



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي - الأغواط -  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI -LAGHOUAT -

قسم العلوم الفلاحية  
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

## Cours

---

# AGRONOMIE I

---

Cours destinés aux étudiants des sciences agronomiques licence II

*Dr. BENCHETTOUH Ahmed*

**2020/2021**

## **AVANT PROPOS**

L'Agronomie I est une matière d'enseignement fondamentale destinée aux étudiants inscrits en deuxième année licence sciences agronomiques. C'est une science ayant pour but d'étudier le sol et l'eau.

L'agronomie I examine les constituants du sol (minéraux, matières organiques), leur agencement (granulométrie, texture, structure, porosité), leurs propriétés physiques (transfert de l'eau et de l'air), leurs propriétés chimiques (rétention des ions, le complexe argilo humique), leurs propriétés biologiques (activité des microorganismes). Elle porte des diagnostics sur les types de sol (classification) et sur leur dynamique (en fonction du climat, de la topographie et de la formation végétale).

## **CONTENU DE LA MATIERE**

### **PARTIE I: LE SOL**

<b>DEFINITIONS :</b> .....	1
<b>INTRODUCTION :</b> .....	1

#### **CHAPITRE I : LES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SOL**

<b>1.1. LES CONSTITUANTS MINEREAUX :</b> .....	3
A- LES TROIS FAMILLES DE CONSTITUANTS DU SOL :.....	3
B- GRANULOMETRIE ET MINERALISATION :.....	4
C- PIERRES, GRAVIERS, SABLES ET LIMONS :.....	5
D- LA TEXTURE :.....	6
<b>1.2. LES CONSTITUANTS ORGANIQUES :</b> .....	7
A- LES 4 GROUPES DE MATIERES ORGANIQUES DU SOL ET LES ETAPES DE LEUR FORMATION :.....	8
A.1. Les végétaux et animaux vivants :.....	8
A.2. Les débris végétaux et animaux organisés, ou « matières organiques fraîches » :.....	8
A.3. Les « Produits Transitoires » :.....	8
A.4. L'Humus stable :.....	9
A.5. LES PROPRIETES DE L'HUMUS :.....	11
B- LES MATIERES ORGANIQUES, BASE DE LA FERTILITE DU SOL :.....	11
<b>1.3. LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE (COMPLEXE COLLOÏDAL) :</b> .....	12

#### **CHAPITRE II : L'ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS**

<b>2.1. COUVERTURE, PROFILS ET HORIZON PEDOLOGIQUE :</b> .....	15
2.2. STRUCTURE :.....	18
2.2.1. La structure fragmentaire :.....	19
2.2.2. La structure non fragmentaire :.....	19
<b>2.3. L'ATMOSPHERE DU SOL (air du sol : son volume et sa composition) :</b> .....	21
2.3.1. L'air occupe tous les vides que n'occupe pas l'eau :.....	21
2.3.2. L'air du sol a une composition moins stable que l'air atmosphérique :.....	21
2.3.3. La composition de l'air du sol varie, mais l'air se renouvelle :.....	21
2.3.3.1. L'activité biologique est la cause des variations de l'air du sol :.....	21
2.3.3.2. L'air des sols à bonne structure se renouvelle très rapidement par le phénomène de diffusion :.....	22
2.3.3.3. Le manque d'oxygène et l'excès de CO <sub>2</sub> du sol sont nuisibles et décelables :.....	22
<b>2.4. LA TEMPERATURE DU SOL ET SON EVOLUTION :</b> .....	23
2.4.1. L'absorption de la chaleur solaire par le sol dépend de son exposition et de ses caractéristiques physiques :.....	23
2.4.2. La combustion des matières organiques est une source annexe de chaleur :.....	24
2.4.3. La température du sol varie, mais la profondeur atténue ces variations :.....	24
<b>2.5. LA COULEUR DU SOL :</b> .....	25

#### **CHAPITRE III : LES PROPRIETES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU SOL**

<b>3.1. LES PHENOMENES D'ECHANGES DES IONS :</b> .....	25
3.1.1. LA SORPTION ET L'ECHANGE DES CATIONS :.....	26

3.1.1.1. Principaux facteurs réglant l'intensité des phénomènes de sorption et d'échange des cations :.....	27
A. La nature des colloïdes :.....	27
B. La nature des ions :.....	27
3.1.1.2. Le mécanisme de l'échange des cations :.....	29
<b>3.2. LA SORPTION ET L'ÉCHANGE DES ANIONS :.....</b>	<b>31</b>
<b>3.3. LES PROPRIETES ELECTRO-IONIQUES DU SOL :.....</b>	<b>31</b>
3.3.1. LES VALEURS CARACTERISTIQUES DU COMPLEXE ADSORBANT: CEC ET V% :.....	31
<b>3.4. LES ORGANISMES DU SOL :.....</b>	<b>33</b>
3.4.1. La faune du sol :.....	34
3.4.2. Le rôle de faune dans le sol :.....	36
3.4.3. La flore du sol :.....	37
<b>3.4. TRANSFORMATION D'ORIGINE MICROBIENNE :.....</b>	<b>40</b>

#### **CHAPITRE IV. CLASSIFICATION DES SOLS (NOTIONS)**

<b>4.1. LES DIFFERENTES CLASSIFICATIONS (RUSSE, AMERICAINE, FRANÇAISE) :.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2. APERÇU SUR LES SOLS D'ALGERIE ET LEURS RELATIONS AVEC LE CLIMAT ET LA GEOMORPHOLOGIE (d'après J.-H. Durand) :.....</b>	<b>42</b>
4.2.1. Les sols des régions sahariennes :.....	42
4.2.2. Les sols des régions semi-arides :.....	43
4.2.3. Les sols des régions telliennes humides :.....	43
4.2.4. Les sols «azonaux» (sols locaux) :.....	45

### **PARTIE II: L'EAU**

#### **CHAPITRE V : L'EAU ET LE SOL**

<b>5.1. LE ROLE DE L'EAU DU SOL :.....</b>	<b>48</b>
<b>5.2. RELATIONS ENTRE LES TROIS PHASES DU SOL :.....</b>	<b>48</b>
<b>5.3. MESURE DES VOLUMES OCCUPES PAR LES DIFFERENTES PHASES DU SOL :.....</b>	<b>49</b>
<b>5.4. LES FORMES DE L'EAU DANS LE SOL SONT LES MEMES LES ETATS DE L'EAU DANS LE SOL :.....</b>	<b>52</b>
<b>5.5. LES FORCES DE RETENTION DE L'EAU PAR LE SOL :.....</b>	<b>53</b>
<b>5.6. LE POTENTIEL DE L'EAU DANS LE SOL :.....</b>	<b>54</b>
<b>5.7. LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE SOL :.....</b>	<b>54</b>
<b>5.8. BILAN DE L'EAU DANS LE SOL :.....</b>	<b>55</b>
<b>5.9. BESOIN EN EAU DES VEGETAUX :.....</b>	<b>58</b>

# Matière : Agronomie I

---

## PARTIE I : SOL

### DEFINITIONS

Le sol c'est le volume de terre plus ou moins meuble, épais de quelques centimètres à quelques mètres, situé entre la lithosphère (roche mère) et l'atmosphère, qui recouvre plus ou moins en continu la surface des continents. L'ensemble des sols distribués spatialement forment la couverture pédologique.

Le mot "Sol" vient du latin "*solum*" qui signifie support, fondement, base, fond.

« Le sol agricole est la partie de la couche superficielle de l'écorce terrestre qui, grâce à sa structure meuble et à sa composition physico-chimique, est en mesure d'assurer un développement normal des végétaux cultivés».

Dokoutchaïev (1894) a créé la première chaire de pédologie. Celle-ci est une science qui étudie les sols. Il décrit la formation du sol au **fil du temps** comme l'interaction entre divers facteurs à savoir: **le climat, la nature de la roche mère, la flore, la faune et le relief**. On les appelle ainsi les facteurs de **pédogenèse** ou les facteurs de naissance du sol.

