appelée humine d'insolubilisation.

- L'humine par héritage : l'humification par héritage consiste en une conservation intacte de molécules complexes de lignine peu ou pas transformées. Ces résidus donnent alors l'humine résiduelle ou héritée.
- L'humine microbienne : l'humification par néosynthèse microbienne, par laquelle certains microbes ont la faculté de synthétiser, à partir de molécules très simples libérées par la décomposition et la minéralisation des M.O.F., donne des substances complexes appelées « humines microbiennes ».

L'ensemble de ces trois humines (résiduelle, d'insolubilisation et de néosynthèse microbienne) forme la partie la plus insoluble et la plus stable de l'humus : l'humine et qui représente 50 à 70% de la matière organique totale.

Cependant, le terme d'humus stable n'est qu'à demi-exact. Ces nouvelles substances, bien que résistantes aux attaques microbiennes, sont lentement minéralisées par les micro-organismes à raison de 1,5 à 2 % par an (0,5 à 1 % en sol calcaire). Cette minéralisation de l'humus s'appelle la minéralisation secondaire, qui est un processus très lent mais régulier.

5. Etude comparative du fonctionnement des principales formes d'humus

A. Les tourbes

Une tourbe est le résultat de l'accumulation d'une grande quantité de matière organique très peu décomposée. En effet, en milieu asphyxiant, l'activité biologique est très réduite. La minéralisation primaire et la libération de composés phénoliques solubles restent donc très faibles et limitées à la surface du sol plus aérée ; tandis que s'accumule une grande quantité de matière organique peu décomposée, donc d'humine résiduelle.

B. Les humus de forme MOR / MODER

Ces humus se rencontrent :

- sous climat très humide;
- sous climat froid (alpin ou boréal par exemple) ;
- sur roches-mères sableuses, pauvres en bases et en fer (donc acides), pauvres en argile (donc incapables de former un complexe argilo-humique), et filtrantes (donc favorisant le lessivage) ;
- à partir de végétation acidifiante ou acidiphile.

Le MOR se caractérise par la superposition de la matière organique au-dessus de la matière minérale. Dans le cas du MODER, la décomposition est meilleure, et la matière organique est un peu plus mélangée à la matière minérale, sans pour autant être liée à celle-ci par des liaisons physico-chimiques.

C. L'humus de forme Mull

On qualifie de mull les humus formés en présence d'une activité biologique élevée. Mais c'est le seul caractère commun des mull, qui diffèrent selon leur degré d'évolution et la vitesse de leur minéralisation.

II. Facteurs édaphiques

1. Structure du sol

La structure est l'organisation du sol. Elle se définit également comme étant l'arrangement spatial des particules de sables, de limons et d'argiles. On distingue principalement trois types de structures :

- Particulaire : où les éléments du sol ne sont pas liés, le sol est très meuble (sols sableux).
- Massive : où les éléments du sol sont liés par des ciments (matière organique, calcaire) durcies en une masse très résistante discontinue ou continue (sols argileux). Ce type de sol est compact et peu poreux. Il empêche cependant, les migrations verticales des animaux sensibles à la température et à l'humidité et ainsi en interdire l'existence.
- Fragmentaire : où les éléments sont liés par des matières organiques et forment des agrégats (Assemblage hétérogène de substances ou d'éléments qui adhèrent solidement entre eux) de tailles plus ou moins importantes. Cette structure est la plus favorable à la vie des êtres vivants, car elle comporte une proportion suffisante de vides ou de pores qui favorisent la vie des racines et l'activité biologique en général, en permettant la circulation de l'air et de l'eau.

2. Texture du sol

La texture du sol est définie par la grosseur des particules qui le composent : graviers, sables, limons, argiles (granulométrie : mesure de la forme, de la dimension et de la répartition en différentes classes des grains et des particules de la matière divisée) (voir tableau 2).

En fonction de la proportion de ces différentes fractions granulométriques, on détermine les textures suivantes :

- Textures fines : comportent un taux élevé d'argile (>20%) et correspondent à des sols dits « lourds », difficiles à travailler, mais qui présentent un optimum de rétention d'eau.
- Textures sableuses ou grossières : elles caractérisent les sols légers manquant de cohésion et qui ont tendance à s'assécher saisonnièrement.

