

2-Les constituants organiques :

De la litière à la matière organique humifiée, la mort des êtres vivants, leur déchets et sécrétions apportent au sol sa matière organique (matière organique fraîche). Cette matière organique va être semi a processus principaux qui assurant sa décomposition :

- La minéralisation : elle consiste a la libération des composées minéraux simples généralement solubles ou gazeuses (Cl^- , NH_3 , CO_2 , H_2NO^{-3} , PO_4^- etc), cette processus est appelée minéralisation primaire.
- L'humification : elle consiste à la libération des composées plus au moins complexes pour former l'humus qui a son tour subit une minéralisation secondaire pour donner les minéraux simples.

2-1.Matière organique fraîche (la litière) :

La première catégorie de matière organique, la litière au sens large est composée de l'ensemble des matières organiques d'origine biologique a différents stade de décomposition, qui représente une source d'énergie potentielle pour les espèces qui les consomment. Elle comprend les organismes et les parties d'entre eux qui vivent de mourir et qui en sont déchets, qu'ils soient végétaux, animaux ou microbiens, aérien ou souterrains ainsi que les excréments des animaux et différents composés émis directement dans le milieu.

❖ Aspect quantitative : la quantité de la litière aérienne est variable selon les formations végétales elles-mêmes dépendantes du climat (Tab.1).

Tab.1 : Chute annuelle et masse totale de litière aérienne de quelques formations végétales.

Végétations	Chute annuelle de litière aérienne T/ha/an	Masse totale sur la planète 10^9T
Forets tempérée caducifoliée	11.0	14.0
Savane	9.5	3.0
Semi désert	0.6 - 1.1	0.4
Forêt tropicale et équatoriale	20.0 - 40.0	7.2
Prairie tempérée	7.5	3.6
Culture agrosystème	0.3 - 2.0	1.4
Zone marécageuse	5.0 – 35.0	5.0

Dans certain cas pourtant, la litière d'origine animale peut être importante comme le montrent les exemples suivants :

- 1- dans une chênaie les crottes des chenilles du *Bombyx disparate* atteignent de 400 à 1000 Kg /ha en cas de prolifération.
- 2- Une vache de 500 Kg dépose chaque jour sur le sol de son pâturage environ 25 à 30 Kg de bouse.
- 3- Les éléphants du parc national du Tsavo au Kenya déposaient quelque 550 Kg (Pois sec) d'excréments par hectare et par année.

D'autre part la litière souterraine représente un apport très important de matière organique pour le sol qui généralement oublie. Ce type de litière issue de la mort des racines, d'après les scientifiques la production des racines peut représenter 85% de la production primaire nette totale et la perte annuelle en racine fines 92% de leur biomasse.

❖ Aspect qualitatif : la litière végétale présente deux caractères opposés : Elle peut être *améliorante* c'est-à-dire riche en azote et cellulose mais relativement pauvre en lignine, elle active les processus bactériens dans le sol notamment la disponibilité de l'azote pour les plantes. Ce type de litière riche en énergie facilement accessible est fournie par des arbres feuillus tel que le Frêne, l'Erable, l'orme ainsi que la majorité des plantes herbacées.

Comme elle peut être *acidifiante* pauvre en azote mais riche en lignine, elle inhibe l'activité bactérienne du sol. Les responsables sont des tanins des phénols toxiques ou des acides organiques qui sont libérés directement par la litière comme l'acide Salicylique soit issu de la transformation de la lignine. La litière de ce type à niveau énergétique faible provenant *des épicéas, des pins, des bruyères*ect.

2-2.les agents d'humification :

2-2-1.la microflore du sol :

- a) *Les bactéries* : sont des êtres unicellulaires qui s'adaptent au changement du milieu généralement préfèrent les sols riches en azote et peu acides, elles sont surtout abondantes au niveau des racines de certaines plantes la plus part entre elles sont hétérotrophes et saprophytes elles décomposent la cellulose pour obtenir les énergies. Leur biomasse est plus importante dans les sols riches en matière organique et peuvent atteindre 13 millions d'unités/ gramme. Parmi les bactéries du sol on peut citer :

Cours Ecopédologie

- Les azotobacters : bactéries fixatrice d'azote (N) atmosphérique.
- Les sulfobacters : elle réduit les sulfates
- Bactéries nitrifiants : transforme l'ion ammonium NH_4^+ en nitrite qui lui-même transformer en nitrate.
- Bactéries dénitrifiant : transforme les nitrate en azote gazeux.

b) **Les actinomycètes** : ce sont des êtres intermédiaires entre les bactéries et les champignons, hétérotrophes, leurs sources d'énergie sont surtout les hydrates de carbone qui se trouvent dans le sol (la cellulose et hémicellulose), ils sont capable aussi de transformés d'autre produits tel que la lignine et les protéines et de prélevés l'azote existant au niveau de la matière organique. Ils sont strictement aérobies et se trouvent surtout dans les sols sableux, ils préfèrent aussi les sols légèrement alcalin (PH = 7.8) et redoutent les sols acides.

Les actinomycètes représentent de 10 à 17% de la biomasse totale du sol, leur population peut être varié entre 10 à 30 million d'unités/gramme.

c) **Les champignons** : sont des êtres hétérotrophes, leurs proportions et très importantes dans les sols riches en matière organique généralement ils préfèrent les milieux aérées avec une certain humidité et chaleur. Ils peuvent transformer les hydrates de carbone tel que la cellulose, hémicellulose et la lignine en composés simples. Le genre le plus important est *penicillium* se trouve dans les zones tempérées et *l'Aspergillus* caractérisé les zones chaudes.

Les champignons peuvent également intervenir dans les phénomènes d'ectomycorhization ; c'est une relation entre un champignon et une plante supérieure (le champignon prélever les hydrates de carbone synthétisé par la plante et la plante bénéficie des éléments tel que l'azote (N) et phosphore (P) provenant de la décomposition de la matière organique par le champignon). La biomasse des champignons dans le sol est variés entre 1000 à 1500 Kg /ha

d) **Les algues** : dans le sol on trouve surtout les algues Cyanophycées et Chlorophycées, ces algues exigent une humidité et teneur en azote élevé. Ils jouent un rôle dans la pédogénèse de sol par l'altération des roches mère sur lesquelles ils se développent et enrichissent le sol par la matière organique. Dans le sol leur biomasse peut atteindre jusqu'à 140 Kg/ha.

2-2-2.la faune du sol :

Elle peut être subdivisée en trois groupes suivant la taille des organismes

- a) **La microfaune du sol** : constituer essentiellement par les protozoaires (les plus communes sont *Heteromita globosa*, *Colpoda cucullus* et *Hartmanella hyalina*.) et des nématodes, se trouvent particulièrement dans les sols très humides. Ce sont des consommateurs de la flore du sol tel que les bactéries, les actinomycètes et champignons ...etc .
- b) **La mésofaune du sol** : regroupe les êtres vivant ayant une taille de 100 µm à 1 cm et on trouve généralement les arthropodes inférieurs tels que les Acariens et Collemboles grouillent dans le sol. Il préfère surtout les milieux acides.
- c) **La macrofaune du sol** : regroupe les êtres ayant une taille supérieure de 1 cm comme le lombric, des larves d'insectes, des insectes qui habitent le sol toute leur vie comme les Fourmis ou certains Carabes, des Cloportes, des Myriapodes, des Limaces et Escargots, des Araignées et Opilions. ils jouent un rôle important dans la pédogénèse (structuration des horizons dans l'altération du sol et en plus leur rôle dans la décomposition des matières organiques).

2-3.transformation de la matière organique :

La matière organique est à 99% d'origine végétale et au même temps la composition des végétaux est variable d'une espèce à l'autre c'est pour ça on peut enregistrer :

- La cellulose avec un teneur de 20 à 50% de la matière organique sèche
- Le hémicelluloses avec un teneur de 10 à 20% de la matière organique sèche
- La lignine avec un teneur de 10 à 30% de la matière organique sèche
- Les protéines avec un teneur de 1 à 15% de la matière organique sèche
- Les cendres avec un teneur de 1 à 8% de la matière organique sèche
- Les tanins avec un teneur de 1 à 8% de la matière organique sèche

Ces composants vont se transformer pour donner la litière, cette transformation se fait en plusieurs étapes

2-3-1.les débris :

Matière organique d'origine végétales et animales vont subir un lessivage par les eaux de pluie et il va avoir l'élimination de toute les produits soluble tels que les sucres et les sels.

2-3-2.phase de dégradation physique :

C'est une étape ou il y a l'intervention la faune du sol et les **débris sont** fragmenté et mise en contact avec la matière minérale

2-3-2.la biodégradation :

Dans cette phase intervient la microflore du sol, elle est caractérisée par plusieurs processus suivant le composé qui va être dégradé :

a) **Décomposition des hydrates de carbone (Cellulolyse) :**

Au cours de son évolution la cellulose évolue en sucre simple (Hexose, Pentose ...etc). Cette évolution est généralement liée avec les conditions du milieu comme l'aération et le taux d'acidité.

