

## Chapitre 1 : les propriétés physiques du sol

### 1. Les éléments constitutifs du sol

#### Introduction

Le milieu sol est complexe, il comprend des constituants *minéraux* et *organiques*. Les constituants minéraux représentent 93 à 95% du poids total du sol. La fraction minérale du sol provient de la désagrégation et de l'altération des roches sous jacentes.

On sépare les constituants minéraux du sol selon leur taille ; c'est *l'analyse granulométrique* du sol. On distingue ainsi des graviers, des sables, des limons, et des argiles ; leur proportion relative définit *la texture du sol*.

Tableau1 : Classement des particules minérales en fonction de leur taille

catégorie	cailloux	graviers	Sable grossier	Sable fin	Limon grossier	Limon fin	argile
<b>Diamètre extrême</b>	20 -5 cm	20cm-2mm	2 - 0.2mm	0.2 - 0.05 mm	0.05 - 0.02 mm	0.02 - 0.002 mm	<0.002mm

$$1\mu\text{mètre} = 0.001 \text{ mm} \quad \longrightarrow \quad 1000 \mu\text{mètre} = 1 \text{ mm}$$

#### Remarque :

La fraction grossière du sol, de la taille des sables et des limons est appelée le *squelette du sol*, c'est une fraction qui est chimiquement assez inerte. Car ces grains portent peu de charge électrique et leur surface spécifique (surface développée par unité de masse) est faible.

Ce sont les constituants minéraux les plus petits, *les argiles* qui ont plus grande réactivité chimique, du fait des surfaces qu'ils développent et de leurs charges.

#### Les argiles

**Définition 1 :** au sens agronomique, l'argile est la fraction minérale du sol dont les particules ont une taille < 2 $\mu\text{m}$ .

**Définition 2 :** au sens minéralogique, les argiles sont des *phylosilicatées* dont l'unité de base est un feuillet de structure bien définie. Les feuillets sont des superpositions de couches de

tétraèdres de silicium (Te) ou d'octaèdre d'aluminium (OC). Le feuillet est construit à partir de deux couches Te – OC ou trois couches Te – OC – Te.

**Couche tétraédrique** : est composée de tétraèdre  $\text{Si}^{+4}$  entourés de quatre anions  $\text{O}^{-2}$  aux sommets.

**Couche octaédrique** : est constituée d' $\text{Al}^{+3}$ , généralement entourés de six hydroxyles  $\text{OH}^-$  ou bien  $\text{O}^{-2}$ .

**Structure des argiles** : trois types d'argile minéralogiques sont différenciés selon le nombre de couches constituant les feuillets (fig.1).

**Type 1/1 : Te / OC**, est le plus simple, avec un feuillet à deux couches, une tétraédrique, de silice et une octaédrique d'alumine, d'une épaisseur fixe de 0.7 nm (7 Å). *La kaolinite* fait partie de ce groupe (fig.1-2).

**Type 2/1 : Te / OC / Te**, est constitué d'un feuillet à trois couches, deux de silice qui entourent une d'alumine, comme *les illites* (épaisseur constante de 1 nm) et *les vermiculites* (épaisseur variable de 1 à 1.5nm) mais aussi les argiles gonflantes que sont *les smectites, montmorillonites*, dont l'épaisseur des feuillets peut atteindre 2nm par hydratation.

**Type 2/1/1 : Te / OC / Te / OC**, est constitué d'un feuillet à trois couches, complétées d'un supplémentaire octaédrique à base de magnésium. Ces argiles à faible capacité d'échange. *Les chlorites*, ne sont pas gonflants, l'épaisseur des feuillets restant fixe

