1. Formation et Evolution du sol

1.1 Les étapes de la formation d'un sol : il y a quatre stades

Stade N01 : stades d'altération d la roche mère, désagrégations 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 désagrégations

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

-*désagrégations chimique* : les plantes excrétant au niveau de leurs racines des acides, les larves qui se développent excrétant 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 désagrégations (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'accentuée, il y a des mouvements des matériaux et déposition des éléments et formation de différentes couches au niveau du sol

L'organisation morphologique des sols

1.2. 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

1.2.2.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 »

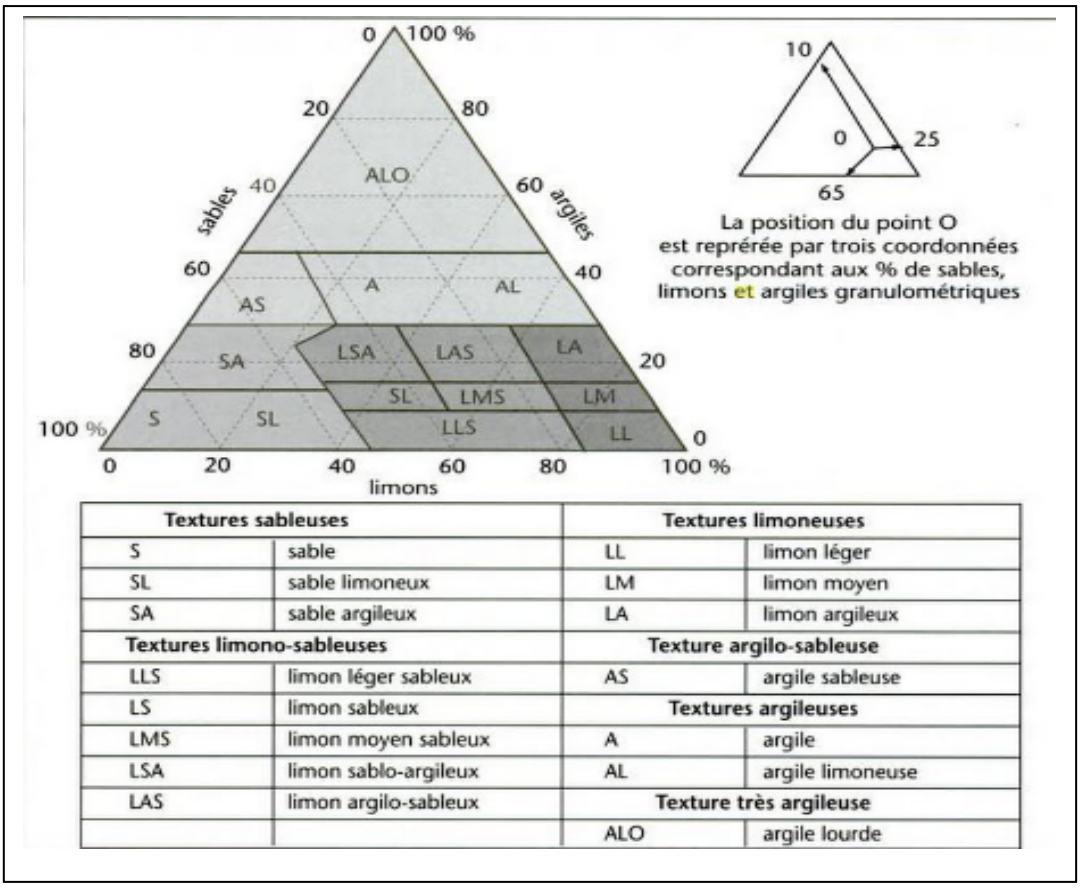
Dénomination	**Dimension**
1- Sables grossiers	200 µm à 2mm.
2- Sables fins	50 à 200 µm,
3- Limons grossiers	20 à 50 µm,
4- Limons fins	2 à 20 µm
5- Argiles	>2 µm,

2. 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 retention des éléments.

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

Analyse granulométrique

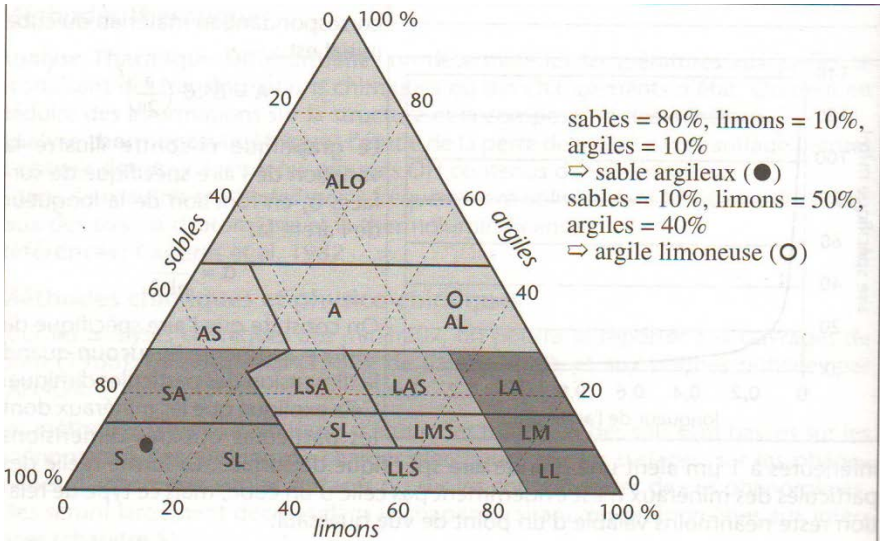
Elle est pratiquée sur la terre fine (obtenue par tamisage au tamis à mailles 2 mm). Après destruction de la matière organique par un oxydant énergique (l'eau oxygénée), les particules minérales sont dispersées à l'aide d'un dispersant alcalin (hexamétaphosphate de sodium); une agitation mécanique est 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.