### INTRODUCTION

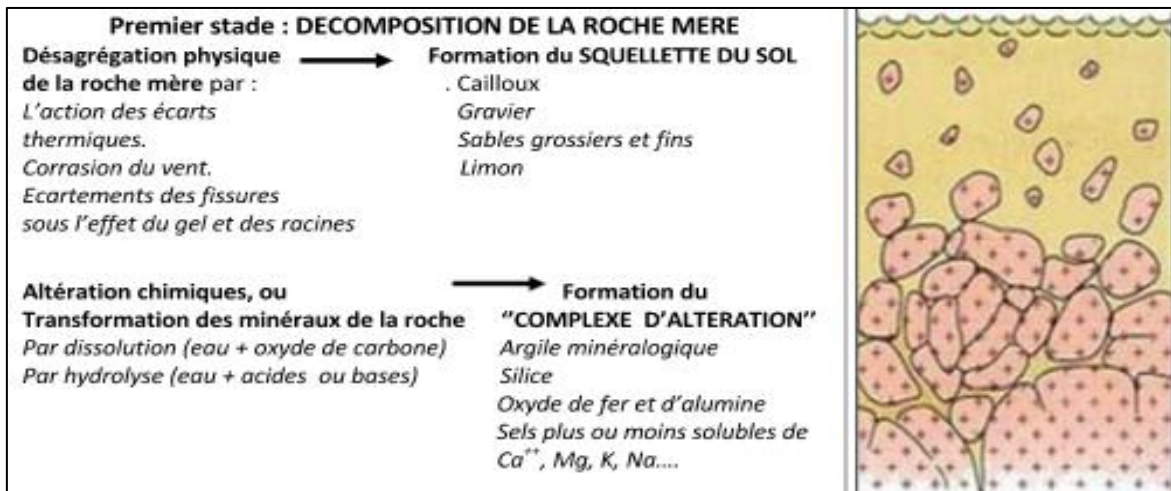
**L'agrologie s'intéresse au sol cultivable, c'est une science tournée vers la pratique.** L'agrologie (*ager* = champ ; *logos* = sciences), s'intéresse à la couche de terre que peuvent visiter les racines, et pas seulement à celle que peuvent travailler les instruments de culture, la terre arable.

#### **La formation et l'évolution du sol**

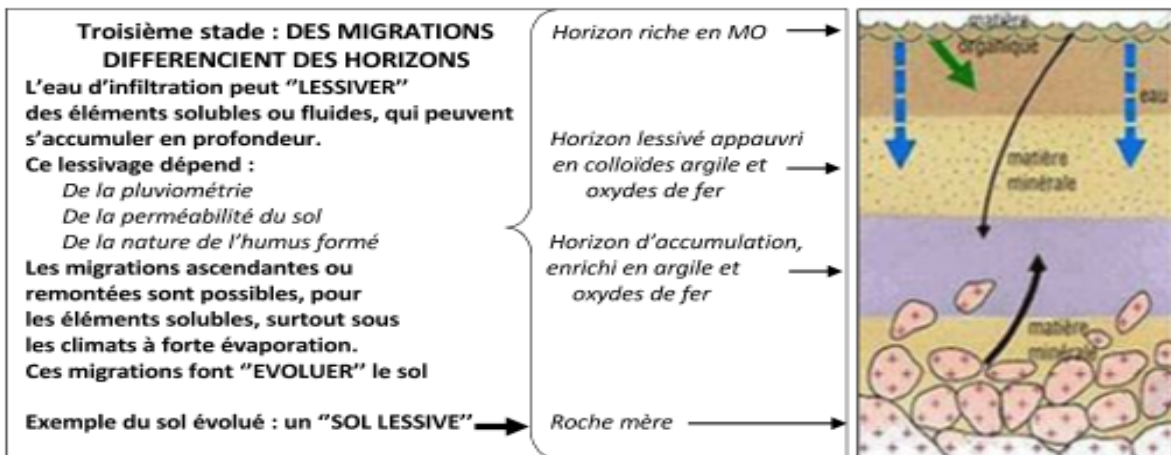
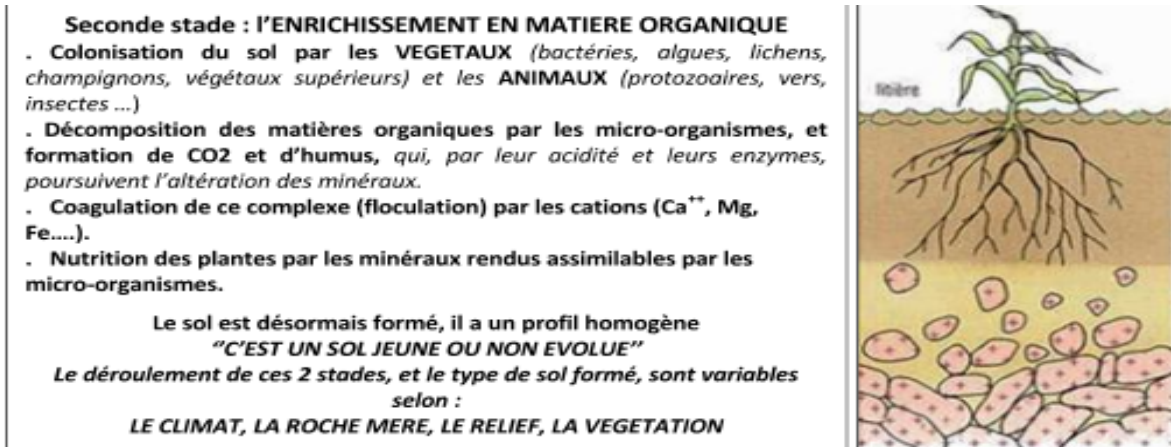
Le sol se forme sur la roche mère. Sa formation peut prendre des centaines voire des milliers d'années.

#### **Étape 1 : La dégradation d'une roche mère**

Tout commence au niveau **d'une roche mère**. Par le biais ses altérations mécaniques et chimiques, elle se fracture, se dégrade et s'altère. Le **Gel-dégel** engendre des craquements et des craquelures au sein de la roche, des fractures. **La pluie** induit également une altération chimique des minéraux présents dans la roche.



*Le sol peut également se former par accumulation d'éléments minéraux alluvionnés*



**Fig. 1. Résumé schématique des trois stades de la formation du sol (Soltner, 2014)**

## Étape 2 : La mise en place du sol

Le temps passe, et apparaît un début de colonisation de cette roche par des végétaux pionniers. Des spores arrivent, des grains, et à la suite d'une germination, apparaissent différents types de

végétaux pionniers comme les lichens, les mousses, etc., puis des plantes comme les fougères, etc. Ces végétaux, par leurs racines, exercent une action mécanique et altèrent la roche en poussant. Elles exercent également une action chimique puisque l'absorption racinaire produit des sorties d'ions, notamment des ions  $H^+$  très acides qui altèrent chimiquement la roche. Il a alors création d'une litière, un ensemble de débris végétaux, associés en dessous à l'humus, un mélange de matière organique en processus de décomposition par des microorganismes décomposeurs et de matière minérale.

Un horizon d'accumulation commence à se créer. Les éléments lessivés par l'eau s'accumulent ; c'est le début de la mise en place au sens strict du sol avec un ensemble de strates parallèles avec du mélange organique et du mélange minéral.

### **Étape 3**

Si le climat est propice à l'installation des végétaux, ces derniers se développent très diversifiés comme des arbres, des arbustes et des herbes, accompagnant d'une faune importante. Au niveau de celle-ci, des organismes indispensables à l'aération du sol sont les vers de terre, aussi appelés lombrics.

Les insectes, les champignons et les bactéries jouent un rôle important dans la décomposition de l'humus. La litière s'épaissit. En dessous, l'horizon d'altération de la roche-mère continue de se creuser: les végétaux ont des racines qui dégradent le sol mécaniquement et chimiquement, par des processus comme les sorties d'ions. Un sol est composé de divers horizons. On les nomme  $A_0$  pour la litière,  $A_1$  pour l'humus, B pour l'horizon d'accumulation et C pour l'horizon d'altération de la roche mère.