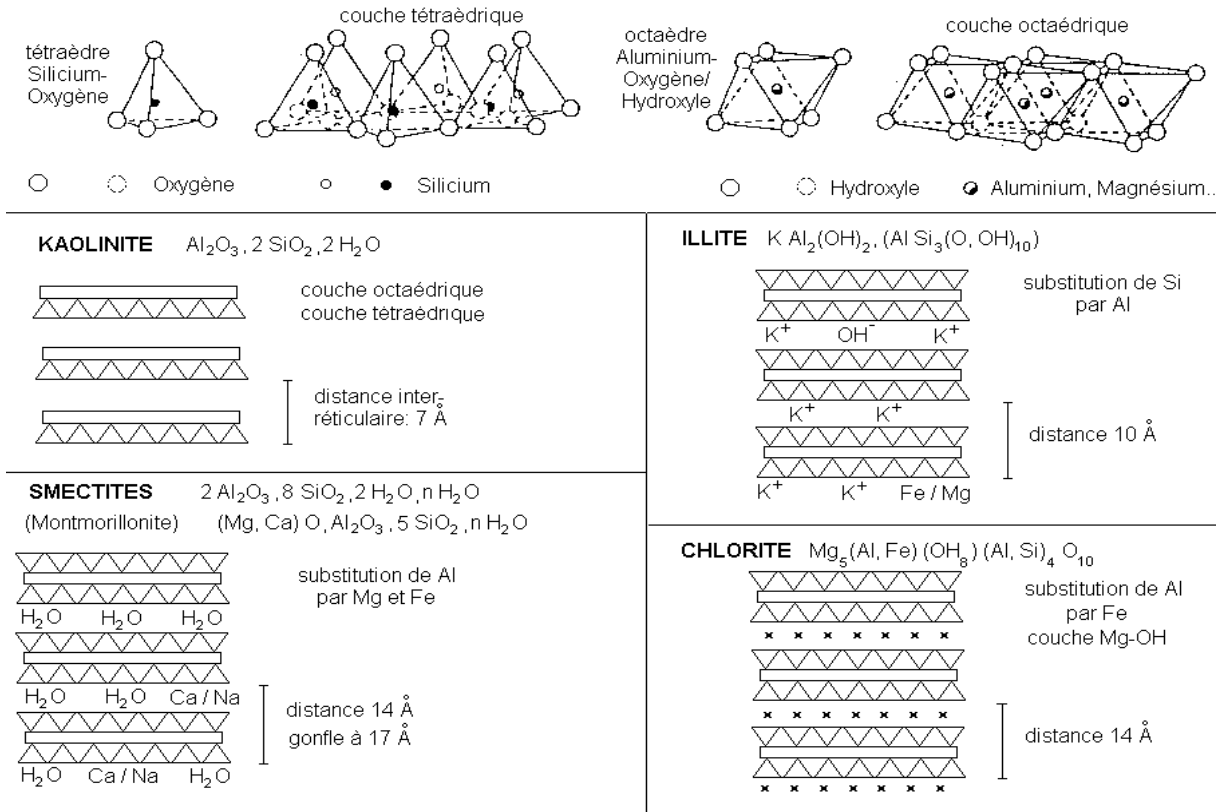


Fig 1 : La structure des argiles

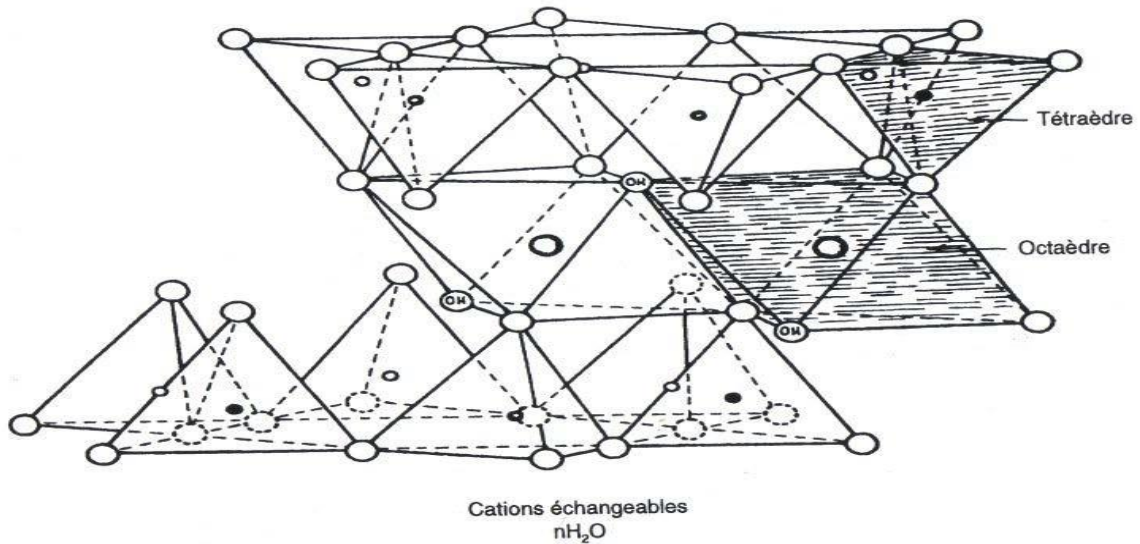


Fig 1-2 : Modèle structural de la kaolinite

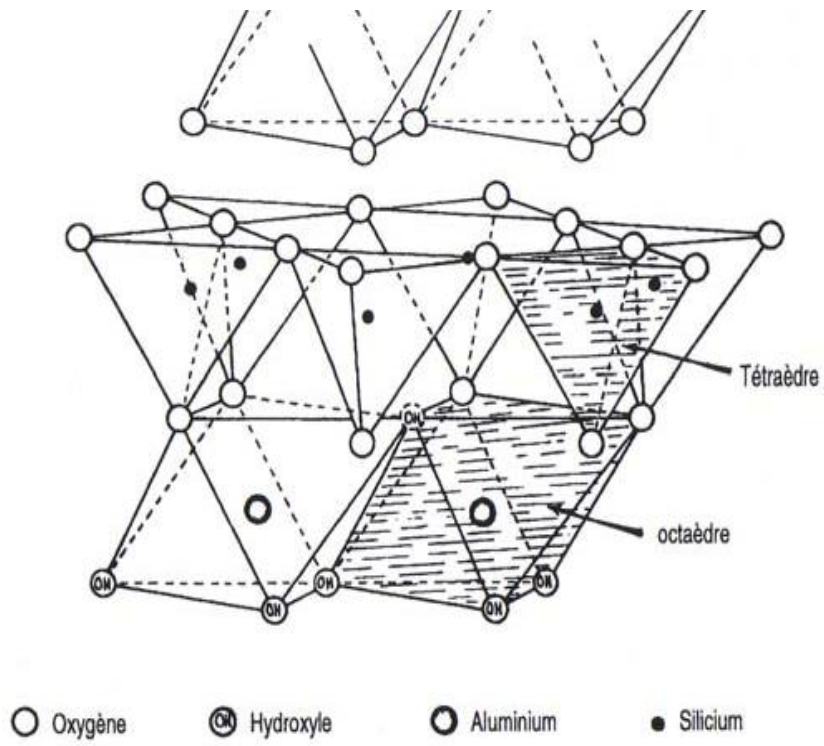


Figure I-3 : Modèle structural de la montmorillonite

## **Les constituants organiques**

**Introduction :** elle provient de l'activité de tous les organismes présents à la surface ou à l'intérieur du sol. Une partie de cette matière organique est produite par des organismes vivants : déjections animales, exsudat racinaires et litière végétale, polysaccharides microbiens. Le reste est constitué par les débris des végétaux morts, les cadavres d'animaux, les cellules microbiennes lysées.

La fraction organique représente en moyenne 5% en poids et 12% en volume total du sol.

Les matières organiques du sol peuvent être sommairement réunies en quatre groupes de substances :

- **Les végétaux et les animaux vivants :** sur le sol et dans le sol représentent plusieurs tonnes à l'hectare.
- **Les débris végétaux et animaux encore organisée ou matière organique fraîches :** qui retournent au sol, ont sensiblement la même composition que les tissus vivants dont ils proviennent :
  - Des substances hydrocarbonées (composées de C, O, H) : sucres solubles, amidon, cellulose, lignine, matière grasses, résines....
  - Des matières azotées, surtout sous forme de protéines, composées de C, O, H, N et aussi de P et S
  - Des minéraux associés aux substances précédentes : sels et ions de calcium, magnésium, potassium, sodium...
- **Les produits transitoires :** sont les maillons de cette chaîne de transformation partant des matières organiques fraîches à très grosses molécules et aboutissant pour la plupart de ces molécules, à des substances minérales simples à petites molécules :
  - Du gaz carbonique et l'eau
  - Des matières minérales : nitrates, phosphores, carbonates, sulfates de potassium, de calcium, de magnésium, de sodium...
- **L'humus :** substance nouvelle et complexe, véritablement reconstruites, à partir de certaines matières organiques (transitoire) et de certaines matières minérales.

## **Les étapes de l'évolution de la matière organique**

**1<sup>ère</sup> étape : la minéralisation primaire :** c'est une désagrégation, une décomposition, un retour à l'état minéral des constituants des matières organiques fraîches.

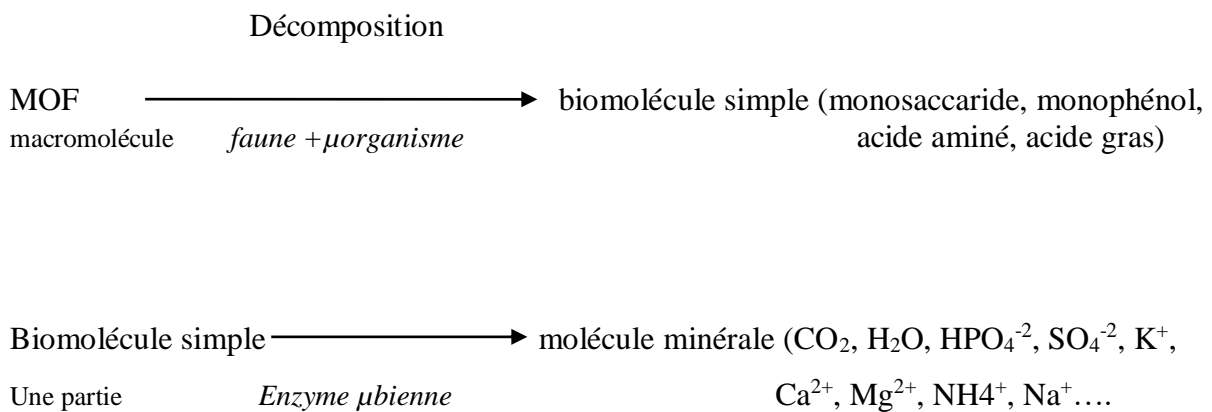
Les molécules complexes de la matière organique fraîche subissent d'abord une décomposition microbienne ; c'est-à-dire une transformation qui libère des composés simples, le plus souvent soluble, une partie subit le processus de minéralisation, c'est-à-dire se transforme en composés minéraux solubles ou gazeux.

Parmi ces substances libérées, on trouve :

- CO<sub>2</sub>
- Des matières minérales assimilables par les plantes : azote nitrique, phosphates et sulfates de calcium, de magnésium, de potassium, de sodium, oligo-éléments...

Ces matières minérales sous forme d'ions peuvent connaître 5 destinations :

- Assimilées par les plantes
- Adsorbée sur le complexe argilo-humique
- Perdues dans l'atmosphère
- Perdues par lessivage
- Reprises par certains microbes pour la synthèse de composés humiques ; c'est l'humine microbienne.



**2<sup>ème</sup> étape : Humification** : Une autre partie échappe à la minéralisation, sert de matériau à l'édification de molécules nouvelles, de plus en plus complexe, de nature colloïdale et de couleur foncée dont l'ensemble constitue l'humus.

**Les trois voies de l'humification :**

- **La voie de l'insolubilisation :** plusieurs noyaux aromatiques peuvent se souder par l'intermédiaire de pont oxygène ou azote (fig.3).

Il se forme d'abord des composés dimère ou trimère (2 ou 3 noyaux phénoliques), donnant naissance aux *acide créniques* et *hématomélaniques*, puis aux *acide fulviques*.

La polymérisation se poursuivant, les *acides fulviques* donnent bientôt naissance aux *acides humiques* et enfin à *l'humine d'insolubilisation*.

Cette polymérisation ou polycondensation se caractérise par plusieurs phénomènes :

- L'augmentation de la taille du noyau aromatique
- La diminution de la proportion des chaînes aliphatiques
- L'augmentation de la masse molaire
- Le passage progressif de l'azote de la forme aminée dans les chaînes aliphatiques à la forme hétérocyclique dans le noyau
- La liaison de plus en plus forte avec les constituants minéraux : argile, sable, limon.