Textures sableuses		Textures limoneuses	
S	sable	LL	limon léger
SL	sable limoneux	LM	limon moyen
SA	sable argileux	LA	limon argileux
Textures limono-sableuses		**Texture argilo-sableuse**	
LLS	limon léger sableux	AS	argile sableuse
LS	limon sableux	**Textures argileuses**	
LMS	limon moyen sableux	A	argile
LSA	limon sablo-argileux	AL	argile limoneuse
LAS	limon argilo-sableux	**Texture très argileuse**	
		ALO	argile lourde

Figure 2 : 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%.

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 suivent.

Pour un cube de 1 cm de côté, sa surface spécifique est égale 6 cm^2, si se 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 μm de côté sa surface spécifique (la surface totale de tous les cubes de 1 μm) 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 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 eqg = ions gramme / valence = la masse / valence

1meqg = la masse / 1000 x valence

1meqg de Ca^{+2}= 40g / 1000 x 2 = 40 x1000 / 1000 x 2 = 20 mg

Donc

Un gramme d'**argile** $\longrightarrow$ 150 meq g d'ions = 150 x20mg = 3000mg = 3g

Un gramme de **limon** $\longrightarrow$ 15 meq g d'ions = 15 x20mg = 300mg = 0,3g

Un gramme de **sable** $\longrightarrow$ 5 meq g d'ions = 5 x20mg = 100mg = 0,1g

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 sont 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 males 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 à l'agriculture à cause de leur faible cohésion et leur faible porosités (les particules de limon colmatent les vides).

La texture équilibrée : il correspond à l'optimum dans la mesure où 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.

3. La structure du sol :

a) La structure du sol

Alors que la ***texture*** du sol s'établit sur la base de la granulométrie des particules minérales dont le sol est constitué (proportion relative de sable, de limon, et d'argile), la structure d'un sol désigne le mode d'assemblage et d'organisation spatiale de ses constituants, ainsi que la nature et l'intensité des liaisons qui existent entre eux. La structure des sols a une influence fondamentale sur l'environnement.

La structure du sol décrit l'arrangement spatial des particules en agrégats complexes, pores et canaux. Le sable, le limon, l'argile et les particules organiques s'agrègent ensemble sous l'effet de diverses forces et à différentes échelles pour former des unités structurelles distinctes appelées ***peds*** ou **agrégats**.

Lorsqu'un sol est excavé, il se fragmente naturellement en *peds* le long de zones de faiblesse, car les particules à l'intérieur d'un ped sont plus liées entre elles qu'avec le sol environnant. Bien que similaire au terme *agrégat*, *ped* est utilisé pour décrire la structure du sol à grande échelle, avec des unités structurelles variant de quelques millimètres à environ un mètre.

La formation des *peds* est principalement influencée par des processus physiques comme le gel-dégel, l'humectation-séchage, la contraction-gonflement, l'action des racines, l'activité des animaux du sol et les interventions humaines. Ils se distinguent **des mottes** de terre, qui résultent de la compression artificielle du sol humide lors du labour ou de l'excavation.

La plupart des grands *peds* sont composés de, et peuvent être divisés en, plus petits *peds* ou agrégats (Figure 3). Les réseaux de pores à l'intérieur et entre les agrégats constituent un aspect clé de la structure du sol. Le réseau de pores influence grandement le mouvement de l'air et de l'eau, la croissance des racines des plantes, et les activités des organismes du sol, y compris l'accumulation et la décomposition de la matière organique. Des pratiques telles que la récolte du bois, le pâturage, le labour, le passage d'engins et l'épandage de fumier affectent les sols principalement par leurs effets sur les pores du sol, en particulier dans les horizons de surface.

L'exemple inférieur montre comment de grands *peds* prismatiques, typiques des horizons B, se décomposent en *peds* plus petits, et ainsi de suite. L'exemple supérieur illustre comment des microagrégats de moins de 0,25 mm de diamètre sont inclus dans des macroagrégats granulaires d'environ 1 mm de diamètre, caractéristiques des horizons A. Les microagrégats se forment souvent autour de minuscules particules de matière organique initialement piégées dans le macroagrégat. À noter les deux échelles différentes utilisées pour représenter les structures prismatiques et granulaires.