## **CHAPITRE I : LES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU SOL**

### **1.1. LES CONSTITUANTS MINEREAUX**

#### **A. LES TROIS FAMILLES DE CONSTITUANTS DU SOL**

Le sol est constitué de matériaux solides d'origine organique ou minérale, de matériaux liquides et de matériaux gazeux.

##### **1. Une phase solide comprenant : des constituants minéraux, que l'on peut classer :**

- **par la grosseur** : les cailloux et gravier, les sables grossiers et fins, les limons, l'argile granulométrique ;

- **par leur composition minérale** : le calcaire, les oxydes de fer, d'aluminium, de silicium, les phyllosilicates ;

- **des constituants organiques du sol** : débris végétaux et animaux et humus. Ces constituants proviennent des organismes du sol ou apportés par l'homme.

**2. La phase liquide ou la solution du sol** : composée d'eau dans laquelle sont dissoutes des substances solubles provenant à la fois de l'altération des roches et de la décomposition des matières organiques.

**3. La phase gazeuse** : composée des gaz que l'on trouve dans l'air ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ )

Quant à l'importance relative de ces trois fractions, elle est évidemment très variable d'un sol à l'autre. Par exemple, pour un sol classé dans la catégorie des limons moyens, on peut trouver les variations suivantes :

- **répartition en poids** : 81% constituants minéraux, 2% organiques, 17% phase liquide, 0% gazeuse.

- **répartition en volume** : 49% constituants minéraux, 3% organiques, 26% phase liquide, 22% gazeuse.

## **B. GRANULOMETRIE ET MINERALISATION**

La séparation des éléments de la terre fine est plus délicate ; il faut en effet briser les moindres agrégats, ce qui ne peut se faire que dans l'eau et les produits capables d'annuler tous liants qui les rassemblent. Le résultat est de dosage des sables grossiers et fins, des limons grossiers et fins et de l'argile granulométrique.

Les constituants minéraux, qui représentent 80% du poids de la terre humide, peuvent être classés :

- d'après leur grosseur : **c'est la granulométrie.**
- d'après leur nature chimique : **c'est la minéralogie.**

**Elément grossiers et terre fine** : le passage au tamis de 2 mm d'une terre séchée et pulvérisée permet de séparer d'abord :

- **la terre fine** de diamètre inférieur à 2 mm.
- **les éléments grossiers** de diamètre supérieur à 2mm. On les sépare en blocs (> 20 cm), pierre (20 cm à 5 cm), cailloux (5 cm à 2 cm), et graviers (2 cm à 2mm).

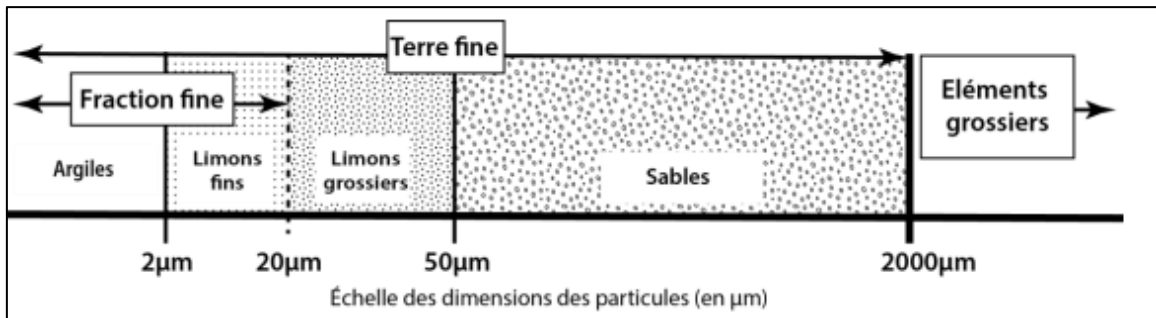


Fig. 2. Classes granulométriques

Dans les classes granulométriques, on distingue deux groupes :

- **des minéraux inaltérés** : ayant la même composition que la roche-mère dont ils proviennent.
- **des minéraux altérés** : provenant d'une modification chimique des minéraux de la roche-mère avec extrême diminution de leur taille.

### *L'argile ? Quelle argile ?*

- s'il s'agit de l'argile minéralogique : il existe plusieurs familles, qui proviennent de l'altération de minéraux de la roche-mère, **les silicates**.
- s'il s'agit de l'argile granulométrique : toutes particules d'un diamètre inférieur à 2 µm.

Dans cette classe on trouve :

- les argiles minéralogiques,
- des débris de quartz très fins (1 à 2 µm),
- de la silice plus au moins hydratée,
- des oxydes de fer et d'aluminium,
- des cristaux de calcaire très fins (< 2µm),
- leur ensemble constitue les **colloïdes minéraux**.
- **Un colloïde est une substance qui peut se mettre en suspension colloïdale.**
- **Les colloïdes peuvent être dispersés ou flocculés.**

## C. PIERRES, GRAVIERS, SABLES ET LIMONS

### 1. Ils peuvent être siliceux, silicatés ou calcaires :

a) **Les siliceux résistent à l'altération** : ce sont des grains de quartz désagrégé des roches de granite.

b) **Les silicates peuvent s'altérer lentement** : ils sont formés de grains de mica, de feldspath, d'amphibole, de pyroxènes et d'autres minéraux libérés par des roches granites, volcaniques, micaschistes...

c) **Eléments calcaires, sources du calcium du sol** : il faut bien distinguer :

Le calcaire ce n'est pas un constituant toujours présent dans le sol. Par contre, pratiquement tous les sols contiennent du calcium.

Le calcaire  $\text{CaCO}_3$ , est un sel très peu soluble. Mais l'eau chargée de  $\text{CO}_2$  peut le dissoudre lentement le transformant en sel soluble dissocié en ions de bicarbonate de calcium  $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$ .

## **2. Les propriétés des éléments sableux dépendent de leur nature et de leur grosseur**

**a) Les blocs, pierres, cailloux et graviers** : ils réduisent la capacité nutritive du sol, peuvent favoriser de drainage naturel, accumulent facilement la chaleur du jour, peuvent retenir de l'eau.

**b) Les sables grossiers rendent le sol filtrant et léger** : favorisent la circulation de l'eau et de l'air, retient peu d'eau, facilitent les échanges de température, ne peuvent s'agglomérer en mottes.

**c) Les sables fins et les limons rendent le sol battant et asphyxiant** : à se tasser, à retenir l'eau.

## **D. LA TEXTURE**

Elle est le pourcentage de divers constituants minéraux (fig. 2), et par là d'expliquer les propriétés physiques du sol : son comportement vis-à-vis de l'eau, de l'air, des instruments de culture et des racines.

### ***Comment déterminer la texture d'un sol ?***

- **de façon aléatoire** : le visuel et surtout le toucher permettent de pouvoir évaluer les différents composants d'un sol.

- **de façon précise** : dans un premier temps, il faut effectuer une analyse de sol. Il faut ensuite interpréter cette analyse avec le triangle des textures.

### ***Triangle des textures***

A partir des résultats de l'analyse granulométrique et à l'aide du triangle textural, on peut donner « un nom au sol étudié ».

Le triangle des texture répertorie les trois éléments : argile ; limon ; sable. On peut donc dire qu'il existe trois grandes catégories du sol : sol argileux, sol limoneux et sol sableux. Ces catégories seront affinées en fonction de la teneur en différents éléments minéraux du sol.

Le triangle permet également de pouvoir observer 4 types de structure ainsi :

- **Texture argileuse** (dominance de l'argile) : sols imperméables, compacts et difficile à travailler, asphyxiant pour la plante.
- **texture limoneuse** (dominance des limons) : sols assez imperméables, sujets à la battance (croute) sous l'effet des précipitations. Ces sols ont tendance à se crevasser sous l'effet de sécheresse. Ils sont pauvres si non enrichis et difficiles à travailler.
- **texture sableuse** (dominance de sables) : Sols perméables, très drainants et facile à travailler. Ils s'appauvrissent cependant facilement (lessivage). Il faut donc les enrichir régulièrement.
- **texture équilibrée** (maximum : 30% argile, 20% limons, 50% sables) : texture idéale. Sols normalement perméables. Idéal pour la plante : retient les éléments minéraux sans être trop drainants et facile à travailler.