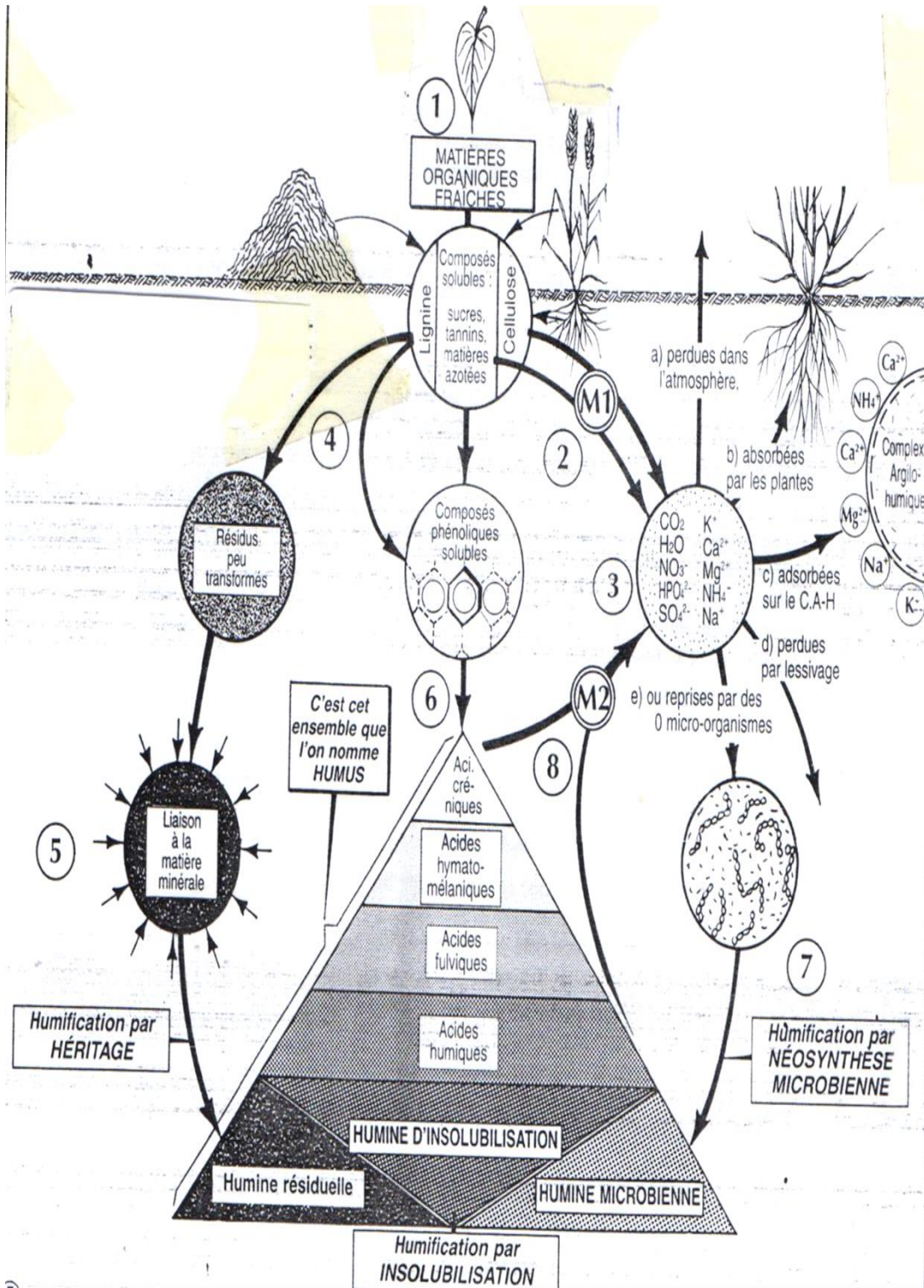


Fig.2 : Evolution des matières organiques dans le sol



I- Les composés phénoliques solubles, molécules de base de l'humus

1 - Les molécules des composés phénoliques solubles ont une structure dite aromatique, avec des groupements quinone =O, ou phénol -OH, ou acide -COOH.

Se fixent sur ces noyaux des chaînes dites aliphatiques, souvent azotées.

2 - Par ouverture de doubles liaisons sur des atomes d'oxygène ou d'azote, plusieurs noyaux aromatiques peuvent se souder. Ce sont les « ponts oxygène » et « ponts azote ».

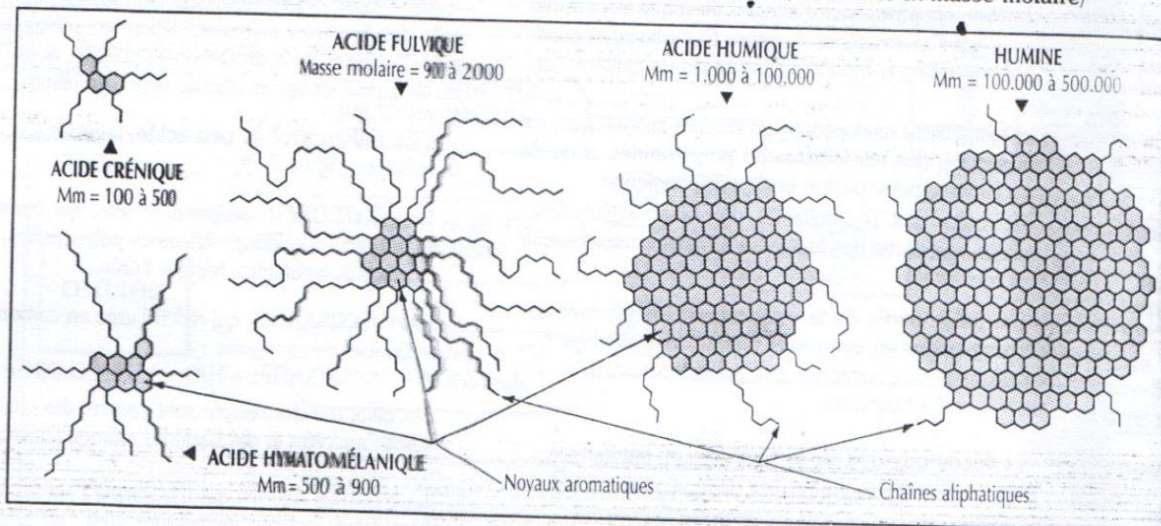
3 - L'azote peut se fixer de deux manières aux composés phénoliques solubles :

A - Dans les chaînes aliphatiques liées aux noyaux aromatiques. C'est la forme aminée, la plus facile à libérer.

B - A l'intérieur des noyaux aromatiques. C'est la forme hétérocyclique, bien plus difficile à libérer.

4 - La liaison de 2 ou 3 noyaux aromatiques donne des composés dimères et trimères, qui constituent l'essentiel des acides créniques et humatomélaniques.

II - LA POLYCONDENSATION : des acides créniques à l'humine (Les chiffres en masse molaire)



III - LES 5 CARACTÉRISTIQUES DE LA POLYCONDENSATION

La POLYCONDENSATION qui fait passer les molécules humiques du stade acides fulviques au stade humine, se caractérise par :

- 1 - L'augmentation de la taille du noyau aromatique, souvent appelé « nucleus ».
- 2 - La diminution proportionnelle de l'importance des chaînes aliphatiques par rapport au nucleus.
- 3 - L'augmentation de la masse molaire et la diminution de la solubilité des molécules formées.
- 4 - Le passage progressif de l'azote de la forme aminée dans les chaînes aliphatiques à la forme hétérocyclique dans le nucleus.
- 5 - La liaison de plus en plus forte avec les constituants minéraux : argile, limons, sables.

Fig.3 : les molécules humiques – l'humification

- **La voie d'héritage** : chaque fois que la décomposition de la lignine est bloquée pour une cause quelconque, ses molécules peu transformées se lient plus ou moins à la matière minérale, notamment dans le tube digestif de la faune du sol, pour donner une humine insoluble, que l'on appelle *humine résiduelle* ou *humine hérité*.

Le blocage pouvait provenir par :

- Un excès d'acidité
- L'anaérobiose
- Un excès de calcaire actif.

- **La voie de la néosynthèse microbienne**

Certain micro-organisme ont la possibilité de reprendre des molécules simples issues de la minéralisation primaire pour synthétiser leur propre substance. A leur mort, les polysaccharides, issus de leur biodégradation peuvent se lier à la matière minérale pour former une autre fraction de l'humus, *l'humine de néosynthèse microbienne*.

**3<sup>ème</sup> étape : la minéralisation de l'humus ou minéralisation secondaire** : sous l'effet d'autres micro-organismes, l'ensemble des composés de l'humus est plus ou moins rapidement attaqué et finit par repasser à l'état de molécules simples. Ces molécule peuvent êtres :

- Perdue dans l'atmosphère
- Absorbées par les plantes
- Adsorbées par l'argile et l'humus
- Perdues par lessivage.

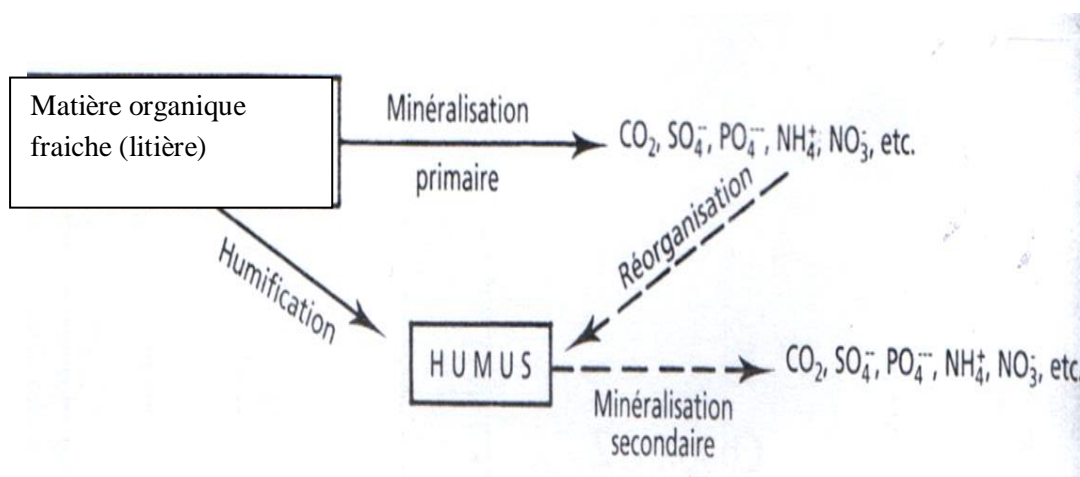


Fig.4 : Décomposition de la matière fraîche

## 2- La texture du sol

**2.1. Les classes de la texture :** La texture du sol, est classée dans quatre catégories principales :

- **Texture sableuse (sandy) :** sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en élément nutritif, faible capacité d'échange cationique.
- **Texture limoneuse (silty) :** l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques.
- **Texture argileuse (clayey) :** c'est un sol chimiquement riche mais à mauvaises propriétés physiques, avec un milieu imperméable et mal aéré qui forme un obstacle à la pénétration des racines et un travail du sol difficile.
- **Texture équilibrée (franche loamy) :** elle correspond à l'optimum dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts ; exemple de granulométrie favorable à la culture : 25% d'argile, 30-35% de limons, 40 à 45% de sables.

## 2.2. Méthodes de détermination de la texture

La texture peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite de l'analyse granulométrique qui permet, précisément, de déterminer les proportions des diverses particules, réparties en classes de dimensions.

### 2.2.1. Détermination de la texture au terrain (au toucher)

Certains spécialistes, notamment agronomes et pédologues, savent déterminer approximativement, après humidification, si le sol est plutôt argileux, limoneux ou sableux. En effet, l'argile colle aux doigts, au toucher le limon est doux et le sable rugueux.