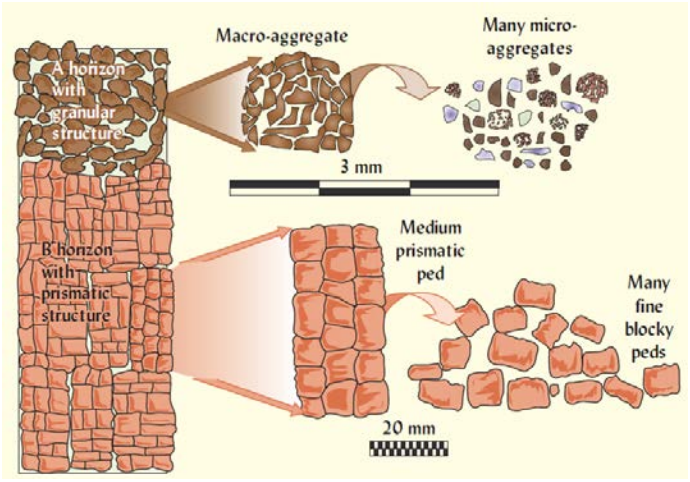


Figure 3 : Les unités structurelles plus grandes observables dans un profil de sol contiennent chacune de nombreuses unités plus petites.

De nombreux types et formes de *peds* existent dans les sols, souvent selon les horizons d'un profil donné. Certains sols présentent une structure à grains isolés, où les particules ne sont pas agrégées, comme le sable des dunes éoliennes ou le loess fraîchement déposé. À l'opposé, certains sols, notamment certaines argiles, forment des masses cohésives et sont qualifiés de structure massive.

Toutefois, la plupart des sols présentent une certaine agrégation et sont constitués de *peds* caractérisés par leur forme, leur taille et leur degré de distinction. Les quatre principales formes de *peds* sont **sphéroïdale, lamellaire, prismatique et bloc**.

Sphéroïdale : La structure granulaire est constituée d'agrégats approximativement sphériques, séparés les uns des autres dans un agencement peu compact (Figure 4 a). Leur taille varie généralement de 1 à 10 mm de diamètre. Pour ce type de structure, le terme *agrégat* est plus couramment utilisé que *ped*. La structure granulaire est typique de nombreux sols de surface (notamment les horizons A), en particulier ceux riches en matière organique. Par conséquent, c'est la principale structure du sol influencée par les pratiques de gestion.

Lamellaire : La structure platyque se caractérise par des *peds* en formes de plaques horizontales relativement minces. Elle peut se retrouver aussi bien dans les horizons de surface que dans les horizons profonds. Dans la plupart des cas, ces plaques résultent des processus de formation des sols. Toutefois, contrairement aux autres

types de structures, la structure lamellaire peut également être héritée des matériaux parentaux du sol, notamment ceux déposés par l'eau ou la glace. De plus, la compaction des sols argileux par des engins lourds peut parfois entraîner la formation de cette structure (voir Figure 4 b).

Bloc : Les *peds* de type bloc sont irréguliers, de forme approximativement cubique (Figure 4.22) et mesurent entre 5 et 50 mm de large. Ils ne sont pas façonnés individuellement, mais moulés par les blocs environnants. Lorsque leurs arêtes sont nettes et leurs faces rectangulaires bien définies, on parle de structure *angulaire bloc*. Si leurs contours sont plus arrondis, ils sont qualifiés de *subangulaires bloc* (Figures 4.c et 4.d). Ces structures se retrouvent généralement dans les horizons B, où elles favorisent le drainage, l'aération et la pénétration des racines.

Prismatique : Les structures prismatiques et colonnaires se caractérisent par des *peds* verticaux en forme de prismes ou de piliers, dont la taille varie selon le sol et peut atteindre plus de 150 mm de diamètre. La structure *colonnaire* (Figure 4.e), avec des sommets arrondis distincts, se rencontre principalement dans les sous-sols riches en sodium (horizons natriques). Lorsque les sommets des prismes sont plats et anguleux, on parle de structure *prismatique* (Figure 4.f). Ces structures sont souvent associées aux argiles gonflantes et apparaissent fréquemment dans les horizons profonds des sols arides et semi-arides. Dans les régions humides, on les retrouve parfois dans des sols mal drainés.