### Types de triangle textural

Il existe plusieurs de ces outils, mais actuellement le plus utilisé est celui du G.E.P.P.A.

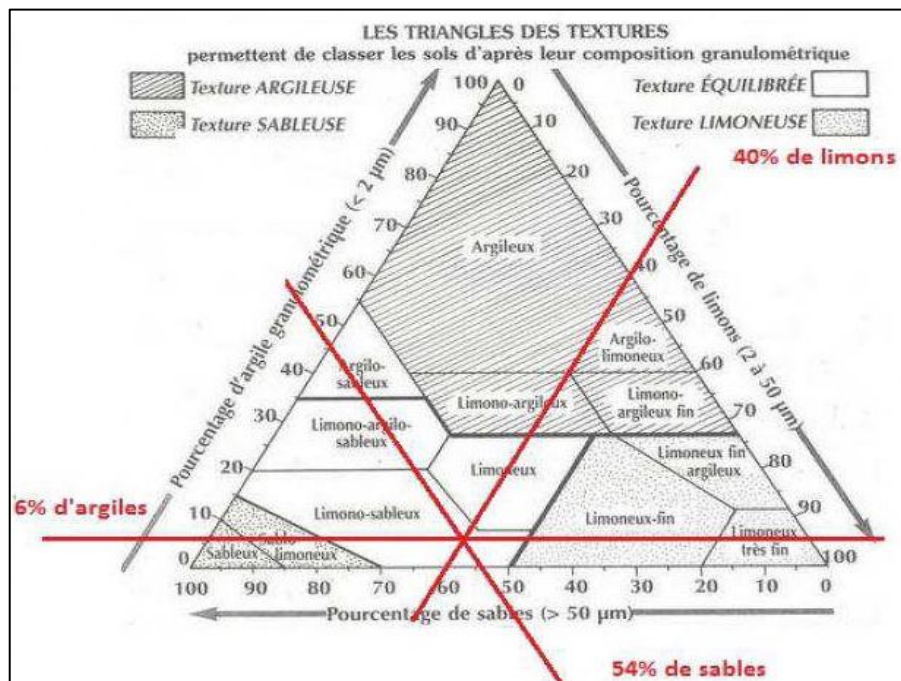


Fig. 3. Triangle textural

Exercice sur le triangle des textures : [54% sable, 40% limon, 6% argile]

## 1.2. LES CONSTITUANTS ORGANIQUES

Contrairement aux constituants minéraux (sables, limons, argile), de composition relativement stable, les matières organiques sont multiples et difficiles à définir : elles se transforment sans cesse, puisque leur devenir normal est de redonner les substances qui ont servi à les construire,

pour servir à nouveau à l'édification de nouvelles matières organiques. C'est pourquoi on peut les classer d'après leur degré d'évolution.

## **A. LES 4 GROUPES DE MATIERES ORGANIQUES DU SOL ET LES ETAPES DE LEUR FORMATION**

Les matières organiques du sol peuvent être sommairement réunies en 4 groupes de substances :

**A.1. Les végétaux et animaux vivants** sur le sol et dans le sol, représentent plusieurs tonnes à l'hectare et influent directement sur les propriétés du sol.

### **A.2. Les débris végétaux et animaux organisés, ou « matières organiques fraîches »**

Ils retournent au sol et ont sensiblement la même composition que les tissus vivants dont ils proviennent. Elles contiennent :

- **des substances faciles à décomposer.** Serviront surtout d'aliments énergétiques et plastiques aux champignons et bactéries, et disparaîtront très vite, avec production importante de gaz carbonique et d'eau, d'énergie et de corps microbiens : ce sont les sucres, l'amidon, la cellulose et les protéines.

- **des substances qui seront attaquées plus lentement et moins complètement** laissant d'importants résidus : il s'agit de la lignine, des matières grasses, des résines, des tanins...

*Toutes ces substances ont une même caractéristique : ce sont des corps très complexes constitués de très grosses molécules. Mais elles diffèrent cependant par leur vitesse de décomposition des substances hydrocarbonées (composées de C, O, H).*

- **des matières azotées**, surtout sous forme de protéines, composées de C, O, H, N et aussi de P et S ; des sels minéraux libres : de calcium, magnésium, potassium, sodium...

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

### **A.3. Les « Produits Transitoires »**

Ce sont les maillons de cette chaîne de transformations partant des matières organiques fraîches à très grosses molécules et aboutissant, pour la plupart de ces molécules, à des substances minérales simples à très petites molécules :

- du gaz carbonique et de l'eau,

- des matières minérales : nitrates, phosphates, carbonates de potassium, de calcium, de magnésium, de sodium...

#### **A.4. L'Humus stable**

C'est le résultat final de la décomposition des matières organiques fraîches que l'on appelle « l'humification ».

L'humus est constitué principalement :

- des résidus de lignine et de cellulose oxydés,
- des matières azotées (protéines, acides aminés, ammoniac) dont une grande partie est d'origine microbienne,
- de sels minéraux.

**L'humus stable représente la part la plus importante de la matière organique du sol, entre 90 et 95%. C'est pourquoi on a tendance à assimiler le taux d'humus au taux de matière organique**