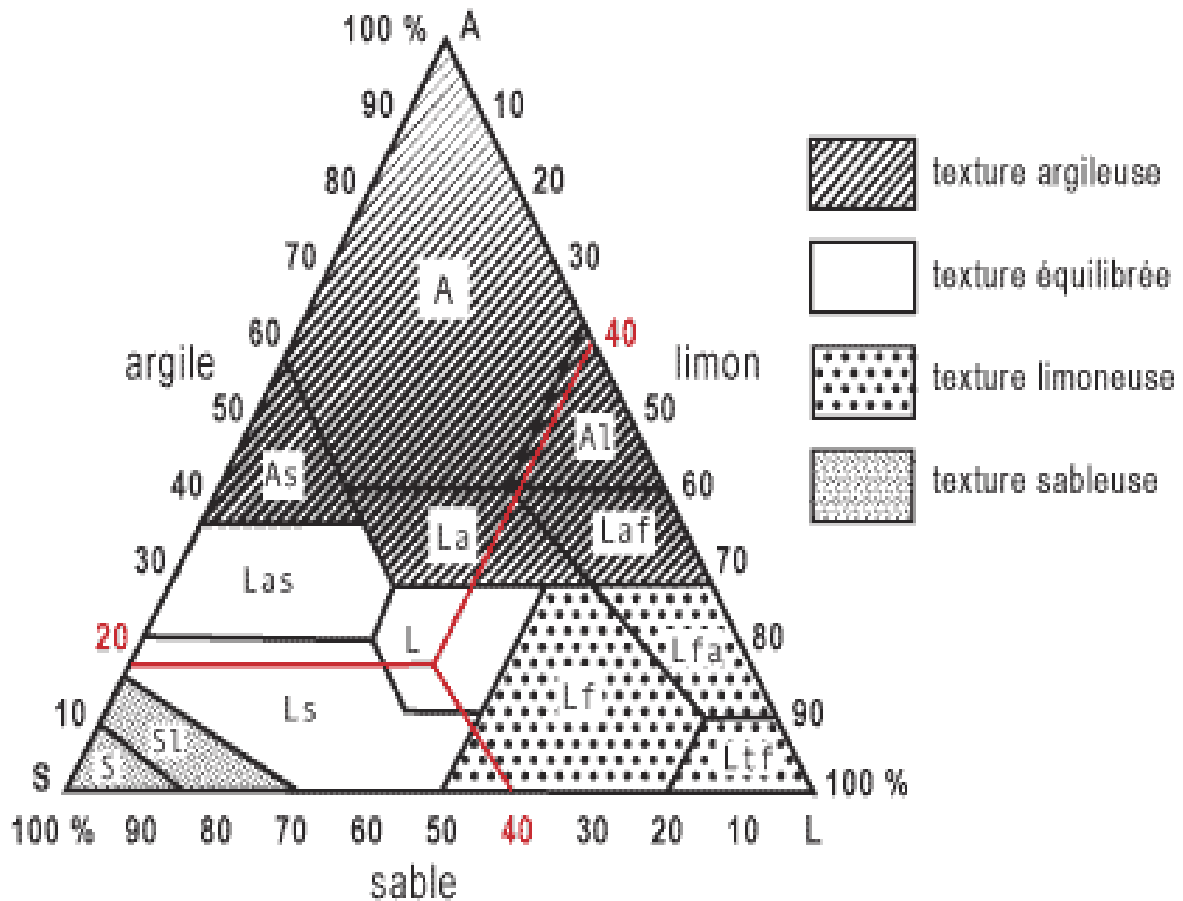
Tableau 2 : Test d'estimation de la texture dominante d'un sol

test	résultat	Conséquence sur la texture
Toucher de la terre sèche	Soyeux ou talqueux	Abondance de limons fins
	Savonneux	Abondance de limons grossiers
	Rugueux	Sables grossiers
Réalisation d'un boudin de terre humide	Possible	$A > 10 \%$
	Impossible	$A < 10 \%$
Réalisation d'un anneau avec le boudin de terre	Fissuration avant 1/2 fermeture de l'anneau	$L > A$ $A < 30 \%$
	Fissuration au 3/4 de la fermeture	$L < A$ $A < 30 \%$
	Anneau réalisable	$A > 30 \%$
D'après A. Fleury et B. Fournier, INA P.G.		

### 2.2.2. Détermination de la texture au laboratoire

De retour au laboratoire, pour déterminer plus finement sa texture, on évalue pour cet échantillon de sol la teneur en sable, en argile et limon. Ensuite on utilise un diagramme qui permet de déterminer la classe texturale du sol, on le dit par exemple limoneux, argilo-sableux, limono-argilo-sableux...

Par exemple, si le sol a 40 % de sable, on trace la parallèle au côté *limon* et séquent au côté *sable* à 40 %. De même pour 20 % d'argile, on trace la parallèle au côté *sable* et séquent au côté *argile* à 20 %. Le point de rencontre des deux droites correspond à la texture de ce sol. La troisième parallèle permet de déduire la teneur en limon (40 % dans cet exemple).



- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| A : argileux                  | L : limoneux                 |
| As : argilo-sableux           | Ls : limono-sableux          |
| Al : argilo-limoneux          | Lfa : limoneux fins argileux |
| La : limono-argileux          | Lf : limoneux fins           |
| Laf : limono-argileux fins    | Ltf : limoneux très fins     |
| Las : Limono-argileux sableux | Sl : sablo-limoneux          |
|                               | S : sableux                  |

Figure 5 : le triangle texturale

**Exemple : 20% argile, 40% sable, 40% limon —> texture limoneux**

5% argile, 90 % sable, 5% limon —> texture sableux

40% argile, 50% sable, 10% limon —> texture argilo- sableux

10% argile, 20% sable, 70% limon —> texture limoneux fin

30 % argile, 60% sable, 10% limon —> texture limoneux argilo-sableux

### 3- La structure du sol

**3.1. Définition de la structure du sol:** c'est le mode d'assemblage, à un moment donné de ses constituants solides.

**3.2. Définition de l'agrégat :** c'est l'élément structural de base, est défini par des formes géométriques plus ou moins régulières et peut contenir tous les éléments de la terre fine (S, L, A), éventuellement des graviers voir même des cailloux.

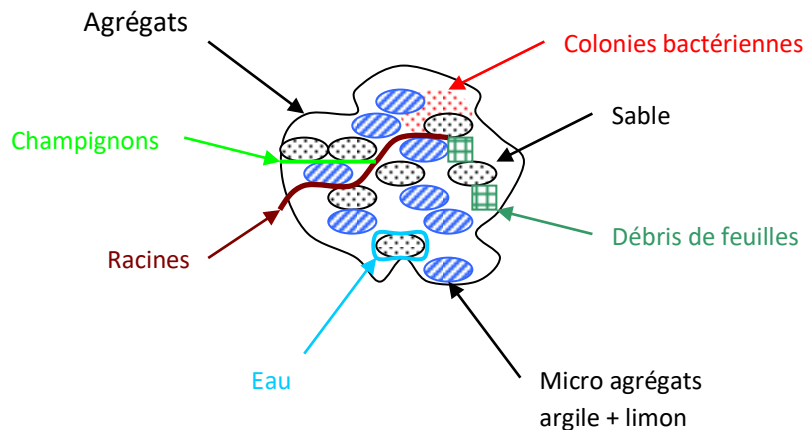


Fig.6 : Construction d'un agrégat

### 3.3. Les agents de la formation des agrégats (de la structure)

Se développe sous l'action de facteurs externes : le climat, activité biologique, l'action de l'homme.

Les particules élémentaires sont maintenues ensemble grâce à la présence de ciments colloïdaux (argile et matière organique) et des oxydes et hydroxydes.

- Les agents de cimentation les plus importants qui participent activement à la formation de la structure du sol sont selon l'ordre d'importance : les gommes microbiennes (polysaccharides) > oxydes de fer > matière organique > argile.
- L'activité microbienne soutenue par la matière organique, qui est en relation étroite avec la formation des agrégats. Les micro-organismes peuvent intervenir de diverses manières :
  - Par le mycélium des champignons, qui relie les particules de sol
  - Par les polysaccharides et autres produits du métabolisme microbien qui agissent comme agent de cimentation

- Certains micro-organismes produisent des substances chargées (+ ou -) qui forment un lien entre les particules minérales du sol.
- Les agrégats du sol peuvent être formés par le gel et le dégel

**3.4. Types et classes de structure du sol :** il y a principalement trois types de structure :

**3.4.1. La structure particulaire**

Un sol ou un matériau sans structure est constitué en grande partie par des particules élémentaires non associées entre elles par des forces de cohésion

Exemple : sable de mer, sable dunaire....

Elle se caractérise par une capacité d'infiltration très élevée mais une capacité de rétention très réduite, le sol est donc incultivable. Cependant, il existe une flore spécifique adaptée à ces conditions particulières, avec par exemple des racines profondes et une transpiration réduite.

**3.4.2. Structure compacte (continu) :**

Toute la couche du sol ou la face d'un profil (ou d'un horizon) forme alors un bloc unique. À l'opposé de la structure particulaire, elle limite fortement l'infiltration de l'eau dans le sol qui s'engorge ou le dit saturé en eau. Ce sol s'appauvrit en oxygène et devient difficilement pénétrable par les racines. Cependant, certaines plantes tolèrent ces conditions de vie.