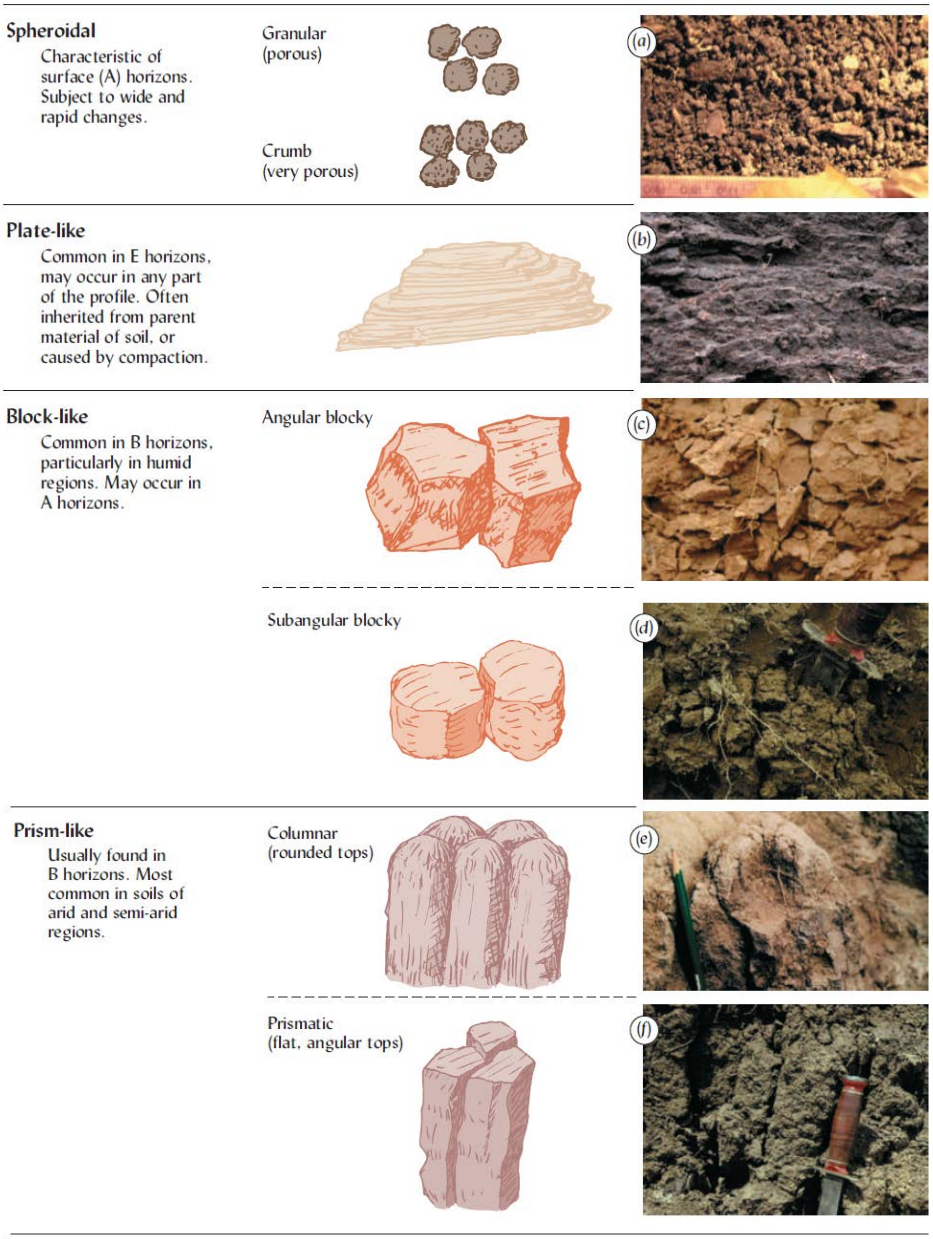


Figure 4 : Différents types de structures (formes) trouvés dans les sols minéraux

b) La porosité du sol

La structure du sol peut être subdivisée en deux niveaux d'assemblage, le premier niveau se situe au niveau de la texture du sol (entre les grains de sable, limon ou argiles), à une échelle microscopique, les particules minérales forment des petits **grumeaux**, appelés agrégats primaires, les espaces libres à l'intérieur de ces agrégats sont appelés pores texturaux, les grumeaux s'organisent ensuite en agrégats plus grossiers, appelés **mottes**, qui sont les véritables éléments structuraux visibles à l'œil

nu (à une échelle macroscopique), et à l'intérieur de ces mottes, on retrouve les pores structuraux. On distingue ainsi ;

- ✓ **macropores**: résultent de l'espace libre entre les petits grumeaux, les agrégats et les mottes, entre autre, les cavités résultants de l'activité biologique « biopores » : galeries creusées par les vers de terre et anciens racines, et celles résultants du travail du sol
- ✓ **micropores** : résultent de l'assemblage des particules solides du sol, le volume des pores occupé par les micropores dépend de la texture du sol : les sols argileux contiennent par exemple plus de micropores que les sols sableux.

Les micropores déterminent la quantité d'eau qui peut être retenue par le sol, au contraire, les macropores, et plus précisément la connectivité de ces pores, permettent l'écoulement de l'eau et les échanges gazeux entre la surface du sol, la couche sous-jacente et le sous-sol.

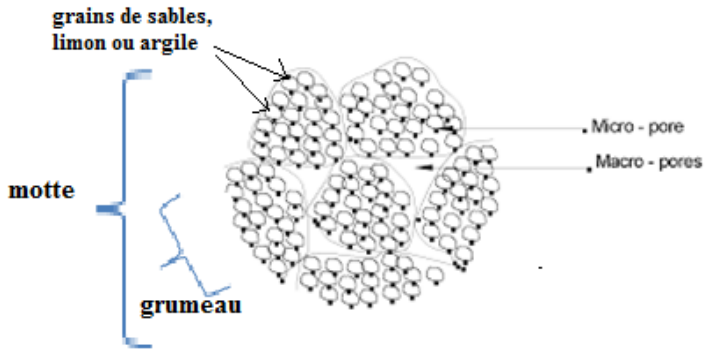


Figure : la porosité de sol

2 L'horizon et le profil pédologique :

Lorsque l'on creuse un fossé afin d'observer le sol en coupe verticale en 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 caractérisées par leurs couleurs et leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Fig.11)

L'ensemble des couches ou les horizons observées dans cette tranché 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.