Si le milieu est aéré il y a l'intervention de Myxobacter et la minéralisation de la cellulose le Glucose qui lui-même va être transformé en CO₂. Si le milieu est caractérisé par une forte acidité certains champignons participent dans la décomposition de la cellulose.

Au milieu non aéré la minéralisation de la cellulose se fait de bactéries de genre de Clostridium et il se forme l'acide Butyrique de CH₄ et CH₂ mais il n'y a pas de formation humique.

b) **Décomposition des composés aromatiques (Ligninolyse) :**

La lignine se décompose par l'intervention des champignons, dans ce processus les bactéries ne participent pas. En milieu aéré la lignine se décompose en acide et en phénol, tandis que dans le milieu non aéré la lignine n'évolue pas et nous donne la formation de la tourbe (matière organique non décomposée).

c) **Décomposition des composés azotés (Protéolyse) :**

Les protéines sont riches en carbone (presque contient 50% de carbone) et en azote (de 7 à 10%) et leur teneur est très importante dans les végétaux. La décomposition des protéines se fait par les bactéries aussi bien dans les milieux aérés que les milieux non aérés. Si le milieu est peu acide les protéines sont transformées en polypeptides puis en acides aminés et parfois il y a la formation d'amide tel que l'urée CO(NH₂)₂.

2-4.les facteurs interviennent dans l'évolution de la matière organique :

2-4-1.les facteurs extrinsèques :

- a) **Le climat :** en climat équatorial (constant durant toute l'année) l'évolution de la matière organique est rapide à cause de la température et l'humidité élevée mais quand s'éloigne de ces zones la décomposition de la matière organique est diminuée par le manque d'humidité et les basses températures

- b) **L'aération du sol** : évolution de la matière organique exige un certain degré d'aération pour le développement des agents d'humification par contre en absence d'oxygène la matière organique s'accumulée est n'évoluée pas.
- d) **Le PH du sol** : lorsque il y'a une forte acidité du sol il y'a un risque d'accentuation des activités de moisissure ceci est nuisible aux bactéries et la faune du sol. La forte acidité provoquée la formation d'humus acide et ce forme d'humus est favorable à l'agriculture surtout dans le cas où le sol riche par Ca^{+2} et Mg^{+2} .

2-4-2.les facteurs intrinsèques :

Les débris des végétaux sont riches en éléments nutritifs et surtout par Ca^{+2} mais cette richesse n'est pas importante lors que le sol est riche par cet élément. Les agents d'humification utilisent le Ca^{+2} proviennent de la décomposition de la matière organique, dans le cas de carence de cet élément dans le sol.

L'évolution de la matière organique est donc liée à la richesse du sol en certain élément nutritifs qui les agents d'humifications en besoins pour leurs développement. Pour connaitre le degré d'évolution de la matière organique dans le sol en déterminer souvent le rapport C/N :

- Ce rapport est élevé c'est-à-dire l'évolution de la matière organique est faible.
- Ce rapport est faible c'est-à-dire l'évolution de la matière organique est forte.

2-5.les propriétés générales d'humus:

2-5-1.Composition d'humus : il est constitué de deux parties

- Une partie constitue de la matière organique peu ou non évoluée elle représente 10 à 15% de la quantité totale d'humus dans le sol
- Une deuxième partie constitue de la matière organique évoluée à différentes stades qui représenté 85 à 90% d'humus dans le sol.

Pour déterminer la quantité d'humus au niveau du sol il ya deux méthodes :

- La première méthode pour la détermination de l'azote : c'est la méthode de Kjeldahl qui consiste à la transformation de l'azote organique N en azote ammoniacal NH_4^+ et par la distillation on déterminer le azote ammoniacal.

Le taux de M O ??

$$\begin{array}{l} \text{Dans 100 g de matière organique} \longrightarrow 4.16\text{g de N} \\ \text{X g de matière organique} \longrightarrow 1\text{g de N} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Dans 100 g de matière organique} \\ \text{X g de matière organique} \end{array}} \right\} X = 100 \times 1 / 4.16 = 24\text{g}$$

Cours Ecopédologie

1 g de N \longrightarrow 24 g de matière organique

Le taux de matière organique M O dans le sol = taux d'azote N x 24

- La deuxième méthode est basée sur la détermination du taux de carbone C : c'est la méthode de Anne, elle consiste à l'oxydation de la matière organique (M O) par Bichromate de potassium $K_2Cr_2O_3$

Le taux de M O ??

Dans 100 g de matière organique \longrightarrow 58g de C
Y g de matière organique \longrightarrow 1g de C

} $Y = 100 \times 1/58 = 1.72g$

1 g de C \longrightarrow 1.72 g de matière organique

Le taux de matière organique M O dans le sol = taux du carbone C x 1.72

2-5-2. les fractions d'humus :

a) ***Les acides fulviques*** : ils comportent des longues chaînes latérales attachées à un noyau aromatique de petite taille (Fig.6). Ils peuvent être extraits par des sels de sodium (pyrophosphate de sodium) et le NaOH, ce sont des acides peu polymérisés et constituent des polysaccharides et des acides aminés et de certains tanins, ils sont une origine double peuvent solubiliser par les eaux de pluie avant la décomposition de la matière organique comme ils peuvent provenir de l'activité des microorganismes sur la matière organique. Les acides fulviques existent en grande quantité dans les sols défavorables à l'agriculture (les sols caractérisés par une forte acidité).

b) ***Les acides humiques*** : ce sont des composés plus polymérisés que les acides fulviques, ils sont extractibles également par NaOH et par les sels de sodium. Les acides humiques sont des acides qui possèdent un noyau cyclique relativement dense et sur laquelle se greffent des chaînes latérales courtes des polysaccharides et des acides aminés (Fig.6). On distingue deux types d'acide humique

- ***Les acides humiques gris*** : ils sont caractérisés par un noyau dense et peu de chaînes latérales, ils sont extractibles par les sels de sodium seulement et ils correspondent souvent aux composés d'humus liés au Ca^{+2} , Fe^{+2} et Al^{+3}
- ***Les acides humiques bruns*** : ils sont caractérisés par un noyau moins dense et sur laquelle se greffent un nombre important de chaînes latérales, ces acides sont des composés peu stables et facilement minéralisables.

D'après Stevenson, 1994 la formule chimique moyenne pour les acides humiques $C_{10}H_{12}O_5N$ et pour les acides fulviques $C_{12}H_{12}O_9N$ (Fig.07).

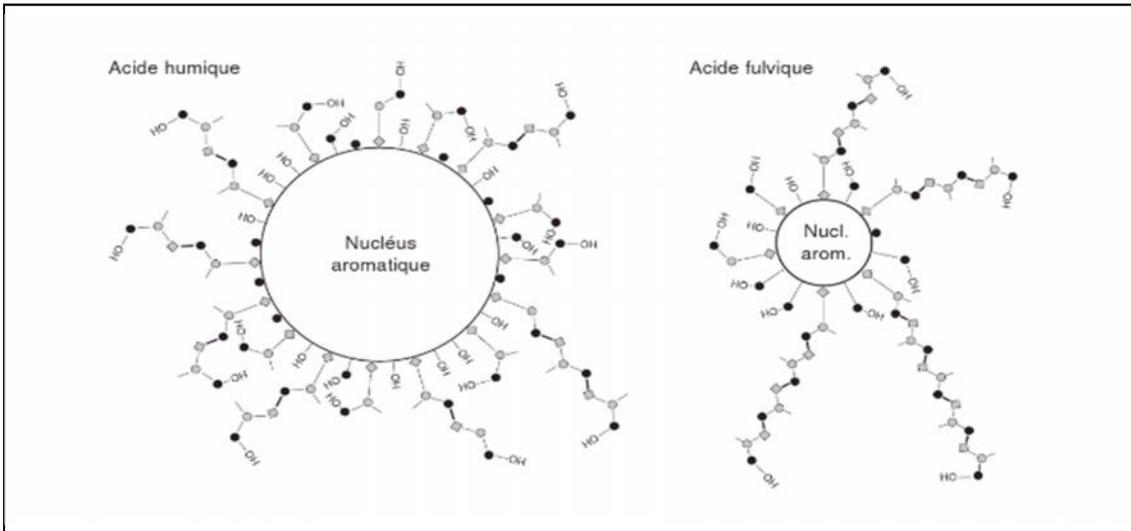


Figure 06: Structure générale d'acide fulvique et d'acide humique (Gobat et al 2010)

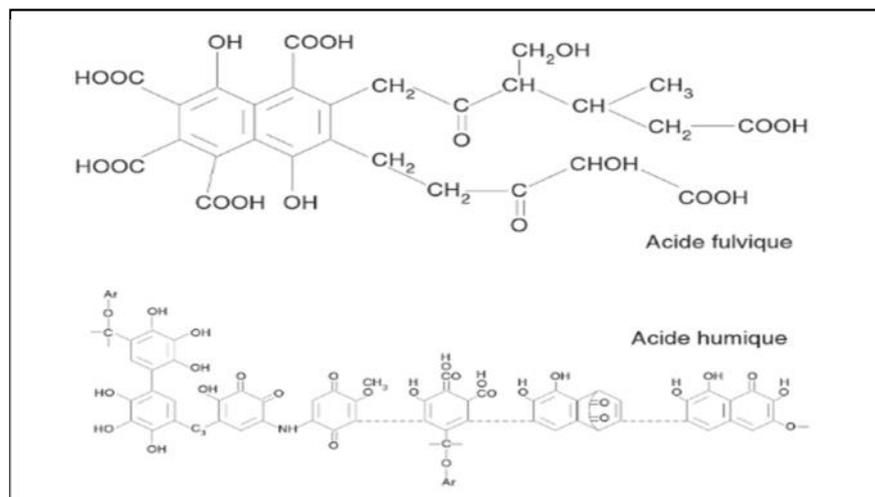


Figure 07: Structure moléculaire d'acide fulvique et d'acide humique (Gobat et al 2010)

Les acides humines : ce sont des composés très complexes très polymérisés et contrairement aux deux premières fractions (acide fulvique et acide humique) les acides humines ne sont pas extractibles par les sels de sodium et ceci pour deux raisons : ils contiennent des noyaux très denses et une forte liaison avec les minéraux.