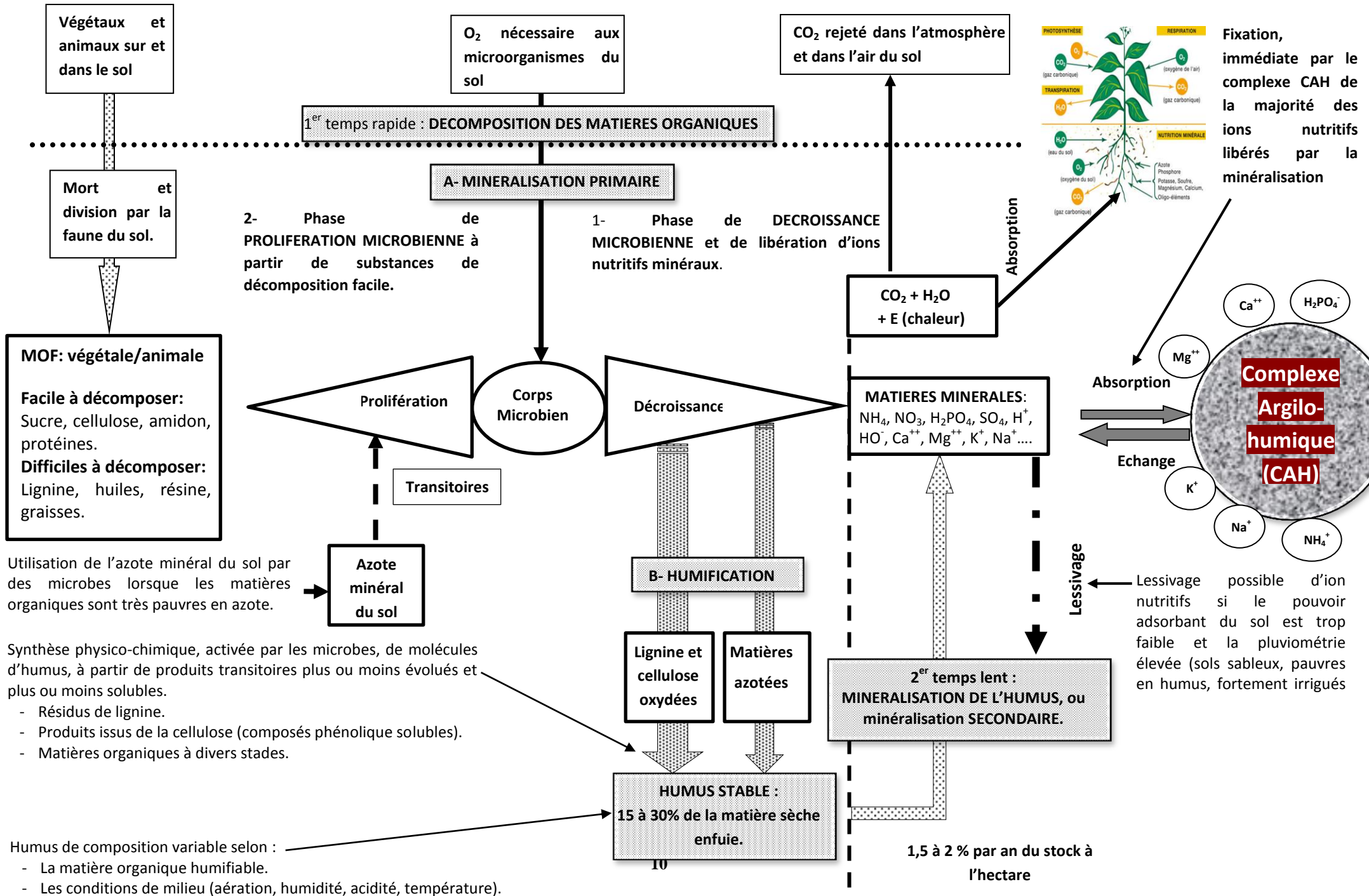


Fig. 4. Schéma général de l'évolution des matières organiques sur et dans le sol (tiré de Soltner D., 2014)

## A.5. LES PROPRIETES DE L'HUMUS

### *L'humus est acide*

Ceci est principalement à la présence d'acides organiques. Toutefois, l'apport raisonnable de matière organique n'acidifie pas le sol.

### *L'humus est hydrophile*

Il peut retenir beaucoup plus d'eau que l'argile : **jusqu'à 15 fois son poids**. Il jouera donc un rôle primordial dans l'économie de l'eau du sol. Mais toute cette eau ne sera pas disponible pour les plantes : une grande partie sera énergiquement retenue. C'est ce qui explique que les sols **humifères**, les sols tourbeux par exemple, peuvent devenir trop secs s'ils sont trop profondément drainés.

Inversement l'humus desséché se réhumecte plus lentement que l'argile seule. Nous verrons bientôt que ce ralentissement ce manque de « mouillabilité », permet de préserver la structure contre la dégradation par les pluies.

### *L'humus est un colloïde électro-négatif*

Mais à la différence de l'argile, sa floculation est ralentie par l'épaisse couche d'eau entourant ses micelles : les ions monovalents  $K^+$  et  $Na^+$  sont sans action sur lui. Seuls les ions bivalents (deux charges +) peuvent le flocculer.

De plus, il faut 4 à 5 fois plus de cations pour saturer l'humus que pour saturer l'argile. L'humus améliore donc le pouvoir de rétention des cations (ou « pouvoir absorbant ») du sol.

## B. LES MATIERES ORGANIQUES, BASE DE LA FERTILITE DU SOL

Cette étude simplifiée des constituants organiques du sol laisse deviner la grande variété de ces substances et par conséquent leurs rôles multiples dans le sol. Il faudrait en effet se garder de n'attribuer de rôle utile qu'à l'humus stable. **Les 4 formes** de matières organiques que nous avons citées : êtres vivants, matières organiques fraîches, produits transitoires et humus stable agissent ensemble, à la fois par leur présence, mais aussi par les transformations qu'elles subissent par leur destruction permanente.

Leur rôle dans le sol se résume en ces termes : **les matières organiques augmentent la fertilité** du sol, c'est-à-dire améliorent à la fois ses qualités physiques, chimiques et biologiques.

*Les matières organiques améliorent les qualités physiques du sol.*

☞ Elles améliorent la structure des sols trop « légers » dont elles cimentent les particules en agrégats stables, et des sols « lourds » dont elles diminuent l'adhésivité en les rendant plus friables.

☞ Elles régularisent l'humidité de tous les types de sols:

- en favorisant l'évacuation de l'eau en excès des sols argileux,
- en augmentant la capacité de **réten**tion en eau des sols sableux.

### *Les matières organiques améliorent les qualités chimiques du sol.*

Par sa réaction acide, ses propriétés colloïdales, et sa minéralisation continue, source d'aliments pour la plante, l'humus agit sur les caractéristiques chimiques du sol et sur la nutrition des plantes.

### *Les matières organiques améliorent les qualités biologiques du sol.*

Elles sont le support et l'aliment des êtres vivants du sol qui participent d'une manière très active à la nutrition des plantes et à l'amélioration des qualités physiques du sol.

## 1.3. LE COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE (COMPLEXE COLLOÏDAL)

### *L'humus « protège » l'argile et stabilise la structure du sol.*

Les molécules d'humus, électronégatives comme celles de l'argile, ne peuvent se fixer directement sur elles. Pourtant l'argile et l'humus sont associés en un complexe, cette liaison étant rendue possible par trois procédés (fig. 5) :

- **par l'intermédiaire des ions  $\text{Ca}^{++}$**  formant un « pont » entre l'argile et l'humus. Ce mode de fixation, particulièrement énergique, explique la stabilité (la résistance à la dispersion par l'eau, et à la destruction de l'humus par minéralisation) des agrégats formés en sol calcaire ;

- **par l'intermédiaire du fer ( $\text{Fe}^{3+}$ )**, ce mode de liaison caractérisant les *brunisols* « sols bruns ». Cette liaison est cependant moins stable que celle qu'assure le calcium.

- **par fixation directe de l'humus sur certaines charges positives de l'argile** : les charges dues par exemple à l'échange des ions  $\text{OH}^-$  fixés sur les  $\text{Al}^{3+}$  des feuillets d'argile.

Dans cette association argile-humus, les molécules d'humus forment autour des micelles d'argile une enveloppe protectrice.

La couche d'eau qui les entoure tend alors à s'opposer à la floculation de l'ensemble. Mais inversement, lorsque le complexe argilo-humique est floculé, l'humus s'oppose à toute nouvelle dispersion de l'argile, qui serait provoquée par exemple par un excès d'humidité, ou par la battance des pluies en surface : **l'humus protège l'argile contre la dispersion, c'est un colloïde stabilisateur.**

On dit encore que l'humus stabilise la structure, c'est-à-dire qu'il forme avec l'argile un «ciment» qui permet la construction d'agrégats solides, résistant à la dégradation par l'eau.

### *L'argile favorise l'humification et ralentit la destruction de l'humus*

En contrepartie, l'argile protège l'humus contre l'attaque microbienne. On remarque en effet qu'en sol suffisamment argileux et bien pourvu en calcium, l'humification est favorisée par la liaison à l'argile, liaison réalisée notamment par les vers de terre, et la minéralisation de cet humus est freinée (acides humiques gris).

En sol sableux et pauvre en calcium au contraire, l'humus est souvent constitué de composés solubles (surtout acides fulviques peu polymérisés) donc dépourvus de propriétés colloïdales intéressantes, faute de liaison avec l'argile. Si le sol est bien pourvu en calcium, les acides humiques qui se forment disparaissent vite faute de liaison à l'argile.

### *La stabilisation de l'humus par les ions du sol*

**a) Le fer** : le plus souvent sous forme d'ions ferriques  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ , libres ou associés aux feuillets d'argile, exerce sur l'humification une double action (fig. 5) :

➤ **il insolubilise les composés phénoliques solubles** (encore appelés «précurseurs humiques») et favorise leur polymérisation. **En présence d'ions ferriques abondants** (grès ou schistes ferrugineux), l'humification par insolubilisation est active : il se forme des acides humiques et de l'humine d'insolubilisation. Au contraire, **en sols pauvres en fer** (sables quartzeux par exemple), les composés **phénoliques solubles ne peuvent s'insolubiliser et se polymériser**. Ils migrent en profondeur.