- Textures moyennes : on distingue deux types :
 - Les limons argilo-sableux qui ne contiennent pas plus de 30 à 35% de limons, qui ont une texture parfaitement équilibrée et qui correspondent aux meilleures terres dites « franches ».
 - Les sols à texture limoneuse, qui contiennent plus de 35% de limons, sont pauvres en humus (matière organique du sol provenant de la décomposition partielle des matières animales et végétales).

Sur le plan biologique, la texture intervient dans la répartition des animaux et des eaux souterraines. Nombreux organismes tels que les vers de terre préfèrent les sols limoneux ou argilo-sableux, tout comme quelques espèces de coléoptères qui préfèrent les sols argileux et/ou limoneux, présentant une teneur élevée en éléments fins et qui ont la faculté de retenir l'eau nécessaire, contrairement aux éléments grossiers qui permettent une dessiccation trop rapide du sol.

3. L'eau du sol

L'eau est présente dans le sol sous quatre états particuliers:

- L'eau hygroscopique : provient de l'humidité atmosphérique et forme une mince pellicule autour des particules du sol. Elle est retenue très énergiquement et ne peut être utilisée par les organismes vivants.
- L'eau capillaire non absorbable : occupe les pores d'un diamètre inférieur à 0,2mm. Elle est également retenue trop énergiquement pour être utilisée par les organismes vivants. Seuls certains organismes très adaptés peuvent l'utiliser.
- L'eau capillaire absorbable : située dans les pores dont les dimensions sont comprises entre 0,2 et 0,8mm. Elle est absorbée par les végétaux et elle permet l'activité des bactéries et des petits Protozoaires comme les flagellés.
- L'eau de gravité : occupe de façon temporaire les plus grands pores du sol. Cette eau s'écoule sous l'action de la pesanteur.

4. Le pH du sol

Le pH du sol est la résultante de l'ensemble de divers facteurs pédologiques. En effet, la solution du sol contient des ions H⁺ provenant de :

- L'altération de la roche mère
- L'humification de la matière organique (synthèse d'acide humique)
- L'activité biologique
- L'effet des engrais acidifiants

Le pH dépend également de la nature de la couverture végétale et des conditions climatiques (température et pluviosité) :

- Les pH basiques (supérieurs à 7,5) caractérisent les sols qui se développent sur une roche mère calcaire. On les rencontre généralement dans les climats secs ou saisonnièrement secs et sous une végétation présentant des feuilles à décomposition rapide.
- Les pH acides (entre 4 et 6,5) se rencontrent beaucoup plus sous les climats humides et froids favorables à une accumulation de la matière organique. Ils caractérisent les forêts de conifères. Ils se forment surtout sur les roches siliceuses et les roches granitiques.

Les organismes vivants tels que les Protozoaires supportent des variations de pH de 3,9 à 9,7 suivant les espèces : certaines sont plutôt acidophiles alors que d'autres sont basophiles. Les neutrophiles sont les plus représentées dans la nature.

5. La composition chimique

Les divers types de sols ont des compositions chimiques très variées. Les éléments les plus étudiés en ce qui concerne leur action sur la faune et la flore sont les chlorures et le calcium.

Les sols salés, ayant des teneurs importantes en chlorure de sodium, ont une flore et une faune très particulière. Les plantes des sols salés sont des halophytes.

En fonction de leurs préférences, les plantes sont classées en calcicoles (espèces capables de supporter des teneurs élevées en calcaire), et calcifuges (espèces qui ne supportent que de faibles traces de calcium). Quant aux animaux, le calcium est nécessaire pour beaucoup d'animaux du sol.

Les sols dits anormaux renferment de fortes concentrations d'éléments plus ou moins toxiques : soufre, magnésium...etc. Les métaux lourds exercent sur la végétation une action toxique qui entraîne la sélection d'espèces dites toxico-résistantes ou métallophytes formant des associations végétales particulières.