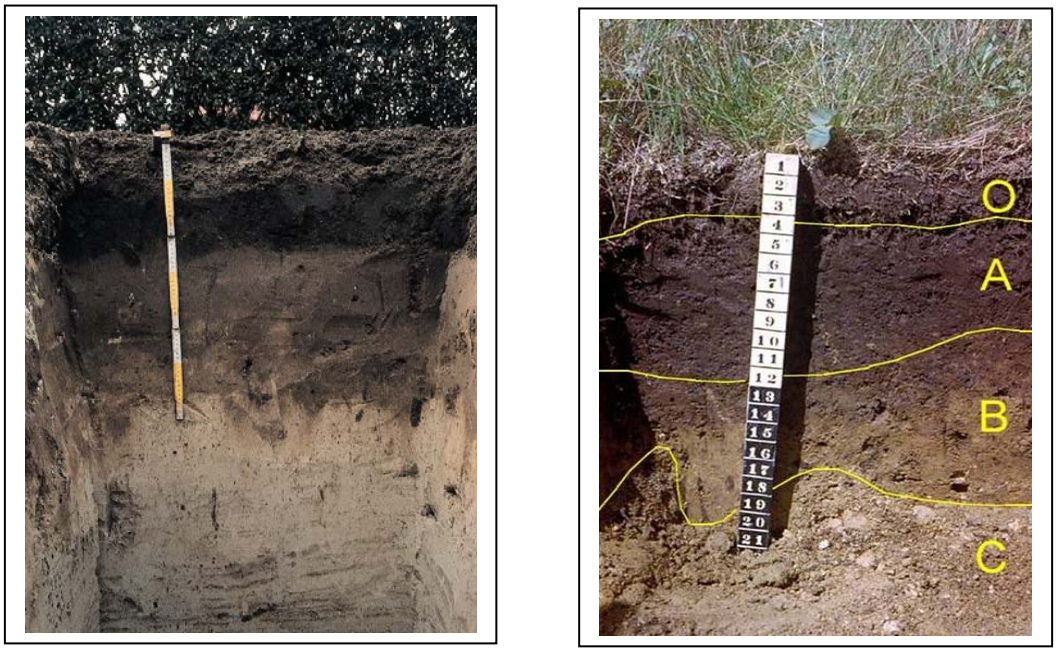


Figure 11 : des tranchées verticales dans le sol

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

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.

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_2O_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.

4. Propriétés physiques des sols.

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 heurs ou les jours qui suivent une précipitation ou en cas des nappes phréatiques permanentes. Quand les forces dues a la gravitation s'équilibrent avec la force de rétention du sol, elle apparaitre 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 sècheresse, 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 permanant (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.

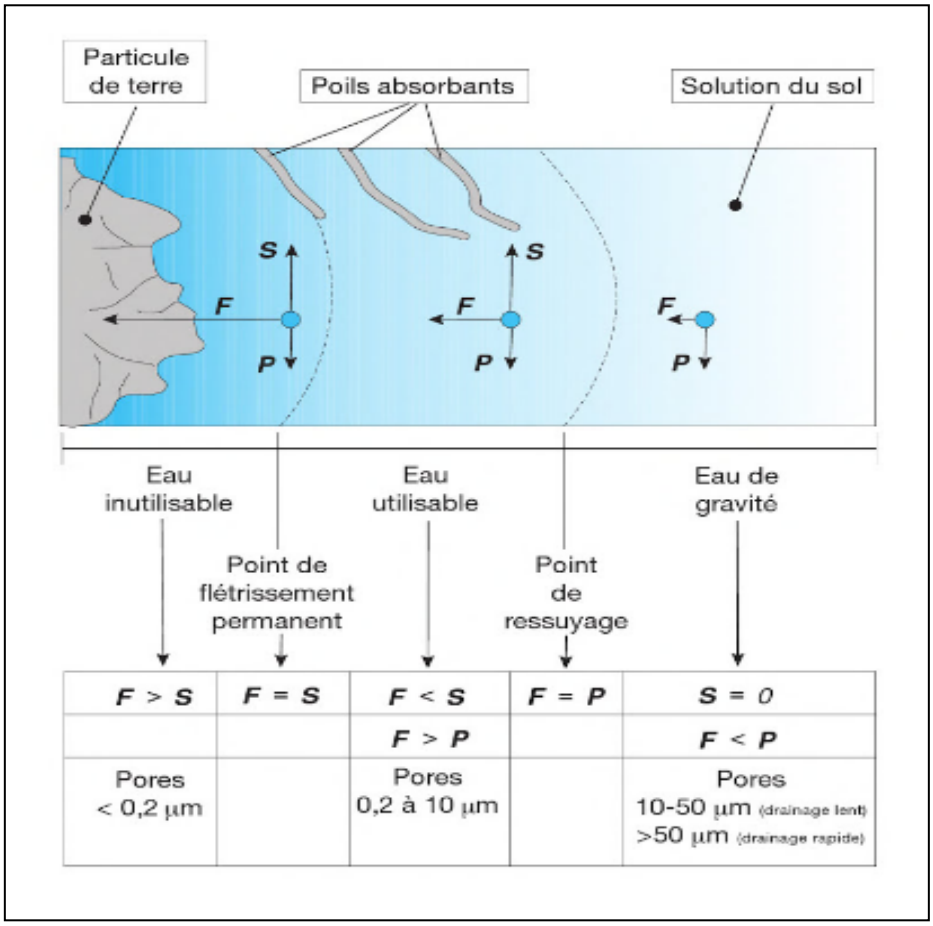


Figure 12 : les forces exercent sur l'eau du sol.

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 radicelles 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 dépond 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.