D'une manière générale ces constituants humiques se distinguent par leur degré de polymérisation c'est-à-dire la grosseur de leur molécule celle-ci augmente de puis les acides créniques vers les acides humines(Fig.08)

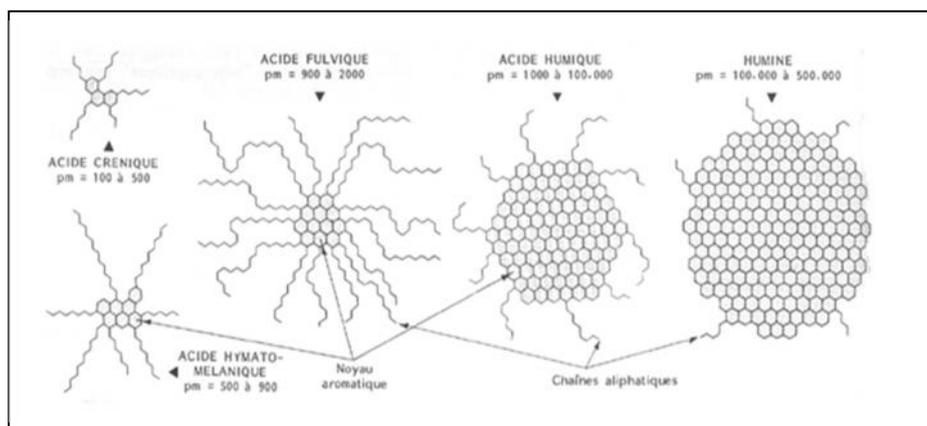


Figure 08 : Les composés humiques (tires de Soltner,1992).

2-5-3. les formes d'humus :

Il y a huit grandes catégories d'humus, pourtant assez ancienne la différenciation de huit formes d'humus réparties en deux groupes principales (trois aères et cinq hydro morphes) sa valeur explicative car elle reflète bien les effets inter dépendants de l'activité biologique générale et degré hydromorphie (Tab 2).

Le rapport C/N est un bon critère de caractérisation de trois formes d'humus aères, la valeur de ce rapport qui est de 8 à 15 dans *les mulls* et de 15 à 25 dans *les moder* et supérieur à 25 dans *les mors*. Ces valeurs sont indicatives et peuvent différencie au sein du même sol, entre deux horizons humifères.

Tab.2 : principales catégories des formes d'humus des régions tempérées

Nomenclature			
Milieu aéré	Mull	Moder	Mor
Milieu humide, frange d'ascensions capillaire d'une nappe	Hydromull	Hydromoder	Hydromor
Milieu temporairement saturé d'eau	N'existe pas	Anmoor	Hydromor
Milieu saturé d'eau permanence	N'existe pas	N'existe pas	Histosol (Tourbe)
Principales caractéristiques			
Activités biologiques générale (efficacité de transformation)	Forte	Moyenne	Faible
Complexe argilo-humique	Développé et stable	Peu développé souvent instable	Très peu développé ou absent
Type d'horizon A (en milieu aéré)	A Biomarcostructuré ou l'insolubilisation grumeleux a micro-grumeleux	A de juxtapositions massif ou particulières	A de juxtapositions très peu épais ou absent
Rapport C/N	8 à 15	15 à 25	25

Cours Ecopédologie

Notons que la classification allemande des sols (Mukenshan 1985) propose trois groupes de formes d'humus selon le degré d'hydromorphie, là où les classifications françaises n'en présentent que deux :

- Les formes terrestres : mull, moder et mor
- Les formes semi terrestres : les hydromull, hydromoder, hydromor, anomoor et tourbe des marais de transition et des hauts marais (histosols)
- Les formes subaquatiques : tourbes de bas marais *sapropèle* (couche humique noire des zones submergées réduites, pauvre en organisme pluricellulaires), *gyttja* (couche humique gris à noire des zones submergées oxygénées, riche en restes végétaux et en organismes) et *dy* (dépôts tourbeux bruns des eaux acides et pauvres en organismes)

2-6. les fonctions d'humus :

2-6-1.les rôles physique d'humus dans le sol :

-le pourcentage élevé d'humus se traduit par un changement de la couleur de sol cette variation intervient au niveau calorifique (énergie) du sol (capacité d'interception de la lumière).

-l'humus joue un rôle dans la structure du sol son pouvoir sur la cohésion des particules du sol et entre dans la formation du complexe argilo-humique, aussi on dit souvent que l'humus donne des corps au sol légère et léger les terre lourds.

-l'humus entraîne une variation de la mouillabilité (capacité de rétention de l'eau) un sol riche en humus retient plus d'eau.

2-6-2.les rôles chimiques d'humus dans le sol : il influe sur les propriétés chimiques du sol

-les colloïdes organiques sont chargés négativement et ont la capacité d'augmenter la rétention du sol en particules cationiques (CEC). La CEC de la matière organique est très élevée par rapport aux constituants minéraux du sol, elle varie entre 200 et 600 meq/100g.

- la matière organique est une source d'éléments nutritifs libérables à long terme.

-influence d'humus sur la propriété physiologique des végétaux :

- L'humus a une action stimulatrice sur la formation et la croissance des racines et forme pour les végétaux des substances de croissance.

Cours Ecopédologie

- L'humus joue un rôle dans les métabolismes des glucides, protéines et lipides chez les végétaux. Il entraîne une accélération des processus respiratoires chez les plantes dans le sol.

3-Les complexes colloïdaux :

Les plantes absorbent les éléments minéraux sous forme d'ions à partir de la solution du sol qu'ils soient libres ou piégés dans des complexes organiques ou des colloïdes.

3-1.Définition :

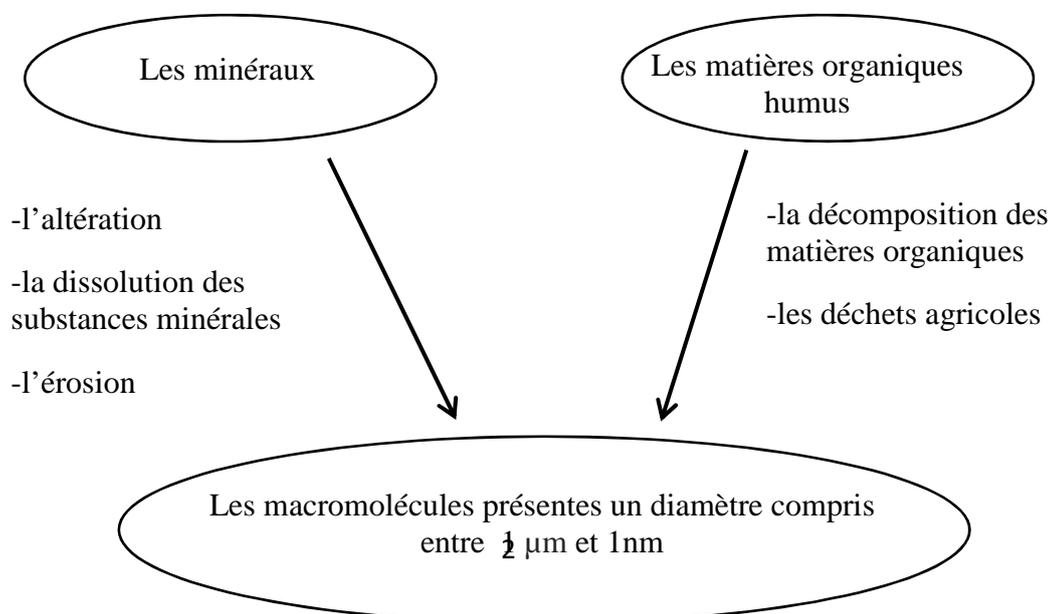
« Les colloïdes viennent de grec *Kolla* (colle) et *Oeid* (semi) c'est la suspension d'une ou plusieurs substances peuvent être dispersés ou floculés et les colloïdes des sols possèdent des charges électriques dites superficielles car localisées en surface des particules ».