Il y a trois types de la structure continue :

- La structure continue de type ciment : la majorité des éléments sont très fins.
- La structure continue de type grès : où les éléments sableux sont prédominants en volume
- La structure continue de type poudingue ou brèche : où les éléments grossiers sont prédominants en volume






**3.4.3. Structure fragmentaire**

C'est la structure dominante des sols agricoles. Elle est caractérisée par l'assemblage, par un liant des particules élémentaires en unités structurales de base appelées **agrégats** est suffisamment espacé pour permettre à la fois une infiltration et une rétention suffisante de l'eau nécessaire à la végétation. De plus ceci favorise les interactions chimiques, donc le bon fonctionnement des cycles de l'azote, du carbone, du phosphore et du soufre : c'est la structure la plus intéressante pour l'agriculture. Il existe trois types de structure fragmentaire :

- La structure feuilletée
- La structure anguleuse
- La structure sphérique

La structure sphérique, qui compris la structure grumeleuse ; c'est la meilleure structure sur le plans agricole.

Tableau 3: types et classe de la structure

ASPECT DES AGRÉGATS	STRUCTURE	POROSITÉ	PÉNÉTRATION RACINAIRE
	Polyédrique	Moyenne	Variable
	Grenue	Élevée	Bonne
	Grumeleuse	Très élevée	Très bonne
	Lamellaire	Faible	Mauvaise, racines déviées
	Prismatique	Faible	Racines localisées sur la surface des prismes



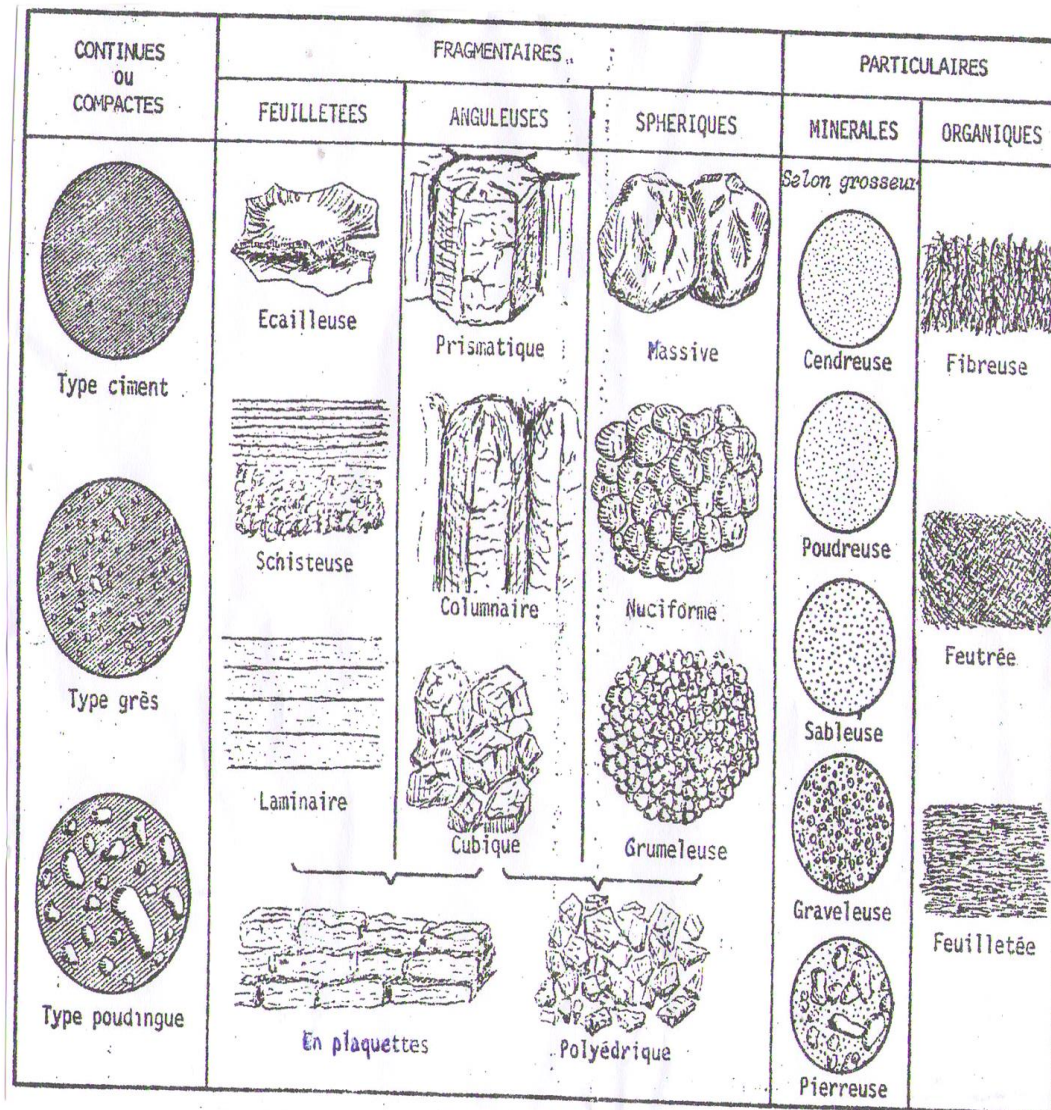


Fig. 7 : les types de structure

**3.5. Les facteurs de dégradation de la structure :** la détérioration de l'édifice structural se manifeste au champ par divers phénomènes :

**3.5.1. La battance :** l'impact des gouttes de pluie (effet splash), provoque le délitement (casse) des mottes jusqu'à l'apparition et l'isolement des particules élémentaires. Le transport des particules élémentaires mises en suspension et leur dépôt plus loin formant une surface lisse de l'ordre de quelques cm, appelée croûte de battance. Cette croûte acquise après

dessiccation une très forte cohésion, qui constituera un obstacle sérieux au transfert des fluides et à la levée végétative.

**3.5.2. La prise en masse :** elle a lieu généralement pendant les périodes pluvieuses à excès pluviométrique et concerne particulièrement l'horizon travaillé (labouré). Après dessiccation, les particules se ressoudent pour donner une structure continue compacte à forte cohésion.

**3.5.3. L'action de gel dégel :** l'alternance des cycles de gel dégel peut occasionner des dégâts spectaculaires sur la structure du sol. Pendant la période du dégel, l'eau remonte des horizons sous-jacents vers l'horizon superficiel encore gelé, alors par un dégel humide, le sol est transformé brutalement en une boue.

**3.5.4. Le tassement :** peut résulter de l'action anthropique (action des outils de travail du sol, des pneumatiques, piétinement).

### **3.6. Les facteurs qui améliorent la structure du sol**

**Les amendements minéraux :** le chaulage (amendement calcaire et gypseux) rend les sols argileux plus perméables en favorisant la floculation des particules solides élémentaires et rend les sols donc plus faciles à travailler.

#### **Les amendements organiques**

Le fumier, les pailles, les engrais verts (prairie naturelle), les résidus urbains et industriels (compost, boue résiduaire).

#### **Pratiques culturales**

- Eviter de travailler le sol en temps trop humide pour éviter un éventuel tassement par les pneumatiques des machines et un lissage par les instruments de labour ; donc le temps que le sol se ressuie.
- Eviter de travailler le sol toujours à la même profondeur, pour éviter la création d'une semelle de labour, préjudiciable à l'enracinement.
- Labourer selon les courbes de niveau dans les sols en pente.
- Evacuer les eaux excédentaires par un drainage adéquat

### 3.7. Conséquences de la structure du sol

#### La porosité

##### Généralité

La porosité du sol, est fonction de la *texture*, de sa *structure* et de *l'activité biologique* qui s'y développe. Plus les éléments texturaux sont gros plus les vides laissés entre eux sont de grande taille, sauf si en même temps des particules plus fines viennent se loger dans ces vides aménagés par les grosses particules ou bien si ces mêmes vides sont comblés par des ciments colloïdaux.

**Définition de la porosité 1:** la porosité du sol, appelée aussi *espace poral* ou *ensemble des vides* ou encore *ensemble de pores*, est occupée par les phases liquide et gazeuse du sol. Cet espace peut être aussi emprunté par les racines et les microorganismes du sol.

**Définition de la porosité 2 :** définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total du sol (aussi appelé le volume apparent), permet aussi de caractériser les espaces entre les particules de sol :

$$P \% = \frac{Vv}{Vv+Vs}$$

La porosité des sols agricoles va de 25 % (sols compactés) à 60% (sols bien agrégés, riche en MO, avec une biomasse importante...)

#### Les types de porosité

La porosité du sol est subdivisée en deux catégories :

**Porosité texturale :** les pores formés sont la conséquence de l'arrangement des particules solides du sol donc elle est en fonction de la texture du sol.

**Porosité structurale :** l'origine des pores est le résultat de l'action naturelles ou anthropiques ayant favorisé la formation des vides lors de la structuration du sol (cycle d'humectation/dessiccation, labour...). On distingue deux sous-ensembles dans la porosité totale :

**Macroporosité :** constitué de macropores (fentes de retraits, galeries des vers de terre, chenaux racinaires...) dans laquelle circule les fluides (eau, gaz) et dont la taille des pores est supérieure généralement à 30µm.

**Microporosité :** constitué de micropores (petites fissures, pores d'entassement...), dans laquelle est stockée l'eau. La taille des micropores est généralement inférieure à 8 ou 10 µm.