La composition de l’air dans le sol présente des fluctuations saisonnières liées a 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 a 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 fondamental 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 produit 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 CO_2 dans le sol on remarque un ralentissement de l’activité de certains microorganismes exemple : la croissance des champignons lignicoles est optimale vers 10% de CO_2 et il peut atteindre encore la moitié de son maximum sous 50 % de CO_2. Dans la règle, les champignons non lignicoles sont fortement inhibés sous plus de 15 % de CO_2.

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/cm^2). 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 et1000 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 $\mathbf{R_g}$ ce dernier dépond de l'ongle h du rayon solaire avec le sol (latitude et la ponte). Il est un des composantes du

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

- *L 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.

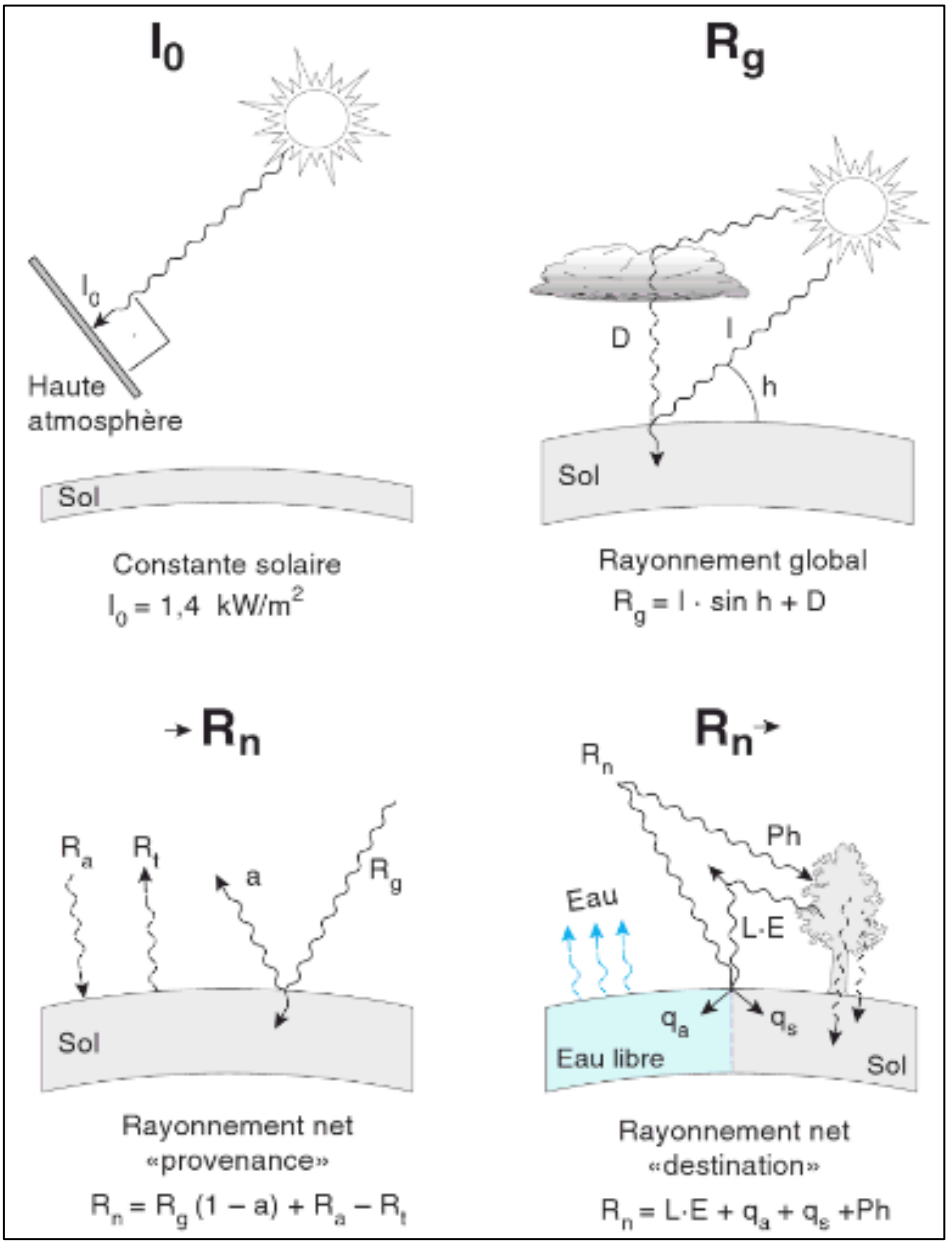


Figure 13 : les étapes de transformation de l'énergie solaire de la haute atmosphère au sol.

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.