« Un colloïde est une entité qui a au moins dans une direction une dimension comprise entre 1 nm et 1 µm cette entité peut être un solide ou un liquide ou un gaz et elle dispersée dans un milieu liquide ou un gazeux et l'on parle de dispersion colloïdale ».

3-2.la formation des colloïdes :

Les colloïdes sont des macromolécules organiques ou minérales qui placés dans l'eau ne forment pas une solution mais forment une suspension colloïdale.

La formation de cette pseudo solution s'explique par le fait que la taille de ces macromolécules est plus grande que celles des vides offerts dans le maillage des molécules d'eau, vides qui accueillent les petites molécules dont on dit qu'elles sont dissoutes dès lors qu'elles sont *cachées* dans ce maillage. Comme nous montre le schéma suivant les colloïdes leur origine soit minérale ou organique



Dans la nature les colloïdes peuvent être soit électro-négatifs (argiles, humus, complexe de fer-silice) soit électro-positifs (oxydes de fer, oxydes d'alumine).

Théorie de Helmoz – anatomie de la micelle :

Pour comprendre le comportement d'un colloïde vis-à-vis des charges électriques, il est utile d'en comprendre la composition. Les particules colloïdales, considérées à l'état élémentaire portent le nom de micelle.

Les micelles sont un amas de plusieurs (grosses) molécules comprenant au centre un noyau compacté et vers l'extérieur deux couches de charges électriques. Le noyau conditionne les propriétés générales de la micelle : il est entouré par une première couche dense et rigide de charges électriques de même signe, les charges électriques de cette première couche sont entourées par un nuage de charge de signe contraire.

Lorsque le nuage de charges positives autour d'une micelle électro-négative est très lâché, souvent parce que les charges positives sont en petite quantité, les micelles de même signe se repoussent mutuellement, ne peuvent se déposer et occupent tout le volume du liquide. On dit que les colloïdes sont dans l'état dispersé.

Si le nuage de charge positive est dense autour des colloïdes soit parce que la richesse en cations du sol permet cette densité du nuage dans la solution du sol, les micelles ne peuvent plus se repousser. La neutralisation des charges négatives par les charges positives permet de surcroît aux colloïdes de s'agglomérer et former l'état floculé (Fig 09).

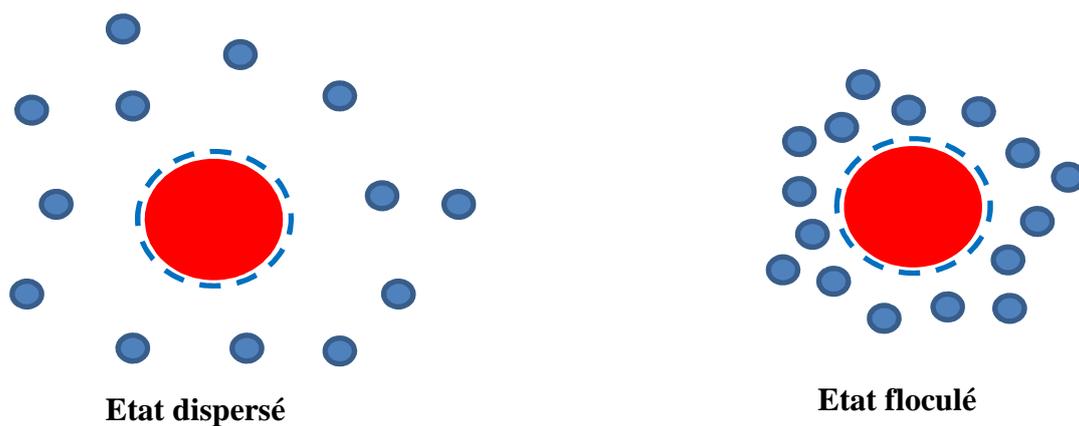


Figure 09 : l'état dispersé et l'état floculé des colloïdes

- Etat dispersé : le nuage de cation est lâché autour de micelle.
- Etat floculé : le nuage de cation est resserré autour de micelle.

Les micelles colloïdales et les cations métalliques n'ont pas tous la même capacité à flocculer. Un des facteurs importants à prendre en considération c'est le degré d'hydratation aussi bien des micelles que des cations.

Les argiles peu hydratées sont toujours plus faciles à flocculer que les humus très hydratés, de la même façon les cations Ca^{+2} ou Mg^{+2} faiblement hydratés ont un pouvoir de floculation plus important que les ions Na^+ ou K^+ d'avantage hydratés.

La charge et la taille des cations jouent un rôle fondamental, les cations les plus gros et les plus chargés (ex : Fe^{+3} ou Al^{+3}) flocculent mieux les colloïdes que les ions de petite taille et peu chargés ex : H^+ .

3-3. l'agrégation des colloïdes :

L'agrégation est le phénomène qui conduit à l'assemblage des particules colloïdales selon la terminologie utilisée par Stumm et Morgan 1981 on distingue :

- 1) l'agrégation due aux électrolytes appelée *coagulation*.
- 2) l'agrégation due aux polymères appelée *floculation*.

3-3-1. les forces inter particulières :

L'évolution des colloïdes vers un état dispersé ou au contraire vers un état flocculé a une forte influence sur l'évolution, de la stabilité, de la structure et sur le transport particulaire de matière. Cette évolution est orientée par différentes forces qui agissent entre les particules.

- 1) La force due au champ de gravité qui provoque la sédimentation des particules.
- 2) Les forces inter particulières : les forces de Van der waals à l'origine d'une attraction et les forces électrostatiques responsables soit aussi d'une attraction soit d'une répulsion.

3-4. les types des colloïdes :

Il y a deux types des colloïdes

-Les colloïdes hydrophiles : ces colloïdes sont responsables de la coloration des eaux et sont en générale de nature organique présentant des groupes de type R-NH_2 , R-OH entre autre ces groupements électro-négatifs vont créer des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau.

Cours Ecopédologie

-les colloïdes hydrophobes : ils sont en générale de nature minérale, leurs surfaces sont constituées de charge qui engendre une répulsion mutuelle rendant impossible tout agglomération.

3-5. Les rôles des colloïdes dans le sol :

- 1) La structure du sol résisté aux effets dégradants de la pluie aux colloïdes argileux qui ne se mélangent pas avec l'eau.
- 2) Les éléments sableux sont en rôles d'une sorte de pate (colle) qui les réuni le sol est donc solide grâce aux colloïdes.
- 3) L'humus est un colloïde protecteur qui protège l'argile quand il y a trop humidité.
- 4) L'argile protège l'humus de sa destruction par les microorganismes à l'aide de la matière colloïdale.

L'organisation morphologique des sols

1. les étapes de la formation d'un sol : il y a quatre stades

Stade N01 : stades d'altération de la roche mère, désagréments sous l'effet des facteurs climatiques par exemple l'eau de pluie acide attaque le calcaire (constituant principale de la roche mère) et former des creux.

Stade N02 : début de la pédogénèse, caractérisé par deux types de désagréments

-*désagréments physique* : par l'effet des racines des plantes et les facteurs climatiques.

-*désagréments chimique* : les plantes excréant au niveau de leurs racines des acides, les larves qui se développent excréant des substances, plus les cadavres des insectes constituant une source des éléments chimiques qui se trouvent au niveau des creux.

Stade N03 : stade de formation des horizons apport de matière organique au niveau de la roche mère en désagréments (chute des feuilles , cadavres des insectes), et par l'activité des micro-organismes et la faune de sol résulte le mouvement des matières organiques dans le sol en formation et à la fin nous donné la formation des horizons.

Stade N04 : formation d'un sol développé, la désagrégation physique et chimique de la roche mère s'accroît, il y a des mouvements des matériaux et déposition des éléments et formation de différentes couches au niveau du sol

Classement des particules :

La *granulométrie*, ou *texture*, correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur (le *diamètre* - *d* - des particules étant supposées sphériques), indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux.

1.2.1 Tri des matériaux grossiers

Les matériaux grossiers sont des constituants, le plus souvent inorganiques, constitués par des fragments de roches contenant un ou plusieurs minéraux et dont la plus grande dimension **est supérieure à 2 mm**. Ils sont triés par l'utilisation d'une passoire dont les trous ont un diamètre de 2 mm.

Tableau 3 Catégories d'éléments grossiers (norme AFNOR X 31-003, 1998)

Dénomination	Dimension
graviers	0,2 à 2,0 cm
cailloux	2,0 à 7,5 cm
pierres	7,5 à 12 cm
grosses pierres	12 à 25 cm
blocs	> 25 cm

Tri des matériaux de la terre fine

Les matériaux qui ne sont pas retenus par la passoire à 2 mm correspondent à ce qui est appelé «la terre fine».

Pour déterminer les différentes classes de particules minérales selon leur taille, on utilise l'échelle d'ATTERBERG qui donne 5 classes de particules :

Tableau 4 Catégories d'éléments de la terre fine « l'échelle d'ATTERBERG »

Dénomination	Dimension
1- Sables grossiers	200 μm à 2mm.
2- Sables fins	50 à 200 μm ,
3- Limons grossiers	20 à 50 μm ,
4- Limons fins	2 à 20 μm
5- Argiles	>2 μm ,

La texture du sol : la texture du sol se diffère en particulier par son comportement vis-à-vis l'humidité, sa réaction au climat, sa capacité de stockage de l'eau et sa capacité de rétention des éléments.