### **Facteurs influençant la porosité du sol**

Tous les facteurs et agents qui détruisent la structure du sol, ont une action néfaste sur la porosité du sol (tassement, impact des gouttes de pluie, piétinement...). De même que toute amélioration de la structure du sol a pour conséquence une augmentation de la porosité du sol, surtout dans des sols à texture fines tels que les sols argileux. C'est ainsi que l'addition de matière organique, de fumier ou d'agents de floculation (chaux), l'activité biologique (travail des vers de terre et petites insectes), le labour augmente la porosité.

## Chapitre 01: l'eau dans le sol

### Introduction

La valeur d'un sol, en tant que milieu adapté à la croissance végétale, ne dépend pas seulement de la présence et de la quantité d'éléments nutritifs chimiques, mais aussi de l'état du mouvement de l'eau et de l'air ainsi que des propriétés chimiques et du régime thermique du sol.

L'eau est un constituant essentiel du sol (15 à 35 % en volume). Son rôle comme vecteur des ions en solutions et comme produit indispensable à la vie des plantes. Et elle joue un rôle considérable dans la genèse des sols et leurs évolutions.

### 1- Les phases constitutives du sol

Le sol est constitué de trois phases (fig.1, 2 et 3):

**Phase solide** : représenté par les particules solides organiques et minérales.

- Les particules solides organiques, constituent des débris des végétaux (feuilles, les petits rameaux), la faune du sol (fourmis, insectes, lombrics, escargots)...
- Les particules solides minérales, constituent de gravier, sable, argile, limon.

**Phase liquide** : représenté par l'eau et les éléments minéraux dissous (solution du sol).

**Phase gazeuse** : représenté par l'air ou par l'atmosphère du sol (oxygène, gaz carbonique, azote.....) tableau 1.

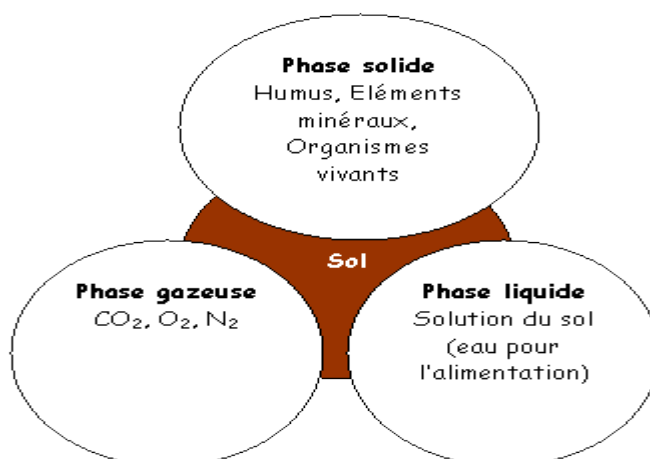


Fig. 01 : Les trois phases du sol



Fig.02 : Composition moyenne du sol

Tableau 1 : Composition de l'air du sol

constituant	oxygène	azote	Gaz carbonique	Vapeur d'eau	gaz divers
<b>Air du sol %</b>	18-20.5 en sol bien aéré 10 après une pluie 2 en structure compacte	78.5 à 80	0.2 à 3.5	Généralement saturé	Trace de H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, Ar En anoxie : NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub>

2- Relation entre les trois phases du sol

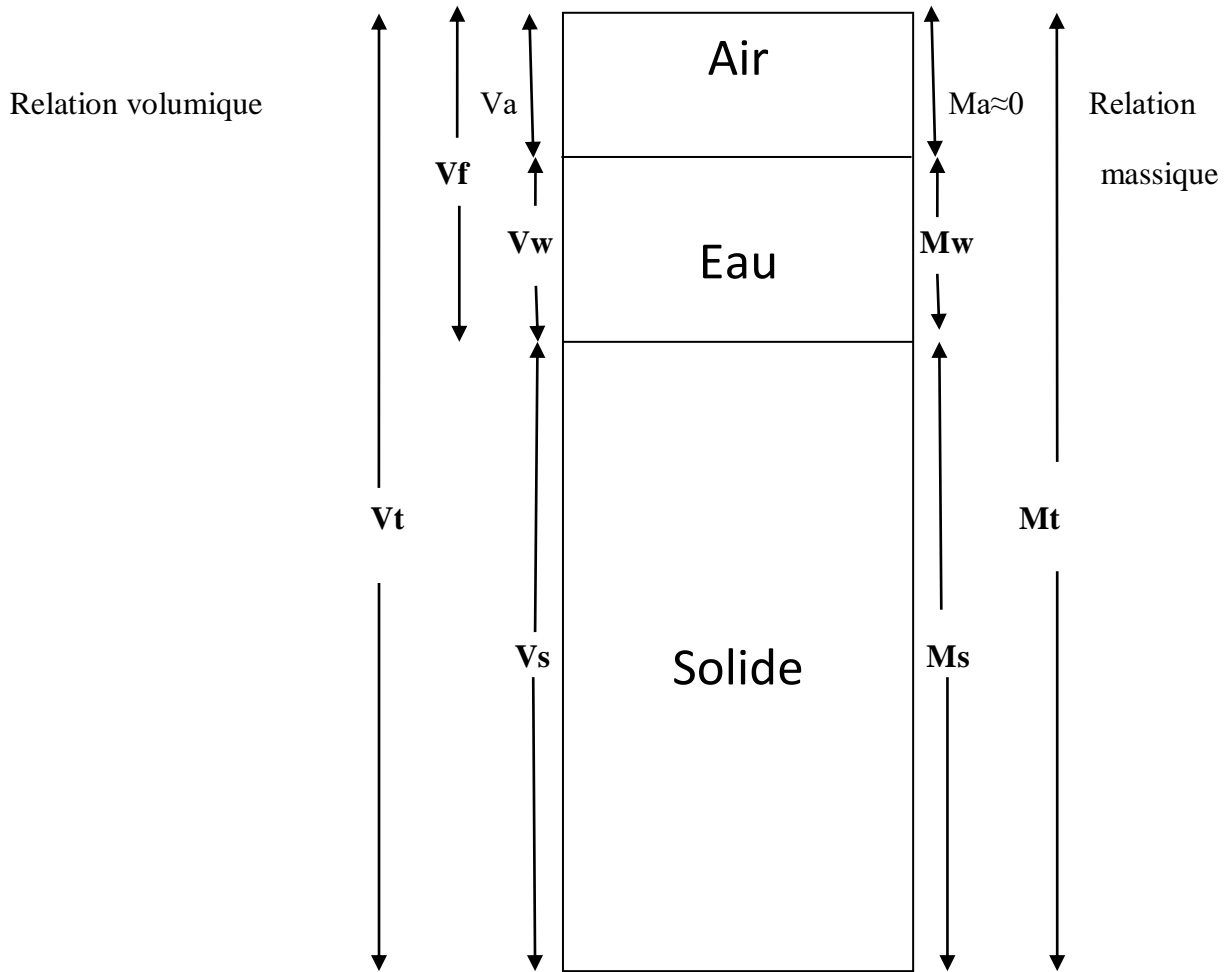


Fig.3 : Schéma montrant les trois phases du sol

**Quelques expressions**

**Teneur en eau massique :** La teneur en eau massique  $W$  (appelée aussi pondérale) correspond au rapport entre la masse d'eau  $M_w$  contenue dans le sol et la masse du sol sec  $M_s$  :

$$W \% = \frac{M_w}{M_s}$$

Le sol sec est défini de façon standard comme l'état du sol séché à une température de 105°C.

**Teneur en eau volumique :** La teneur en eau volumique  $\theta$  correspond au rapport entre le volume d'eau  $V_w$  contenu dans le sol et le volume total des trois phases  $V_t$  (liquide, solide, gazeuse) du sol :

$$\theta \% = \frac{V_w}{V_t}$$

**Indice des vides :** L'indice des vides  $e$  correspond au rapport entre le volume des fluides  $V_f$  (volume de l'eau + volume de l'air) contenu dans le sol et le volume du solide  $V_s$  :

$$e \% = \frac{V_f}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s}$$

**Taux de saturation en eau :** le taux de saturation en eau  $\theta_s$  correspond au rapport entre le volume d'eau  $V_w$  contenu dans le sol et le volume des fluides  $V_f$  :

$$\theta_s \% = \frac{V_w}{V_f} = \frac{V_w}{V_a + V_w}$$

### 3- 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 utilisable par la plante et l'eau non utilisable par la plante.

#### 3.1. L'eau de gravité

L'eau de gravité, n'existe dans le sol que dans les heures ou les jours qui suivent une précipitation, ou en cas de nappe phréatique permanente.

L'eau de gravité circule dans les pores grossiers et moyens (supérieurs à 10  $\mu\text{m}$ ), le plus souvent verticalement, parfois aussi obliquement.

L'eau de gravité à écoulement vertical se subdivise en deux parties :

- L'eau de gravité à écoulement rapide : qui circule dans les pores grossiers (supérieurs à 50  $\mu\text{m}$ ), dans les quelque heures qui suivent les pluies.
- L'eau de gravité à écoulement lent : qui descend lentement (souvent plusieurs semaines) dans les pores moyens de diamètre compris entre 50  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ .



### 3.2. L'eau utilisable par la plante

Celle que retient par le sol, soit à l'intérieur de fins canaux ou soit sous forme de films assez épais autour des éléments solides. Elle occupe les pores fins de diamètre compris entre 0.2 et 50  $\mu\text{m}$  à la surface des particules.