➤ **il sert de « pont » (pont ferrique) entre l'argile et l'humus**. On dit encore qu'il tient lieu de « **cation de liaison** » pour former le complexe argilo-humique. Mais la stabilisation du fer n'est pas trop énergique : les acides humiques (surtout bruns) et l'humine d'insolubilisation formés en milieu riche en fer sont facilement biodégradables. L'humus est stabilisé mais non bloqué.

**b) L'aluminium** : Sous forme d'hydroxyde  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et d'ion alumineux  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ , il se comporte vis-à-vis des composés humiques de la même manière que les ions Fe. Mais lorsque l'alumine se trouve à l'état de gels amorphes libérés en grande quantité par la décomposition des laves et cendres volcaniques (gels appelés allophane), cette alumine se comporte comme un stabilisant puissant ; les acides fulviques et humiques sont tellement enrobés d'alumine qu'ils deviennent inattaquables par les microbes et s'accumulent.

**c) Le calcium** : intervient différemment selon sa qualité dans le sol :

En quantité modérée, les ions Ca agissent comme le fer : ils participent à l'insolubilisation et à la polymérisation des « précurseurs humiques », et servent de cations de liaison entre l'argile et l'humus : c'est le « pont calcique » indispensable à la constitution du complexe argilo-humique.

**Mais tout change en présence de quantités absorbantes de calcaire actif :**

- les ions  $\text{Ca}^{++}$  surabondants précipitent les acides fulviques en fulvates et humates calciques, très résistants à la biodégradation ;
- le bicarbonate de calcium,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  se recristallise en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  (cristaux de calcite) autour de l'humus formé et des résidus de lignine peu transformé, formant autour de cet humus une gangue calcaire spectaculaire lorsqu'on l'observe un microscope électronique. Cette gangue limite aussi la biodégradation de l'humus, qui s'accumule.

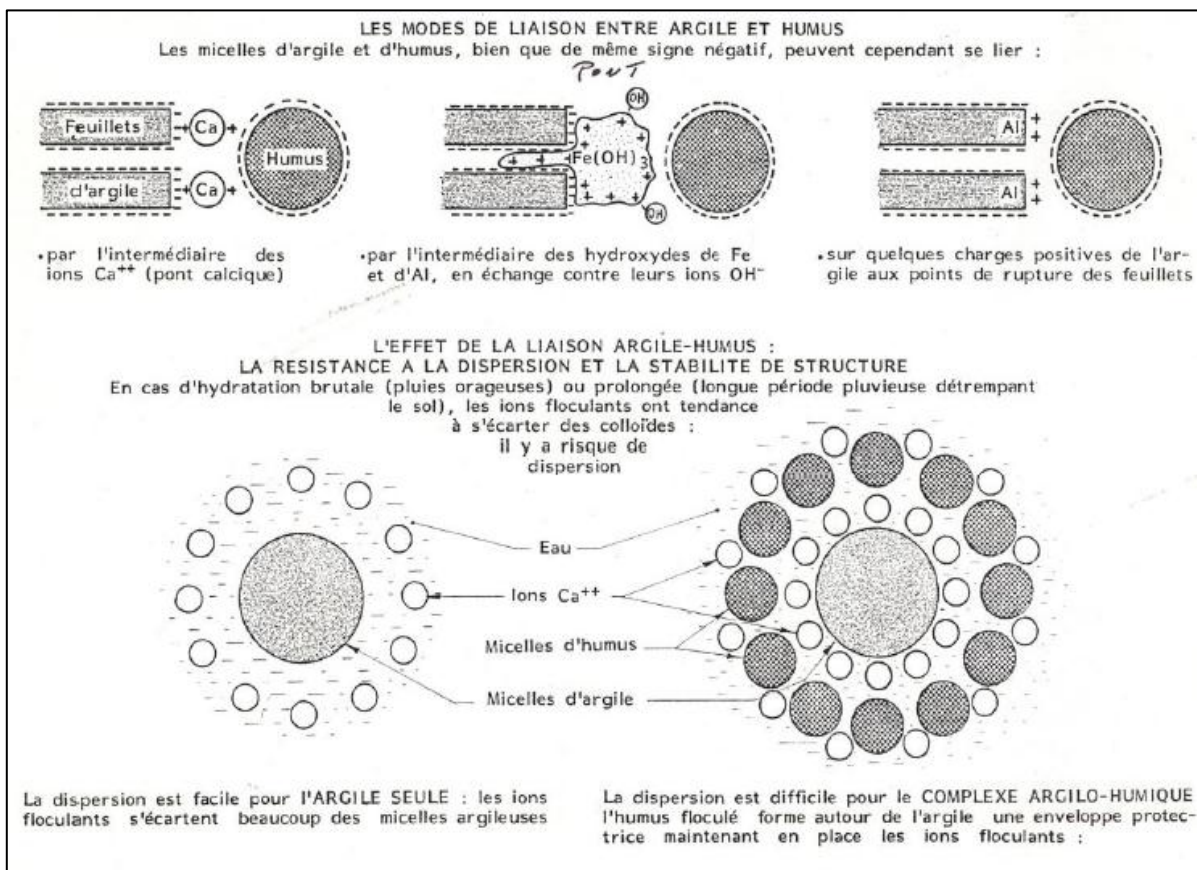


Fig. 5 : Les modes de liaison entre argile et humus (tiré de Soltner D. ,2014)

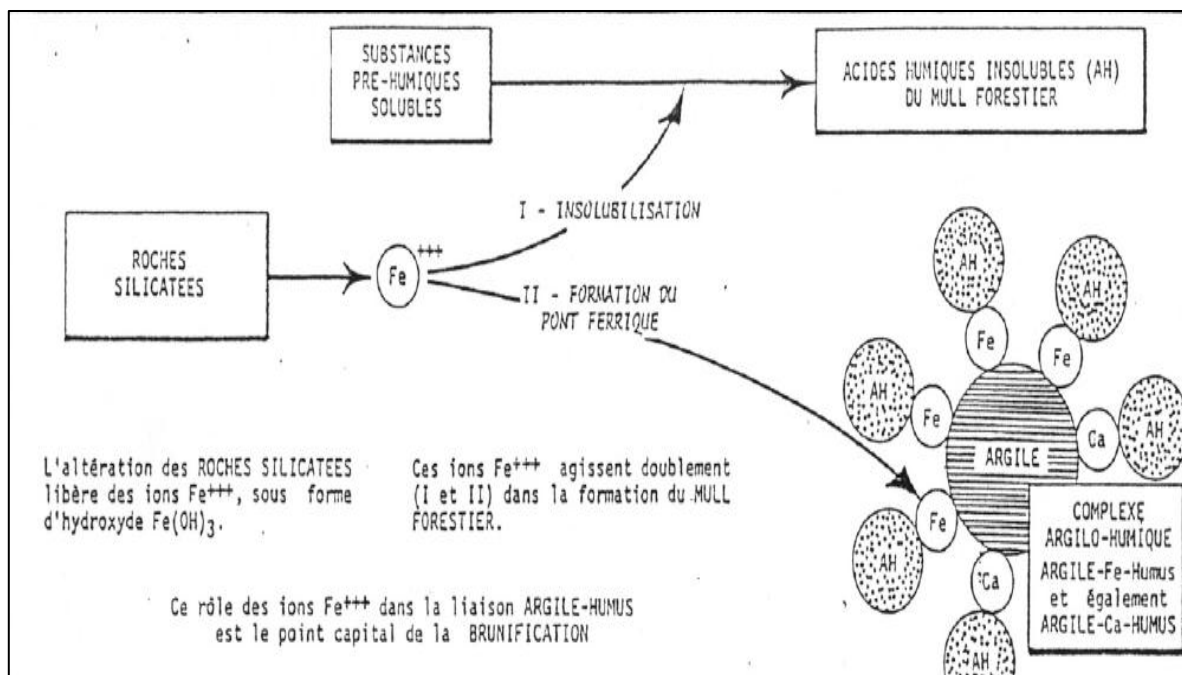


Fig. 6 : Le rôle du fer : ponts ferriques (tiré de Soltner D. ,2014)

## CHAPITRE II : L'ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS

### 2.1. COUVERTURE, PROFILS ET HORIZON PEDOLOGIQUE

#### Définitions

La couverture pédologie est en continuelle évolution, elle se développe à la fois à partir de la roche mère profonde et à partir de la matière organique de surface. Ces transformations donnent naissance à des volumes de matière minérale et organique, superposés, plus ou moins parallèles à la surface du terrain appelés: horizons. Ces derniers leur nombre varie en fonction de l'état d'évolution de la couverture pédologique.