Lorsque le pourcentage de sable, de limon et d'argile sont déterminés on peut identifier le sol c'est à dire déterminer son type à l'aide de triangle de texture (Triangle de Jamagne)

Analyse granulométrique

Elle est pratiquée sur la terre fine (obtenue par tamisage au tamis à mailles 2 mm). Après destruction de la matière organique par un oxydant énergétique (l'eau oxygénée), les particules minérales sont dispersées à l'aide d'un dispersant alcalin (hexamétophosphate de sodium); une agitation mécanique est nécessaire pour assurer une bonne séparation, les particules grossières (d supérieur à 50 μm) sont séparées par tamisage; les particules moyennes et fines sont obtenues par la mesure de la vitesse de sédimentation : par exemple, fraction fine (d inférieur à 2 μm) 8 heures sur 10 cm, à 20 °C.

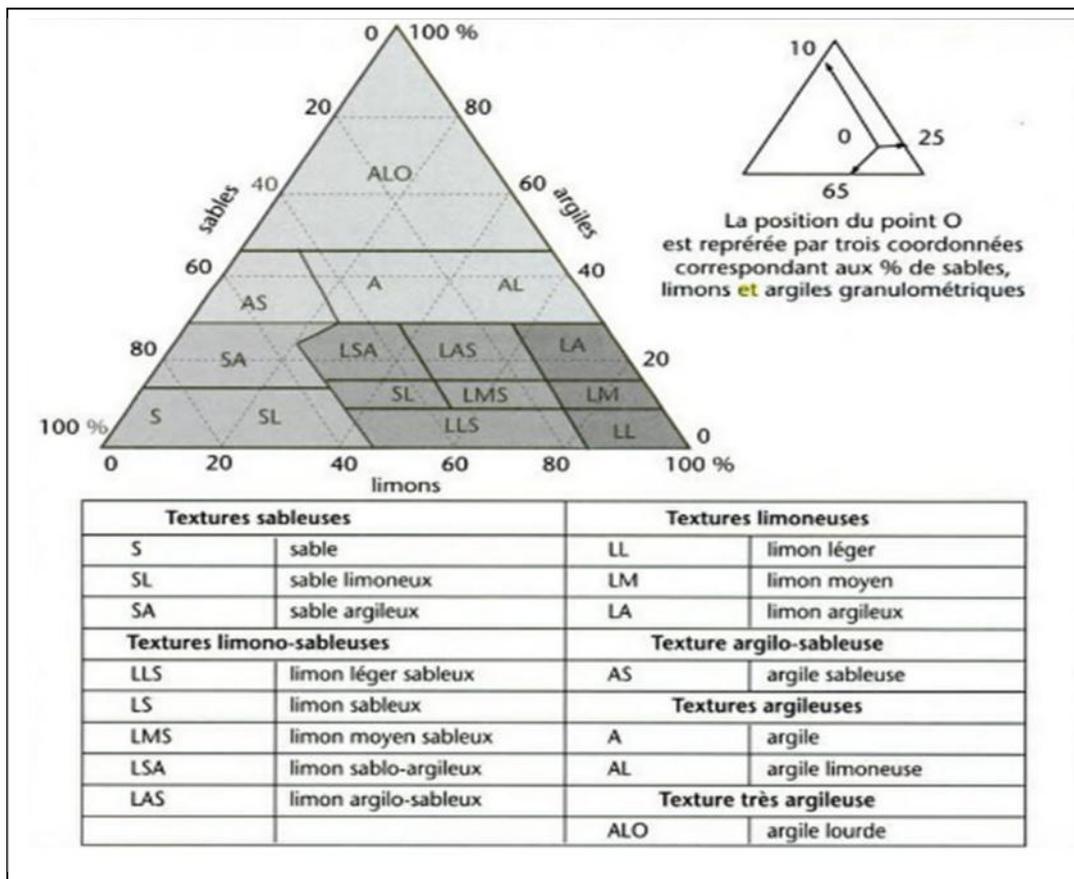
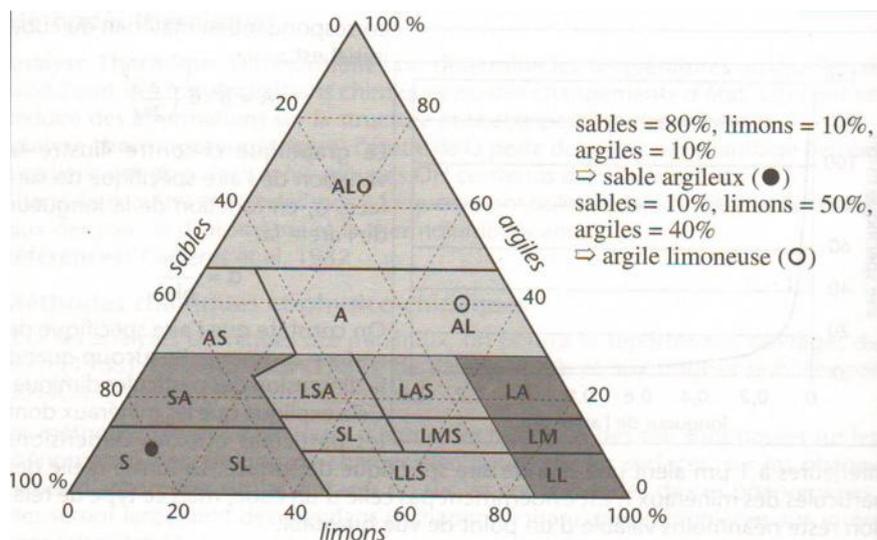


Figure 10 : Triangle des textures d'après M. Jamagne,

Exemple :



Chaque échantillon y est situé en fonction de sa teneur pondérale en sables, limons et argiles, la somme des trois étant ramenée à 100%.

Cours Ecopédologie

Pour chaque pourcentage d'argiles, limons, et de sable, **tracer une parallèle à l'axe suivant ; selon les aiguilles d'une montre**. L'intersection des trois droites désigne la texture du sol de l'échantillon.

Propriétés des particules minérales du sol :

Pour comprendre les propriétés des particules minérale on a l'exemple suivant.

Pour un cube de 1 cm de côté, sa surface spécifique est égale 6 cm^2 , si ce cube est subdivisé en petite cube de 1mm de côté sa surface spécifique (la surface totale de tous les cubes de 1mm) devient 60 cm^2 si on subdivisé en des cubes de $1 \mu\text{m}$ de côté sa surface spécifique (la surface totale de tous les cubes de $1 \mu\text{m}$) devient 6 m^2

On remarque que *plus la particule est fragmenté fine plus sa surface spécifique est importante.*

Les argiles qui sont les particules les plus petit ont la surface spécifique la plus élevée et représentent les particules les plus actives

- La surface spécifique de un gramme de **sable** = $44,6 \text{ cm}^2$
- La surface spécifique de un gramme de **limon** = 445 cm^2
- La surface spécifique de un gramme d'**argile** = 2200000 cm^2

Pour la capacité de rétention

- un gramme de **sable** peut retenir 5meq g d'ions (milli équivalent gramme)
- un gramme de **limon** peut retenir 15 meq g d'ions
- un gramme d'**argile** peut retenir 150 meq g d'ions

Exemple : calculer la capacité de rétention

On a $1 \text{ eqg} = \text{ions gramme} / \text{valence} = \text{la masse} / \text{valence}$

$1 \text{ meqg} = \text{la masse} / 1000 \times \text{valence}$

$1 \text{ meqg de Ca}^{+2} = 40\text{g} / 1000 \times 2 = 40 \times 1000 / 1000 \times 2 = 20 \text{ mg}$

Donc

Un gramme d'**argile** $\longrightarrow 150 \text{ meq g d'ions} = 150 \times 20\text{mg} = 3000\text{mg} = 3\text{g}$

Un gramme de **limon** $\longrightarrow 15 \text{ meq g d'ions} = 15 \times 20\text{mg} = 300\text{mg} = 0,3\text{g}$

Un gramme de **sable** $\longrightarrow 5 \text{ meq g d'ions} = 5 \times 20\text{mg} = 100\text{mg} = 0,1\text{g}$

Il y a une relation proportionnelle entre la finesse de particule et leur capacité de rétention des éléments.

Propriétés des sols dans différentes texturées :

La texture sableuse : on dit qu' un texture sableuse s'il contient au moins 60% -65% de sable et au moins de 15 % argile, les sols caractérisé par cet texture sont appelés les terres légères, ils ont une faible cohésion et bien aérés sensibles à l'érosion éolienne (le vent) et hydrique, ils sont caractérisé par une forte infiltration (a cause de leurs macro porosité importantes) et pauvre en réserve d'eau et des éléments nutritifs.

La texture argileuse : on parle de la texture argileuse lorsque il y a au moins 40% - 45% d'argile, les sols argileuse sont caractérisé par :

- une faible infiltration à cause de leur micro porosités
- une forte cohésion, ils sont appelés des terres lourds
- Ils sont riches en éléments nutritifs
- Ils sont riches mais aères et possède une mauvaise propriété physique (ces sol sont difficiles a travaillé en période humide à cause de leur plasticité et en période sèche à cause de leur compacité.