### 3.3. L'eau inutilisable par la plante

L'eau formant autour des éléments solides, des films minces ou même de fines gouttelettes de vapeur d'eau condensée (eau hygroscopique). Cette eau, trop énergiquement retenue, ne peut être absorbée.

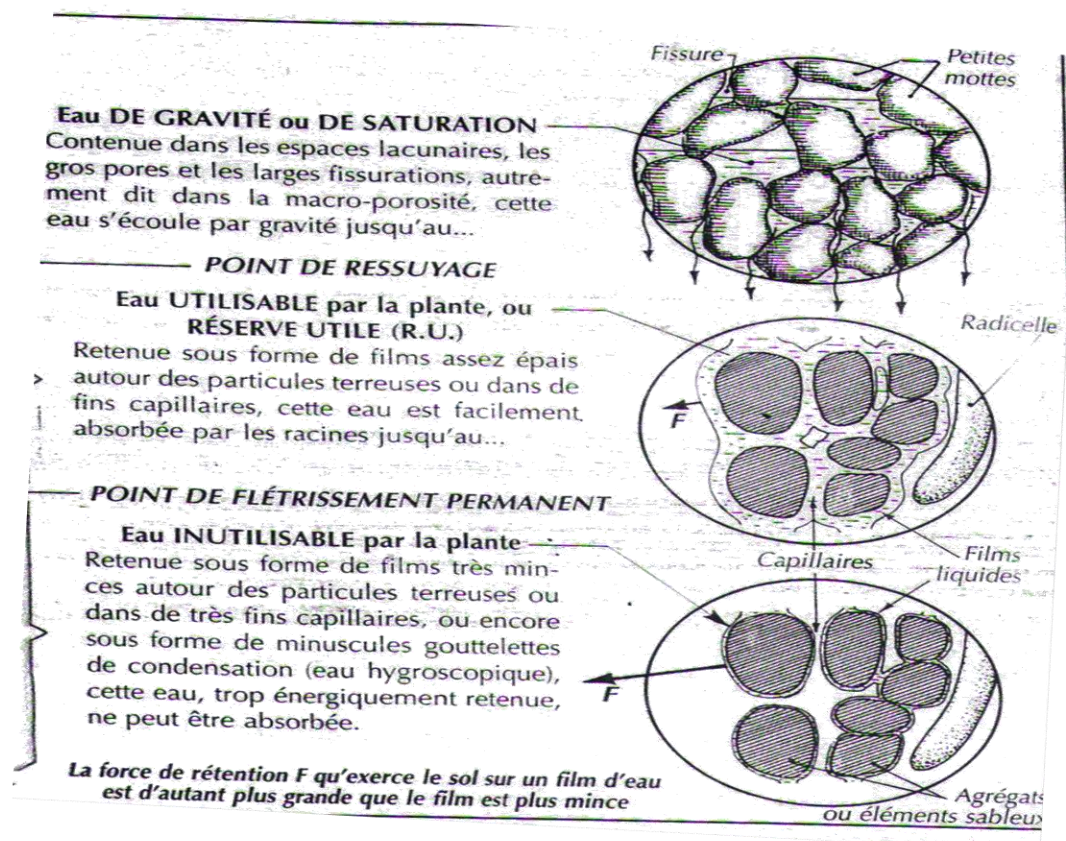


Fig. 3 : Les trois états de l'eau dans le sol

#### 4- Les forces agissent sur l'eau du sol

Trois forces agissent sur l'eau du sol : la gravité  $P$ , la succion des racines  $S$ , et la succion de la terre  $F$ .

- L'eau formant autour des éléments solides des films d'épaisseur variable, la force qu'exerce le solide sur une molécule d'eau est d'autant plus intense que cette molécule est plus proche de lui ; c'est la **force de succion de la terre**.

- Au delà d'une certaine distance, la force d'attraction (suction de la terre) est plus faible que la pesanteur : l'eau s'écoule par **gravité**.
- Quand la force de la suction de la terre et la force de la pesanteur s'égalisent, le point de ressuyage, ou l'humidité a la capacité au champ, est atteint. L'utilisation de l'eau par la plante est possible tant que la force de suction des racines est supérieure à celle qu'exerce le sol sur l'eau.

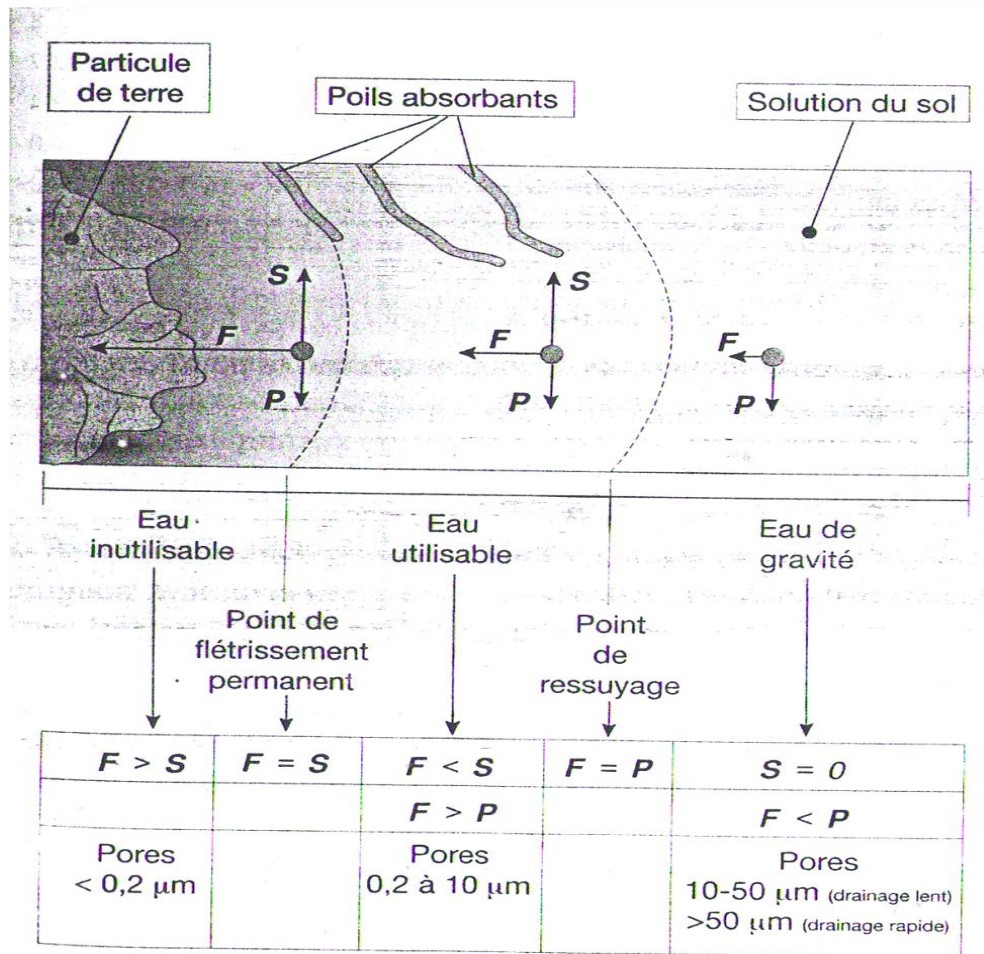


Fig.4 : Les forces exerçant sur l'eau du sol

### 5- Le potentiel de l'eau du sol

L'équilibre de l'eau dans le sol est sous la dépendance de la pesanteur, des sels dissous, de la porosité et de la pression de la phase gazeuse. Chacun de ces facteurs donne à l'eau une certaine énergie potentielle.

**Le potentiel matriciel** : correspond aux forces exercées par la phase solide sur l'eau du sol. Il varie avec l'état de dessèchement du sol. Pour extraire l'eau du sol, dans les divers états de

ressuyage et de dessèchement, il faudra donc exercer une pression déterminée pour chaque état. La force de succion du sol pour l'eau s'exprime, soit en bars, soit kilo pascals (kpa), soit en cm d'eau, soit s'exprime en pF....

Le potentiel de l'eau du sol peut varier de 0 en sol saturé à 10000 atmosphère en sol sec.

Les valeurs de pF sont comprises entre 0 pour l'eau très faiblement retenue par le sol et 7 pour l'eau fortement absorbée sur la surface des particules (tableau 1).

Tableau 2 : Correspondance des expressions de pression statique

<b>Bars</b>	Kilo pascals	Atmosphère	mm de mercure	Hauteur équivalente en cm d'eau	<b>pF</b>
0.001	0.1	0.000987	0.75	1.017	0
0.01	1	0.00987	7.50	10.17	1
0.1	10	0.0987	75	103	2
<b>0.33</b>	33	0.328	250	344	<b>2.5</b>
0.5	50	0.493	375	511	2.7
1	100	0.9869	750.1	1017.1	3
10	1 000	9.869	7501	10171	4
<b>15</b>	1 500	15.2	11251	15499	<b>4.2</b>
100	10 000	98.69	75010	101710	5
1 000	100 000	986.9	750100	1017100	6
10 000	1 000 000	9869	7501000	10171000	7

## 6- Les valeurs caractéristiques de l'humidité du sol

Deux valeurs offrent une importance particulière : la capacité au champ et le point de flétrissement.

### 6-1. La capacité au champ ou capacité de rétention

Correspond à l'eau retenue par le sol, après une période de pluies, et un ressuyage de deux ou trois jours. Il peut être mesuré sur le terrain préalablement gorgé d'eau, après 48 heures de ressuyage. Elle est mesurée à l'aide d'un tensiomètre.