L'examen cultural d'une coupe de sol permet de découvrir dans un sol cultivé, les effets des cultures sur les caractéristiques du sol et sur les êtres vivants qui l'habitent. On décèlera par exemple :

- sa profondeur et son homogénéité ;
- le comportement des racines ;
- la décomposition bonne ou mauvaise ;
- d'évaluer le potentiel agronomique d'une terre ;
- d'aider à la décision par exemple :
  - quelle réserve d'eau utile ?
  - quelle profondeur ?
  - quel travail du sol pratiquer ?

### *Les principales étapes de l'examen d'un profil cultural*

- 1) **L'emplacement et le type de tranchée** dépendent des renseignements recherchés :
  - **S'agit-il d'examiner les effets d'une façon culturale ;**
  - **S'agit-il au contraire d'évaluer le potentiel.**
- 2) **Une panoplie d'outils** sera utile pour examiner le profil : une fourche à bêcher, une pelle, éventuellement d'une pioche, seront nécessaires un fort couteau, un ruban mètre, un soufflet, une fiole d'acide chlorhydrique, eau oxygénée, un pH mètre.
- 3) **L'examen est à la fois verticale et horizontal**, vertical pour délimiter les couches ou horizons, horizontal pour lire d'éventuelles zones de tassement dues aux passages de roues.

### *Développement et évolution des horizons*

Les horizons résultent de la dégradation par fragmentation et altération de la roche mère sous-jacente sous les effets conjugués de l'eau, de l'air, du climat, de la transformation et du mélange des produits issus de cette altération (sables, limons, argiles) avec la matière organique fraîche (débris de végétaux et d'animaux) déposée en surface, puis décomposée en humus, de la migration, du déplacement vertical et de la fixation de certains éléments constitutifs (minéraux, argile, fer, matière organique, ...) au cours du temps.

### *Quatre mécanismes conduisent à la formation des horizons*

- 1) mécanisme d'altération des roches et de leurs constituants ;
- 2) mécanismes biologiques et d'accumulation des matières organiques ;
- 3) mécanisme de libération, de migration, puis d'accumulation des constituants résultant des mécanismes d'altération et d'évolution des matières organique
- 4) mécanismes d'arrangements et d'agrégation des constituants issus de l'altération, puis mis en place par les migrations.

### *Horizons de référence - dénomination des horizons - révérenciel pédologique (Baize et Girard, 2008)*

Ces mécanismes (transformations, migrations, déplacements de certains constituants du sol) conduisent à la formation de façon chronologique et au développement d'un ou plusieurs horizons qui se différencient les uns des autres.

## ***Horizons de référence***

La présence dans un horizon de certains caractères morphologiques spécifiques (constituants, traits pédologiques, structure, couleur, ...) associés à des divers autres éléments (positionnement par rapport aux autres horizons, ...) a permis aux pédologues de définir plus de 70 types d'horizons appelés: horizons de référence décrits et répertoriés dans le le Référenciel pédologique (**Baize et Girard, 2008**).

Les horizons de référence sont dénommés par des lettres: O, A, B, E, S, C, R, M... Selon une nomenclature internationale :

- Horizons O (horizons organiques).
- Horizons A (horizons organo-minéraux).
- Horizons E (horizons minéraux, appelés éluviaux).
- Horizons B (horizons minéraux appelés illuviaux).
- Horizons S (horizons minéraux).
- Horizons C : Ils correspondent à la roche mère plus ou moins altérée.
- Horizons R, M, et D :
  - R : roche dures;
  - M: roches meubles et tendres;
  - D: roche remaniée ayant donnée naissance ou non au matériau sus-jacent.

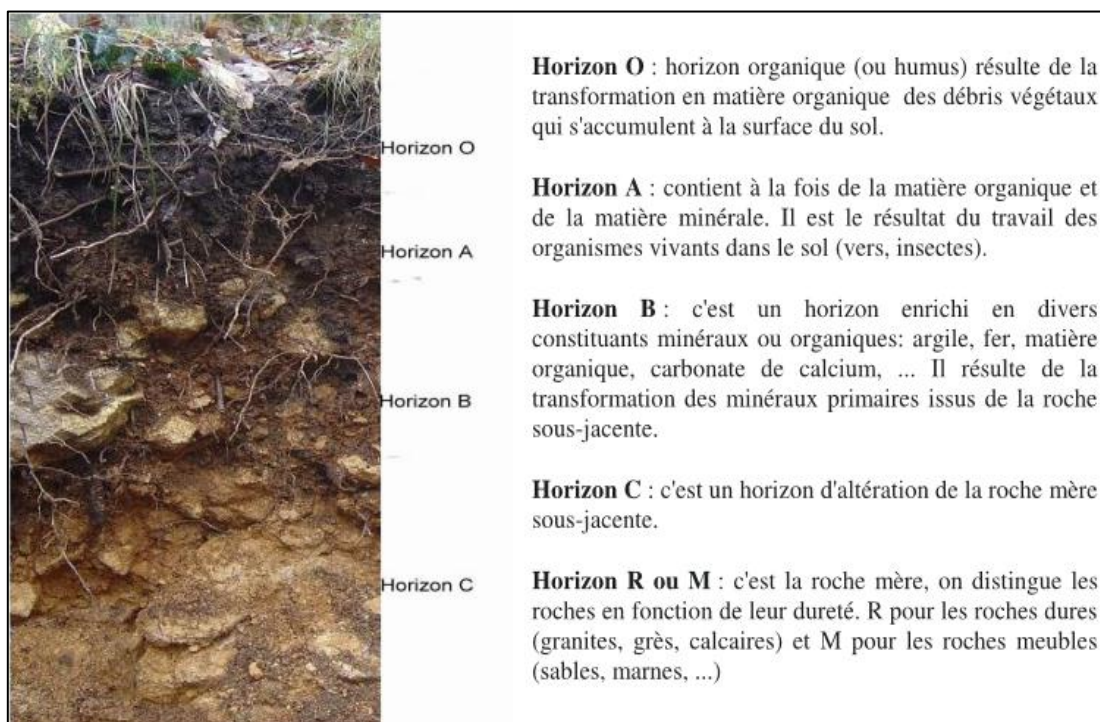


Fig. 7. Coupe de sol dans un sous-bois - Les différents horizons observés

Chaque horizon (O, A, E, B, ...) se subdivise en sous-groupes suivant l'évolution de la pédogenèse et la proportion de certains constituants du sol. Par exemple, selon l'importance des minéraux en

présence, les principaux types d'horizon B sont les suivants: Bt (argile), Bo (hydroxydes de fer et d'Al), Bh (matière organique), Bca (calcaire) ....

### *Les traits pédologiques*

Sous le terme de traits pédologiques, on regroupe les nodules, les pellicules, les bandes, et les pédotubes.

Les mouvements de particules argileuses, sableuses, limoneuses, les migrations et précipitations d'éléments en solution : calcaires, sels, matières organiques, les mouvements d'animaux, le développement des racines conduisent à la genèse de traits pédologiques: c'est à dire à la formation d'accumulations de matières (argiles, calcite, carbonates, hydroxyde de fer, hydroxyde d'aluminium, ...) sous forme de pellicules, de nodules, de bandes. La présence de tel ou tel trait pédologique va déterminer les caractéristiques du sol, son stade d'évolution, sa fertilité, sa porosité, ...