La texture limoneuse : ce sont des sols qu'au moins 30% de limon et moins de 20% d'argile, ce sont des sols très riches en éléments nutritifs mais ils sont défavorable a l'agriculture à cause de leur faible cohésion et leur faible porosités (les particules de limon colmatent les vides).

La texture équilibrée : il correspond a l'optimum dans la mesure ou il présente la plupart des quantités des trois types de textures sans avoir les défauts. Si le sol ayant le complexe de granulométrie favorable à l'agriculture (20- 35%) d'argile , (30-35%) limon et (40-45%) sable.

2 L'horizon et le profil pédologique :

Lorsque l'on creuse un fossé afin d'observer le sol en coupe verticale on remarque que la terre n'est pas homogène parallèlement à la surface, elle est divisée en couches ou strates de différentes épaisseurs appelées **Horizons** généralement

Cours Ecopédologie

caractérisées par leurs couleurs et leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Fig.11)

L'ensemble des couches ou les horizons observés dans cette tranche verticale est appelé **un profil** ou *solum* il varie de quelques centimètres (lithosols = sol peu évolués, sol très mince) à plusieurs mètres (vieilles couvertures pédologiques).

Horizon pédologique : couche grossièrement parallèle à la surface du sol dont l'existence est reconnue par l'observateur (ce dernier, décrit sur le terrain et éventuellement analysé en laboratoire et ensuite comparé à des horizons de références et rattaché à celui dont les critères correspondent le mieux).

Horizon de références ou *horizon de diagnostique* : horizon d'interprétation présentent un ensemble de propriétés quantitativement définies. Généralement chaque horizon de référence reflète un ou plusieurs processus fondamentaux.



Figure 11 : des tranchées verticales dans le sol

Principaux horizons de référence :

Généralement les horizons sont symbolisés par une lettre majuscule et dans des cas exceptionnels cette lettre majuscule reflétant leur caractère essentiel (Tab.04). Ils peuvent être subdivisés en sous horizons par deuxième, voire une troisième lettre majuscule ou minuscule ou par un chiffre qui signalent des propriétés plus subtiles

Cours Ecopédologie

Tableau Codification des horizons principaux dans le système traditionnel (TRAD) et celui du Référentiel Pédologique (RP).

TRAD	RP	Signification
L (ou A ₀₀), F et H (ou A ₀)	O _L , O _F , O _H	Horizons très organiques des milieux forestiers drainés (avec L pour Litière, F pour couche en Fermentation, H pour couche en voie d'Humification); pour les Américains, tout cela correspond à un horizon Folique (avec feuilles).
–	H	Horizons très organiques des milieux humides (Cf. horizons Histiques – voir Histosols).
A	A	Horizon organo-minéral de surface avec organismes vivants et/ou traces d'activité biologique.
A2	E	Horizon presque exclusivement minéral, appauvri en fer, matière organique, ou argile et souvent blanchi (E pour « éluvial »).
(B)	S	Horizon minéral représentant un stade d'altération limité par rapport à la roche mère dont certains caractères sont encore visibles (pendage, minéraux...); les marques d'évolution sont: une couleur spécifique (expression du fer) et/ou une structure d'origine pédologique et non pas géologique (prismes, polyèdres...).
B	B	Horizon où se concentrent certains éléments tels que fer, argile, humus, sels ou carbonates secondaires mais où les carbonates primaires ont disparu.
C	C	Horizon de la base du sol; il est déjà soumis à l'influence des agents atmosphériques; il présente une fissuration liée à des alternances de dessiccations – humectations et une oxydation partielle ou légère liée à la pénétration de l'oxygène. En revanche, sauf mention explicite contraire (ex: C _{ca}), il est dépourvu des accumulations observées typiquement en B.
–	D	Matériel parental transformé mais qui ne présente pas les traces de météorisation intervenant dans le C; par exemple: arène granitique, éboulis calcaire, moraine (voir altérites, chap. 2).
R	R	Correspond à la roche dure non altérée et non fragmentée; elle est appelée « roche mère » quand elle est à l'origine du sol qui la surmonte.
(g)	Go	Présente des traces d'oxydation et de réduction du fer (hydromorphie) dans un contexte où les phénomènes de réduction ne sont pas dominants (Go = gley oxydé).
(G)	Gr	Phénomènes de réduction affirmés; G = gley et Gr = Gley réduit; taches grises, bleutées, blanchâtres voire verdâtres.

(g) et (G), mis entre parenthèses, sont bien équivalents à Go et Gr mais ils apparaissent en tant que suffixes et pas en temps qu'horizons majeurs; cela matérialise le fait que l'on a parfois le choix entre considérer l'hydromorphie comme une caractéristique accessoire (ex: horizon Ag, Bg ou Cg) ou alors majeure donnant son appellation à l'horizon qui devient Go ou Gr, qu'il soit par ailleurs de type A, B ou C.

Cours Ecopédologie

Dans un sol donné il y a pas nécessairement toute la série d'horizons cité dans le tableau précédant, par exemple on peut rencontrer des profils de type AR ou A (B) C.

Ces sigles d'horizons peuvent être enrichis d'un suffixe qui précise la nature (Tab.05).

Suffixe	Signification. Ces sigles caractérisent des horizons
Ca	Enrichis en carbonate de Calcium : B _{Ca} , C _{Ca}
Fe	Enrichis en Fer B _{Fe} en particulier
h	Enrichis en matière organique : B _h
s	Enrichis en sesquioxydes de fer ou aluminium (Al ₂ O ₃), le B _{Fe} une sorte particulière de B _s
t	Enrichis en argile (t = ton en allemand) B _t

Si plusieurs horizons de même type se succèdent on numéroté dans l'ordre par exemple on aura un profil dont le développement sera : A,B1,B2,C.

Si un horizon possède des caractères intermédiaires entre deux horizons on identifie avec les deux lettres ainsi peut-on rencontre un horizon AB ou BA si on veut marquer qu'il ressemble plus a un B qu'a A.

Le sol et l'eau

L'eau du sol a une importance considérable; d'une part elle intervient dans la nutrition des plantes, à la fois directement et indirectement, en tant que véhicule des éléments nutritifs dissous et milieu des différentes réactions métaboliques; d'autre part, c'est un des principaux facteurs de la pédogenèse, qui conditionne la plupart des processus de formation des sols.

Les sources principales de l'eau du sol sont :

- **L'eau de précipitation** (on y ajoute les eaux d'irrigation)
- **L'eau souterraine** (*nappe phréatique permanente*, alimentée souterrainement).

Les états de l'eau dans le sol : on distingue trois états de l'eau dans le sol selon la force avec laquelle il la retient et selon sa disponibilité pour les plantes : l'eau de gravité, l'eau utile et l'eau inutilisable.

- **L'eau de gravité** ou l'eau libre : c'est l'eau qui remplit la macroporosité et s'écoule par gravitation jusqu'au point de ressuyage. Il n'existe dans les sols que dans les heures ou les jours qui suivent une précipitation ou en cas des nappes phréatiques permanentes. Quand les forces dues à la gravitation s'équilibrent avec la force de rétention du sol, elle apparaît le point de ressuyage.
- L'eau de gravité à écoulement vertical se subdivise en deux parties :
 - 1° **L'eau de gravité à écoulement rapide**, qui circule dans les pores grossiers (supérieurs à 50 µm), dans les quelques heures qui suivent les pluies;
 - 2° **L'eau de gravité à écoulement lent**, qui descend lentement (souvent plusieurs semaines) dans les pores moyens de diamètre compris entre 50 µm et 10 µm : l'ensemble des eaux de gravité alimente *le drainage profond*, si le sol est perméable.
- **L'eau utilisable :** ou réserve utile $R U$: elle remplit les pores de diamètre compris entre 0,2 et 50 µm ou forme des films de 5 à 10 nm à la surface des particules. Les racines l'absorbant jusqu'au point de flétrissement temporaire, réversible puis jusqu'au point de flétrissement permanent qui atteint lorsque la surface de rétention de l'eau par le sol égale la force de succion maximale exercée par la plante.
 - **Le point de flétrissement (f) :** la valeur de l'humidité du sol au moment où la plante commence à souffrir de la sécheresse, et se fane, sur le plan pratique on distingue deux étapes successives du point de flétrissement :

- **Le point de flétrissement temporaire (ft) :** *il* est défini comme étant la teneur en eau du sol à laquelle les feuilles les plus basses d'une plante se flétriront, les stomates se ferment, et qui provoque une réduction de la transpiration et l'arrêt de la croissance de la plante, cependant, le développement de la plante peut se poursuivre si elle est replacée dans les conditions optimales
- **Le point de flétrissement permanent (fp) :** Le flétrissement devient permanent et induit un dessèchement définitif de la plante. C'est la valeur de l'humidité du sol à partir de laquelle les forces de capillarité et d'adsorption (l'eau liée) qui lient l'eau au sol, de côté, et les forces d'absorptions de l'eau par les plantes d'autre côté, sont égales, de telle façon que les plantes ne peuvent l'extraire pour leurs besoins de transpiration et de croissance.
- **l'eau inutilisable :** en dessous du point de flétrissement permanent se trouve ce type d'eau inutilisable par les plantes, seule une évaporation intense permet de l'éliminer, mais même à des températures élevées il reste toujours un peu d'eau dans le sol auteure de certains minéraux dont elle assure l'hydratation.