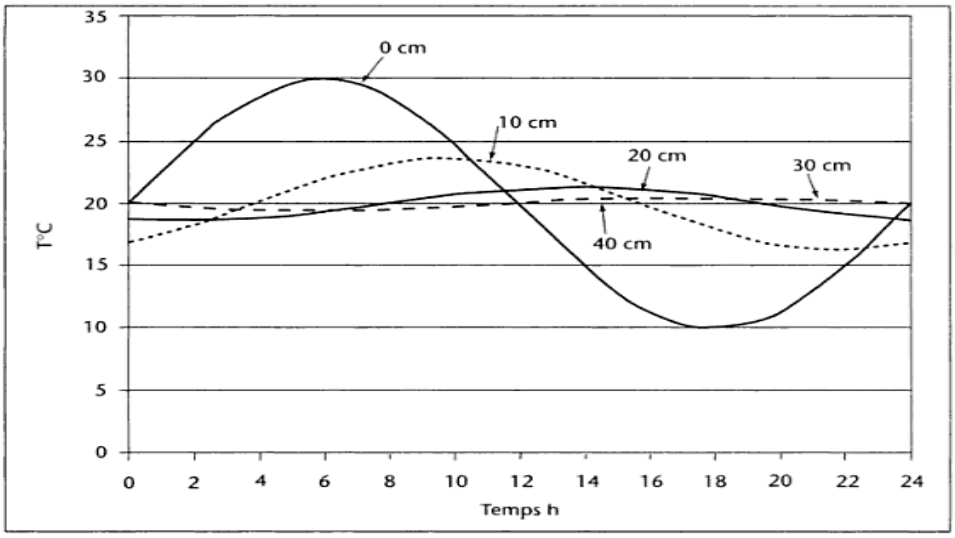


Figure : *Simulation de lu température du sol en surface et à quatre profondeurs ; 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, et 40 cm*

✓ 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).

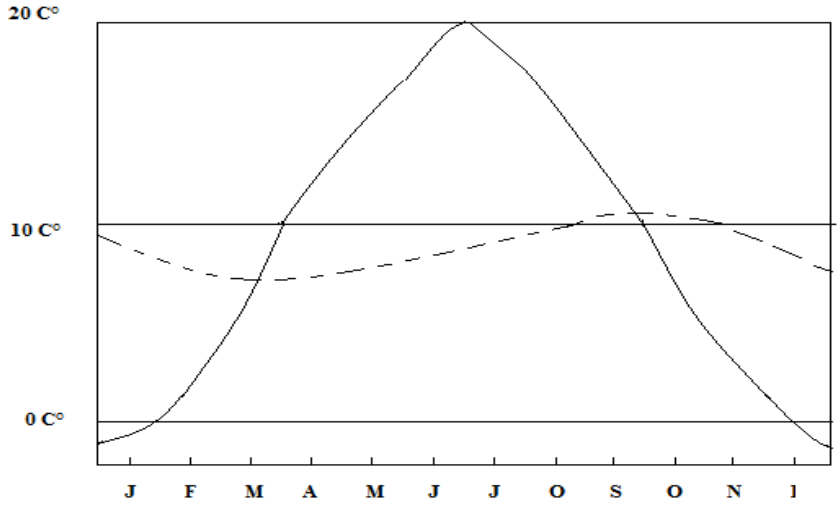


Figure évolution mensuelle de la température du sol en climat tempéré

——— surface, - - - - profondeur (- 5 mètres)

5. Les constituants organiques :

De la litière à la matière organique humifiée, la mort des êtres vivants, leur déchets et secrétions apportent au sol sa matière organique (matière organique fraiche). 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.

5.1.Matière organique fraiche (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 laitière 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 libres 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.

5.2. les propriétés générales d'humus:

5.2.1. 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 ??

Dans 100 g de matière organique ⟶ 4.16g de N
X g de matière organique ⟶ 1g de N
} X= 100x1/4.16 = 24g

1 g de N ⟶ 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 da 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 ⟶ 58g de C
Y g de matière organique ⟶ 1g de C
} Y= 100x1/58 = 1.72g

1 g de C ⟶ 1.72 g de matière organique

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

5.2.2. les fractions d'humus :

a) Les acides fulviques : ils comportent des longues chaines latérales attaches a un nucléus aromatique de petite taille (Fig.6). Ils peuvent être extrais par des sels de sodium (pyrophosphate de sodium) et le NaOH, se sont des acides peu polymérisés et constituant des polysaccarides et des acides aminés et de certain 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 existant 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 extractible également par NaOH et par les sels de sodium. Les acides humiques sont des acides qui possédants un noyau cyclique relativement dense et sur laquelle se greffent des chaines latérales courtes des polysaccarides 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 chaines latérales, ils sont extractibles par les sels de sodium seulement et ils correspondant souvent au composés d'humus liée au Ca^{+2}, Fe^{+2} et Al^{+3}
- *Les acides humiques brins* : ils sont caractérisés par un noyau moins dense est sur laquelle se griffent un nombre important des chaines latérales, ces acides sont des composés peu stables et facilement minéralisables.

D'après Stevenson, 1994 la formule chimique moyenne pour les acides humiques $C_{10}H_{12}0_5N$ et pour les acides fulviques $C_{12}H_{12}0_9N$ (Fig.07).