Cependant, pour les sols à mauvaise perméabilité, le ressuyage peut demander très longtemps, parfois plus de 10 à 15 jours. C'est pourquoi, on la détermine au laboratoire par la presse à membrane (marmite de richard), par centrifugation, ou par la méthode de Bouyoucos (entonnoir Buchner).

## 6.2. L'humidité au point de flétrissement

Correspond à la valeur limite de l'eau liée, donc non absorbable par les racines. On la mesure, soit par la méthode biologique (mesure de l'humidité du sol lorsque la plante se fane), soit au laboratoire par la presse à membrane ou par centrifugation.

### L'eau utile

C'est la quantité d'eau stockée par le sol, après une période de pluies, qui est donnée par la différence entre la capacité de rétention et le point de flétrissement. On peut l'exprimer en % ou mieux en millimètres ce qui est à l'avantage de permettre des comparaisons avec la pluviométrie et l'évapotranspiration également exprimées en millimètres.

**RU%** = taux d'humidité à la capacité de rétention – taux d'humidité au point de flétrissement

**RU mm** = (taux d'humidité à la capacité de rétention – taux d'humidité au point de flétrissement) x  $d_a$  x P.

$d_a$  : densité apparente en  $g/cm^3$

P : la profondeur en dm

- La texture du sol a une influence directe sur les taux d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement (et par conséquent sur la RU) comme le montre le graphique à droite (figure 5):
  - les sols sableux présentent de faibles capacités de rétention en eau, ce qui implique de plus faibles RU.
  - les sols à forte proportion de particules fines (limons et argiles) emmagasinent davantage d'eau ; en contrepartie, une grande partie de ces réserves en eau restent indisponibles pour les plantes.
  
- Autres points d'importance :
  - les éléments grossiers (éléments du sol dont la taille est supérieure à 2 mm : cailloux, graviers...) ne permettent pas de stocker l'eau. Les sols à forte proportion d'éléments grossiers possèdent par conséquent une RU limitée.
  - les matières organiques présentent des capacités de rétention plus élevées que les argiles. Par contre, elles restituent l'eau plus difficilement. Le bilan des apports de matières organiques est toutefois positif sur la RU, d'où leur intérêt en culture en sec.

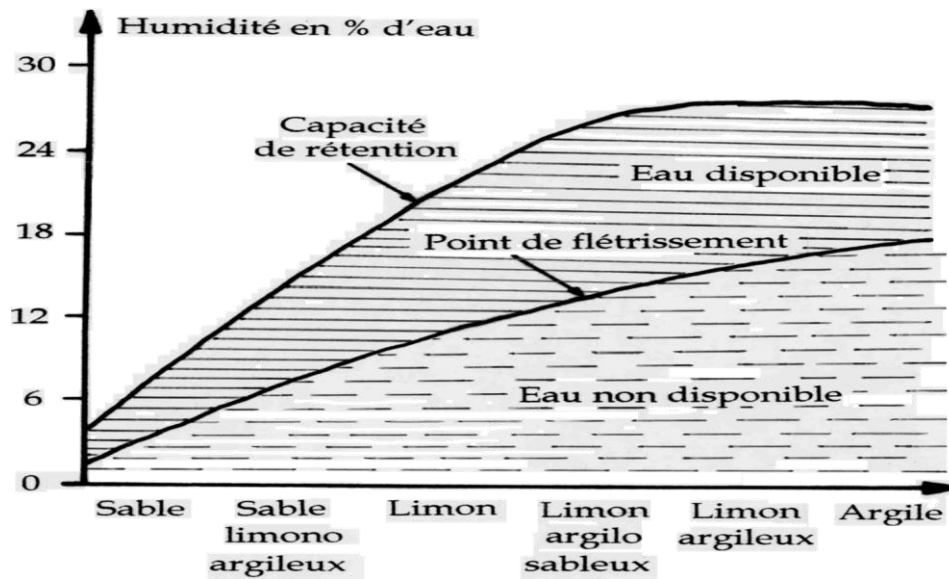


Figure 5: Eau contenue dans le sol selon sa texture

## 7- Les mouvements de l'eau dans le sol

Les mouvements de l'eau dans le sol relèvent de deux processus opposés : les mouvements descendants et les mouvements ascendants de l'eau.

**7.1. Mouvements descendants de l'eau de gravité (perméabilité):** les mouvements descendants de l'eau de gravité, qui s'infiltrer après les pluies et qui sont liés à la perméabilité du profil.

La perméabilité dépend de la texture mais surtout de la structure.

Les sols perméables sont les sols :

- A texture grossière où dominant les sables et graviers peu enrobée de colloïdes.
- A texture fine, mais à structure fragmentaire surtout grumeleuse

Les sols imperméables sont :

- Les sols à texture fine, très riches en limon mais pauvres en argile et en humus.
- Les sols à dominance d'argile, surtout en l'absence de calcaire et d'humus.

**7.2. Mouvements ascendants :** l'eau se déplace d'un point plus humide vers un point moins humide par exemple quand le sol s'alimente à partir d'une nappe plus ou moins profonde, l'eau se déplace de la nappe d'eau vers la surface et il est capable de réhumecter constamment les niveaux asséchés par les racines ou par l'évaporation.

## 8- Bilan hydrique du sol

**Définition :** le bilan hydrique du sol, représente la quantité d'eau qu'il peut contenir en fonction du temps (bilan mensuel ou décadaire), ses quantités sont déterminées en comparant les entrées et les sorties d'eau du système sol – plante – atmosphère (fig.5).

### Les entrées d'eau

- Les précipitations : données par l'enregistrement des stations météorologiques,
- l'irrigation
- les précipitations secondaires (rosé, brouillard)
- remonté capillaire.

### Les sorties d'eau

- Evapotranspiration: évaporation des surfaces nues + transpiration des plantes
- Drainage : la quantité d'eau qui quitte la zone exploitée par les racines par infiltration
- Ruissellement : dépend de la perméabilité du sol, sa pente et de l'intensité des précipitations

- **Evapotranspiration potentielle ETP :** est théoriquement la quantité maximale d'eau que cède à l'atmosphère, par transpiration de la plante et par évaporation du sol.

L'ETP est une mesure climatique effectuée à partir de relevées météorologique selon la formule de Turc.

$$ETP_{\text{mensuelle}} \text{ (mm)} = 0.4 (I_g + 50) T / T+15$$

$I_g$  : valeur moyenne mensuelle (ou décadaire) de la radiation solaire globale cal/cm<sup>2</sup>/jour

$T$  : température moyenne mensuelle (ou décadaire = 10 jours)

0.4 : le coefficient utilisé pour calculer l'ETP mensuelle (pour ETP décadaire, le remplacer par 0.13)

- **Evapotranspiration réelle ETR :** correspond à l'évaporation du sol et à la transpiration des cultures, qui s'alimentant avec les réserves hydriques du sol et la pluviosité, et dont les besoins en eau ne sont pas forcément couverts en totalité.

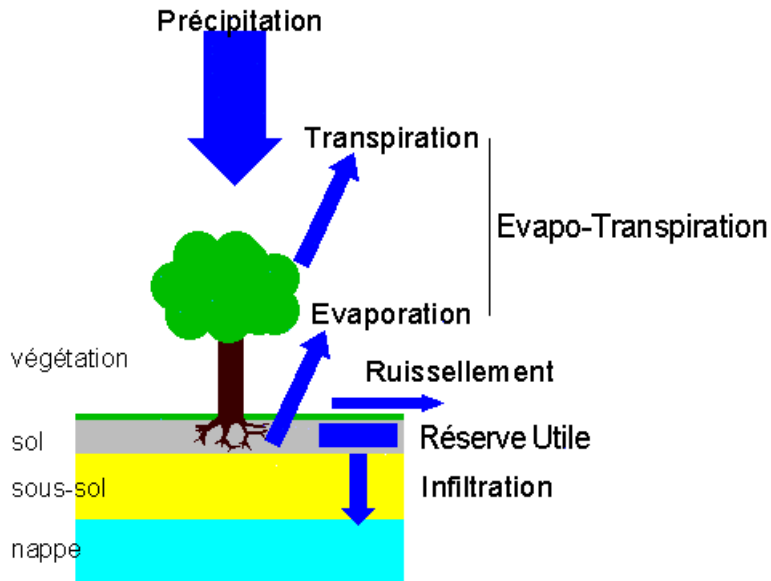


Figure 6 : Place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau

Tableau 3 : Exemple de bilan hydrique pour un sol de France (RFU = 100mm)

mois	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	total
P	28.6	53.4	70.3	41.4	86.5	14.1	64.3	9.1	56.2	39.4	11.8	30	505.1
ETP	40	9.2	17.1	16.2	35.1	50.9	80.9	120.6	104.7	14.32	118.7	67.4	804
P-ETP	-11.4	44.2	53.2	25.2	51.4	-36.8	-16.6	-111.5	-48.5	-103.8	-106.9	-37.4	-298.9
RFU	0	44.2	97.4	100	100	63.2	46.6	0	0	0	0	0	451.3
drainage	0	0	0	22.6	51.4	0	0	0	0	0	0	0	74
ETR	28.6	9.2	17.1	16.2	35.1	50.9	80.9	55.7	56.2	39.4	11.8	30	505.1

RFU: réserve facilement utilisable

RFU= 1/2 RU ou bien RFU= 2/3 RU