Les forces exercent sur l'eau du sol :

Trois forces agissent sur l'eau de sol : la force de gravitation d'écoulant d'attraction terrestre **P**, la force de rétention par les solides **F** en fin la force de succion des plantes **S** (Fig.12). ces forces parfois assimilées à des pressions sont exprimées en mega pascals (MPa), en Bars, en atmosphères, en centimètre d'eau ou de mercure.

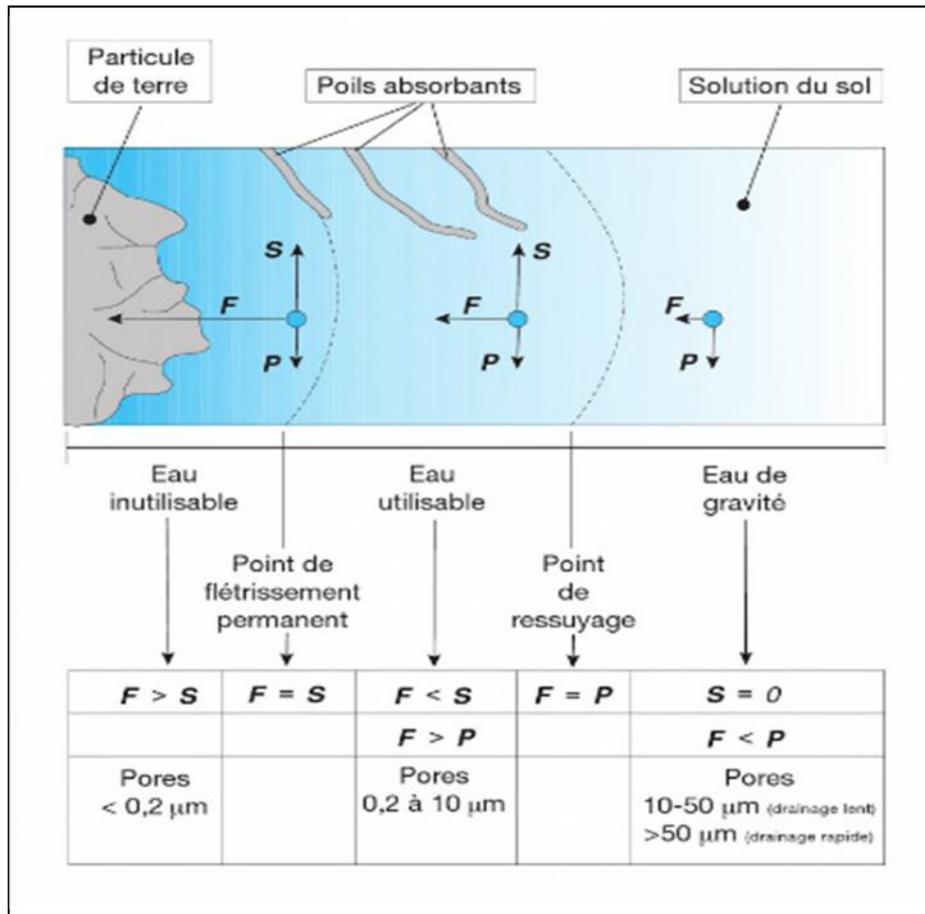


Figure 12 : les forces exercent sur l'eau du sol.

La solution du sol et les êtres vivants : la solution du sol influence les êtres vivants de multiples manières et a des échelles variées.

- La nutrition des plantes puis que celle-ci plongent leurs racelles pour absorber l'eau et les éléments nutritifs dont elles ont besoin
- La solution du sol joue ici le rôle d'intermédiaire entre les cellules du rhizoderme et le complexe argilo-humique
- Sa teneur en ions et son pH règlent la présence des espèces en fonction de leur affinité et leur capacité de tolérance par exemple la concentration élevée en sodium de la solution de sol qui sélectionner les plants halophiles alors que celle en aluminium est toxique pour les végétaux

L'atmosphère de sol :

Dans le sol l'air occupe les pores abandonnés par l'eau lors de son retrait d'abord le plus grossier puis les plus fins.

Sa quantité dépend ainsi d'une combinaison entre la texture, la structure et la teneur en eau, mais il est aussi en échange avec l'atmosphère externe dans des concentrations relatives différentes en gaz libre. ,n,njlng

La composition de l'air dans le sol présente des fluctuations saisonnières liées à l'activité biologique comme par exemple la respiration des racines, de la microflore aérobie et la faune consomme de l'oxygène et rejette du gaz carbonique. La fixation d'azote et la dénitrification bactériennes modifient les concentrations en azote réactif alors que le méthane.

La production moyenne de gaz carbonique dans le sol est estimée à 15 t /ha les deux tiers étant dus à l'activité microbienne, si la structure est aérée cette production ne s'accumule pas car l'air se renouvelle par diffusion avec l'extérieur au gré des variations de concentration.

L'atmosphère du sol et les êtres vivants : à l'instar de la solution du sol, l'atmosphère du sol agit de multiples façons sur les êtres vivants de manière directe ou indirecte. Pour l'ensemble des eucaryotes et pour nombreux procaryotes le facteur limitant principal c'est l'oxygène, sa teneur doit être suffisante pour assurer les processus fondamentaux de la respiration aérobie. Généralement il ne représente pas un problème pour les microfaunes et les mésofaunes car ils peuvent se déplacer si l'air se raréfie mais il pose un problème pour la microfaune et la microflore et les végétaux par ce que leurs mouvements sont très lents pour éviter la diminution ou la chute de taux d'oxygène qui peut se produire après une inondation par exemple.

L'effet direct : si l'oxygène existe avec une petite quantité et avec l'augmentation du taux d'oxyde de carbone CO₂ dans le sol on remarque un ralentissement de l'activité de certains microorganismes exemple : la croissance des champignons lignicoles est optimale vers 10% de CO₂ et il peut atteindre encore la moitié de son maximum sous 50 % de CO₂. Dans la règle, les champignons non lignicoles sont fortement inhibés sous plus de 15 % de CO₂.

Cours Ecopédologie

Dans l'atmosphère du sol on peut trouver des substances volatiles toxiques tel que l'**éthylène** C_2H_2 (produit naturellement par les plantes), l'**acide cyanhydrique** HCN produit par certaines bactéries antagonistes de champignons parasite des racines.

L'effet indirect : il modifie le potentiel redox, celui-ci est un régulateur important des réactions d'oxydoréduction fort nombreuses dans les sols et touchant de multiples éléments comme le fer, l'azote....etc

A court terme la modification du potentiel redox change la biodisponibilité en certains ions en relation avec celle de pH. Along terme elle agit sur l'ensemble de l'activité biologique et donc sur ses conséquences macroscopiques qui sont par exemple la structure du sol ou sa capacité d'intégration de la matière organique, exemple de l'accumulation de turbe matériel végétale ne se décomposent que très lentement en raison des conditions anoxique qui empêchent la dégradation des polymères phénolique tel que la lignine.

La température du sol :

La plus grande partie de l'énergie calorifique que le sol reçoit provient de l'énergie solaire (estime en moyenne dans les régions du climat tempéré a 144 calories /jour/cm²). Elle varie considérablement en fonction de la latitude, de la saison, de l'exposition et du couvert végétal ; l'énergie calorifique reçue le jour élève la température du sol et évapore l'eau retenue; la nuit, au contraire, le sol se refroidit par rayonnement.

L'énergie solaire :

Le flux initial d'énergie solaire est la constante solaire qui contient toutes les longues d'ondes entre 200 et 4000 nm. Infrarouge thermiques entre 700 et 1000 nm intéressent le sol au premier chef alors que le visible entre 400 et 700 nm est vitale pour les organismes.

La fraction de constante solaire qui atteint réellement le sol par voie direct (**I**) ou diffusé (**D**), est le rayonnement global **R_g** ce dernier dépend de l'angle h du rayon solaire avec le sol (latitude et la pente). Il est un des composantes du

Cours Ecopédologie

rayonnement net R_n lui-même se distribué sous quatre formes dans l'écosystème (Fig.13):

- $L \cdot E$: énergie utilisée pour l'évaporation ou libérée par la condensation de l'eau.
- q_a : chaleur de convection, diffusion en milieu liquide.
- q_s : chaleur de conduction, diffusion en milieu solide.
- ph : énergie absorbée pour la photosynthèse.