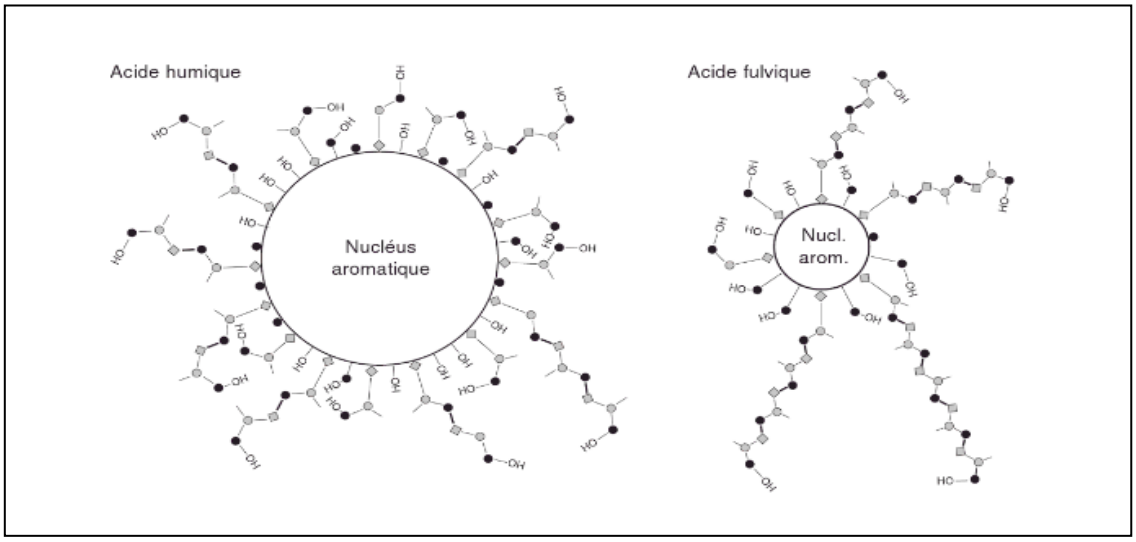


Figure 06: Structure générale d'acide fulvique et d'acide humique (Gobat et *al* 2010)

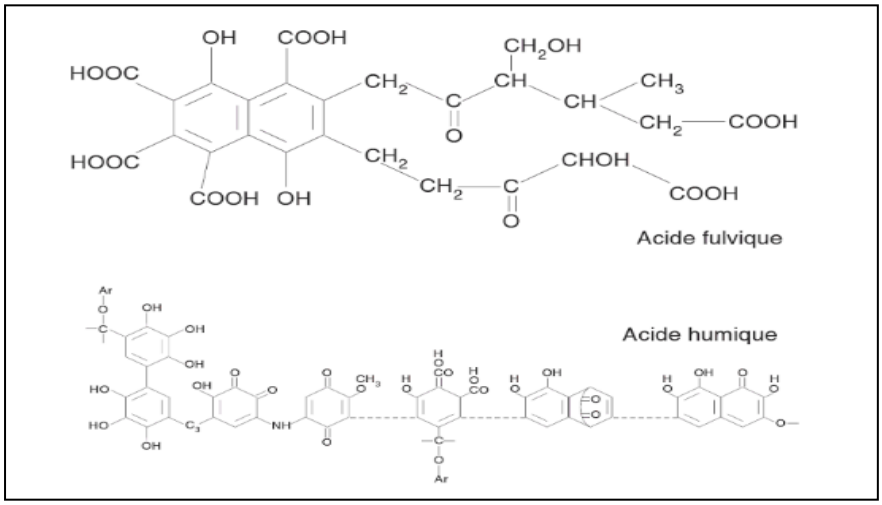


Figure 07: Structure moléculaire d'acide fulvique et d'acide humique (Gobat et *al* 2010)

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)

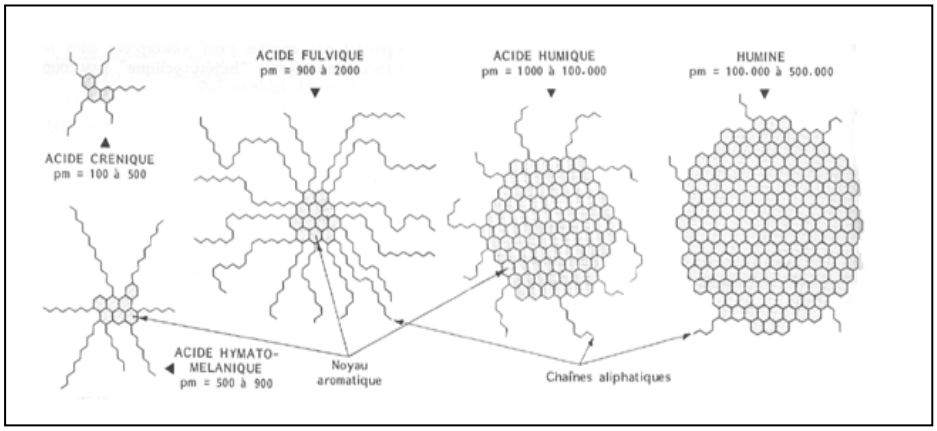


Figure 08 : Les composes humiques (tires de Soltner,1992).

5.2.3. 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 particulaires	**A** de juxtapositions très peu épais ou absent
Rapport C/N	8 à 15	15 à 25	> 25

Notons que la classification allemande des sols (Muken hansen 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 a noire des zones submergées oxygénées, riche en restes végétaux et en organismes) et ***dy*** (dépôts tourbeux bruns des eaux acides et pauvres en organismes)

5.3. les fonctions d'humus :

5.3.1. 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 intervienne au niveau calorifique (énergie) du sol (capacité d'interception de la lumière).

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

5.3.2. 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'augmentés la rétention du sol en particules cationiques (CEC). La CEC de la matière organique est très élevé par port les 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 croissances.
- L'humus jeu un rôle dans les métabolismes des glucides, protéines et lipides chez les végétaux.Il entraine une accélération des processus respiratoire chez les plantes dans le sol.