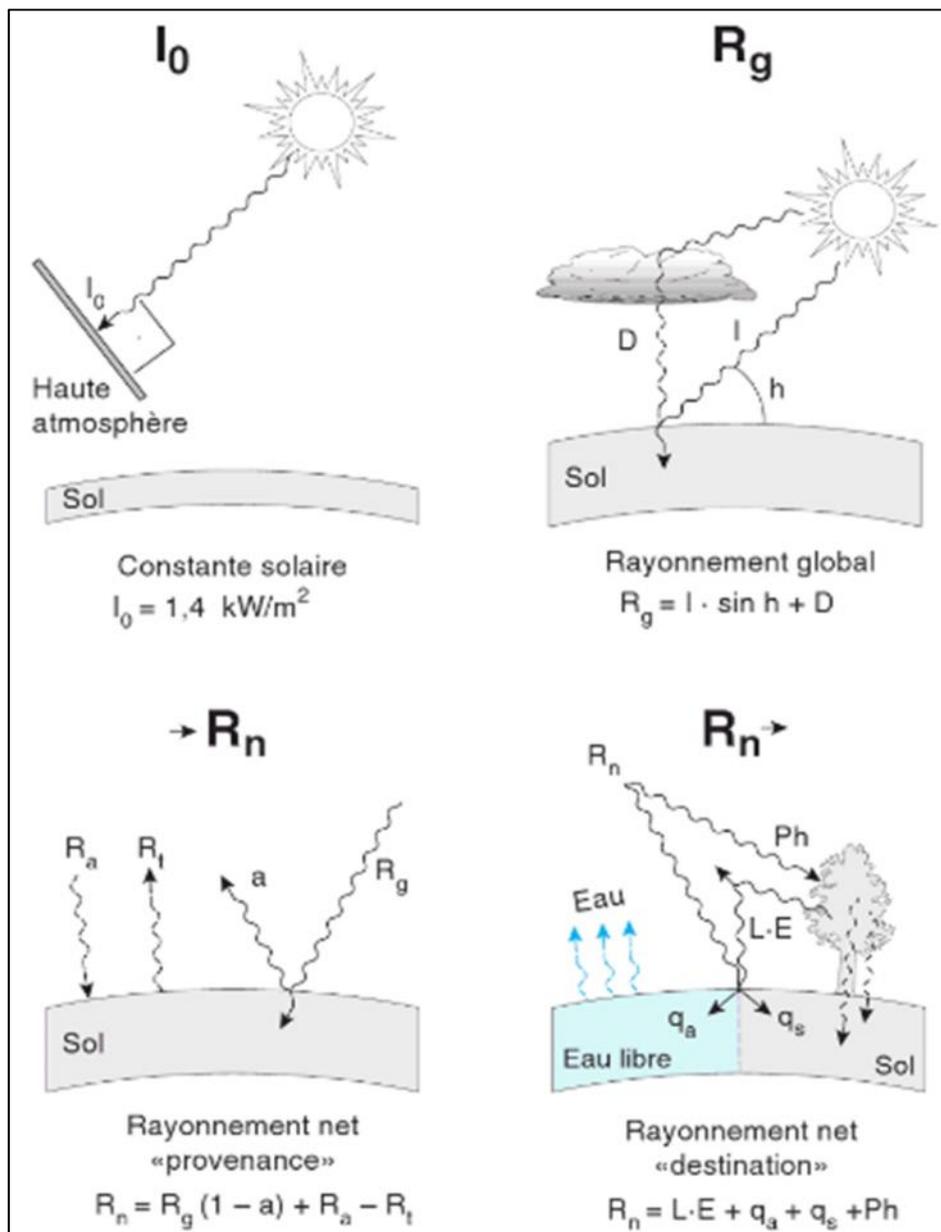


Figure 13 : les étapes de transformation de l'énergie solaire de la haute atmosphère au sol.

1- Facteurs d'échauffement superficiel du sol :

Lorsqu'on mesure la température des sols différents, dans une même région et à un même moment, on constate qu'elle peut varier dans de larges limites; trois facteurs interviennent à ce point de vue :

1- la couleur du sol, les sols foncés s'échauffant plus vite que les sols clairs;

2- la teneur en eau, qui joue un rôle considérable : la capacité calorifique de l'eau est, en effet, quatre à cinq fois plus élevée que celle de l'air ou des matières solides; il faut donc beaucoup plus de calories pour élever du même nombre de degrés la température d'un sol saturé d'eau, que celle d'un sol sec. Les sols sableux ou calcaires, qui se dessèchent rapidement, sont des sols «chauds », alors que les sols mal drainés ou tourbeux, sont des sols «froids»;

3- la couverture végétale, intervient de façon importante. La forêt est, à cet égard, plus efficace que la pelouse : un sol de forêt dense est souvent, en été, moins chaud de 8 à 10 °C qu'un sol nu. Par les chaudes journées ensoleillées, la température d'un sol nu peut dépasser 50 °C en climat tempéré, et 60 à 70 °C en climat tropical.

2- La diffusion calorifique en profondeur : profils thermiques

Les profils thermiques renseignent sur la variation de la température du sol, en fonction de la profondeur, à un instant donné. C'est la conductivité thermique du sol, qui détermine les variations de température des horizons profonds, en corrélation avec celles des horizons de surface, qui sont en rapport avec la température de l'atmosphère, ce qui explique que la température du sol varie en fonction du temps:

✓ au cours de la journée (cycle jour/nuit) on constate des variations périodiques de la température en fonction du temps, au cours d'une journée, et elle présente globalement une allure

Sinusoïdale, on remarque l'amortissement de la variation de la température en profondeur ce qui traduit par la diminution de l'amplitude thermique avec la profondeur ; cela veut dire que les variations de température de la surface du sol n'ont plus d'effet, à partir de 40 cm (l'exemple ci-après). En général, cette profondeur limite est de 0.30 à 1m.

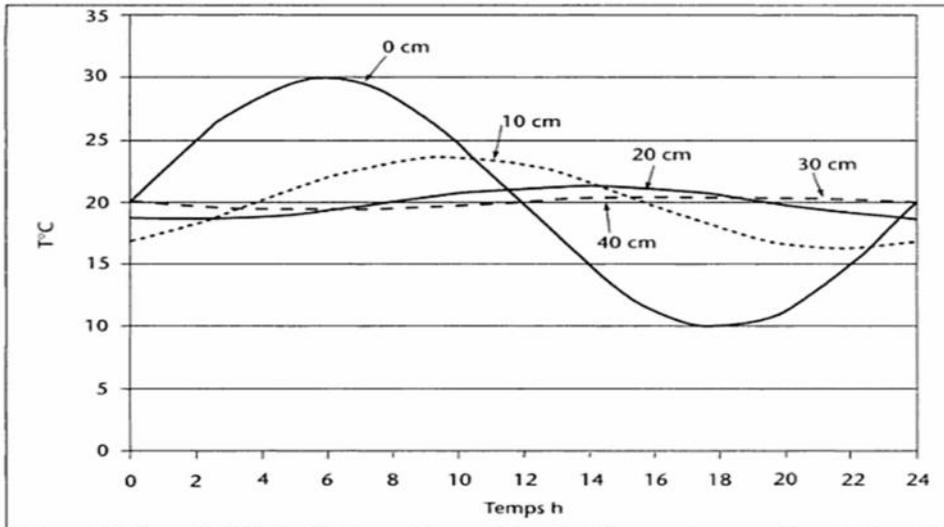


Figure : *Simulation de la température du sol en surface et à quatre profondeurs ; 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, et 40 cm*

✓ Au cours de l'année en raison des variations saisonnières ; Les horizons profonds s'échauffent en été et se refroidissent en hiver, plus lentement que les horizons de surface; il s'ensuit que *les oscillations saisonnières de températures des horizons profonds sont décalées et amorties, par rapport à celles des horizons de surface : plus froids en été que les horizons de surface, les horizons profonds sont, au contraire, plus chauds en hiver* (figure.....ci- dessous).

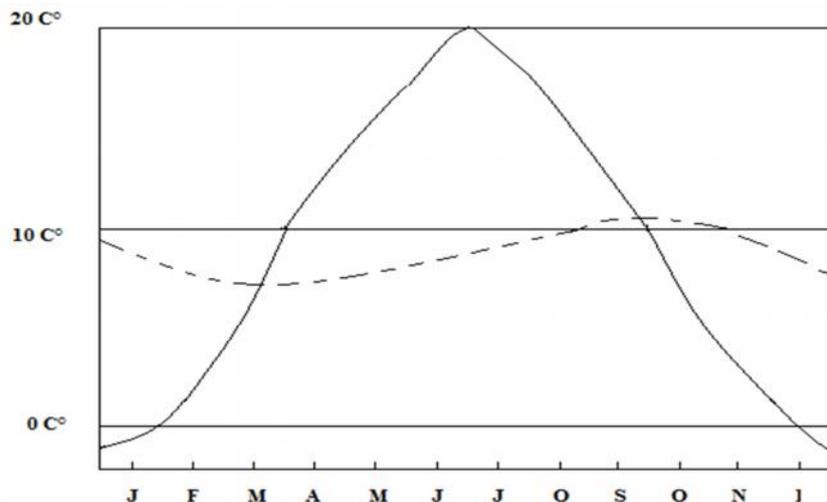


Figure évolution mensuelle de la température du sol en climat tempéré
surface, - - - - profondeur (- 5 mètres)