### *Les agrégats*

Un horizon est composé de petits volumes individualisés appelés agrégats. Les agrégats résultent de l'assemblage des particules élémentaires entre elles et de la fissuration des ensembles agrégés. Les agrégats définissent la structure du sol.

## 2.2. STRUCTURE

La structure d'un sol est le mode d'assemblage, à un moment donné, de ses constituants solides.

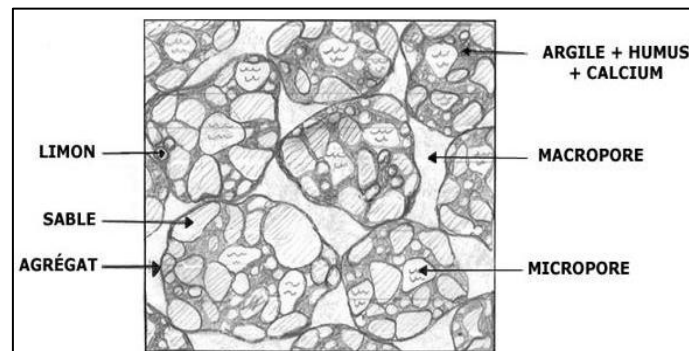


Fig. 8. La structure d'un sol

Une fois ces particules du sol associées, cette structure est divisée en deux : **une microstructure et une macrostructure**. La microstructure est invisible à l'œil nu et nécessite toute une technique d'observation microscopique, tandis que la macrostructure est visible à l'œil nu. Cette dernière se divise en deux types :

#### 4.2.1. La structure fragmentaire

**A) Structure lamellaire :** c'est une structure d'une forme plane, des dimensions horizontales et une épaisseur très variable. Ce qui se caractérise cette structure :

- une mauvaise pénétration racinaire ;
- une mauvaise circulation d'eau.

**B) Structure prismatique :** sa forme toujours plane, mais cette fois-ci, ses fentes sont verticales, régulières à arrêtes nettes et de largeur variable.

**C) Structure en colonnes :** de fentes verticales et de la largeur variable, mais ses arrêtes sont émoussées.

**D) Structure polyédrique :** cette fragmentation est composée de grosses particules à dimensions nettes et de taille variable. Cette structure est composée en 3 :

- **Structure polyédrique anguleuse :** à une forme plane et un petit peu bombée, et à arrêtes nettes. Elle se forme par floculation (argile ou humus) ou cimentation (Fe, Al...)

- **Structure polyédrique sub-anguleuse :** elle est toujours bombée, à des arrêtes émoussées. Elle est favorable dont le complexe argilo-humique dépasse 80%, pH neutre à basique (7 à 8), une activité biologique importante, un système racinaire se développe très bien et une bonne circulation de l'eau et les éléments minéraux.

- **Structure polyédrique cubique :** d'une forme plane et subégale à dimensions très variables.

**E) Structure sphérique :** elle est composée de petites particules du sol, de dimensions variables. Elle se divise en 2 types :

- **Structure grenue :** à des petits agrégats (absence des pores).
- **Structure grumeleuse :** à des moyens agrégats à contour très irrégulier, cette fois-ci et poreux.

Ces deux types de structures de sol sont très favorables en assurant: une très bonne activité biologique, une très bonne circulation d'eau et des éléments nutritifs et une bonne aération.

#### 2.2.2. La structure non fragmentaire

**A) Structure particulaire** composée des particules de sol, ces particules ne sont pas cimentées entre elles. Elle est défavorable par son manque de colloïde (cas d'un sable).

- **si les éléments sableux sont grossiers**, le sol ne retient ni l'eau ni les éléments minéraux solubles : elle est **filtrant**.

- **si les éléments fins dominant**, ils ont tendance à s'engrener les uns dans les autres, rendant le sol battant et imperméable.

**B) La structure compacte (massive) :** dans ce cas les éléments de sol sont cimentés entre eux, et les agrégats ne sont pas fissurés. Cette structure est nuisible:

- par son manque de perméabilité à l'air et à l'eau : le sol est asphyxiant, et défavorable à l'activité biologique (faune et flore) ;

- par sa plus grande résistance à la pénétration des racines ;

- par sa difficulté de travail, tant en période humide qu'en période sèche.

**C) Seule la structure grumeleuse** est à rechercher, plus précisément une structure dont les fissurations internes puissent donner une structure grumeleuse.

Dans ce cas, les éléments sableux, réunis en agrégats par un complexe argilo-humique suffisamment abondant et floclé, formant lors du travail du sol, de petites mottes ou grumeleux de taille moyenne et aux bords arrondis. Cet état de structure à l'avantage :

- d'offrir à l'eau du sol une grande facilité de circulation ;

- d'assurer de ce fait une bonne aération ;

- de permettre la pénétration des instruments.

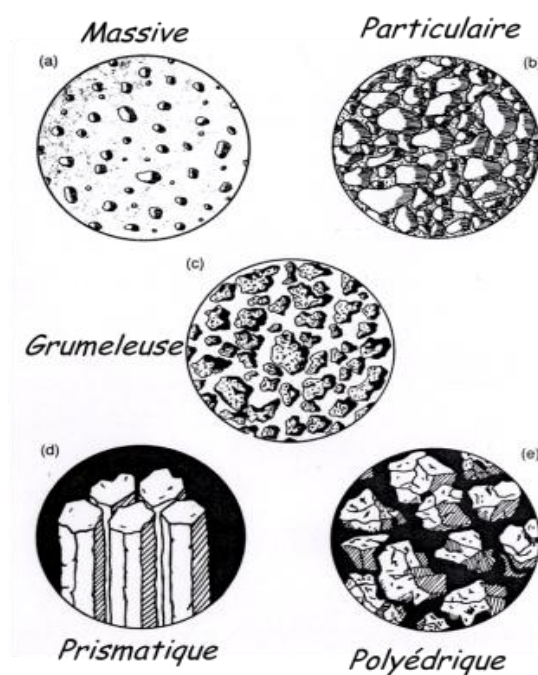


Fig. 9. Les différents types de la structure d'un sol

## **2.3. L'ATMOSPHERE DU SOL (air du sol : son volume et sa composition)**

### **2.3.1. L'air occupe tous les vides que n'occupe pas l'eau**

Lorsqu'un sol gorgé d'eau se ressui, l'air envahit les espaces lacunaires laissés par l'eau de gravité. Il occupe donc la « macroporosité » du sol. Par la suite, lorsque se vider progressivement la réserve utilisable en eau du sol, l'air envahira également une partie de la « microporosité ».

La quantité d'air contenu dans le sol dépend donc :

- de la texture, qui influe surtout sur la microporosité ;
- de la structure, dont dépend surtout la macroporosité ;
- de l'humidité du sol, celle-ci dépendant à la fois de la texture et de la structure.

Améliorer l'aération du sol reviendra donc, pour l'agriculteur, à lutter contre l'excès d'eau et à améliorer la structure : le drainage, le travail du sol, les amendements calciques et humifères seront les moyens d'y parvenir.

### **2.3.2. L'air du sol a une composition moins stable que l'air atmosphérique**

Leur composition comparée, qu'illustre le tableau 1.

Tableau 1. La composition de l'air de l'atmosphère et l'air du sol

gaz	air atmosphérique	air du sol
Oxygène	21%	de 10 à 20%
Azote	78%	de 78,5 à 80%
Dioxyde de carbone	0,03%	de 0,2 à 3,5%
Vapeur d'eau	variable	à saturation

Le tableau 1 révèle une teneur semblable en azote, mais d'assez grandes différences en oxygène et en dioxyde de carbone.

### **2.3.3. La composition de l'air du sol varie, mais l'air se renouvelle**

#### **2.3.3.1. L'activité biologique est la cause des variations de l'air du sol**

La respiration des racines et le métabolisme des micro-organismes aérobies et de la faune du sol consomment de l'oxygène et rejettent du CO<sub>2</sub>.

La quantité moyenne de CO<sub>2</sub> produite par an serait de 3 à 5 g/jour/m<sup>2</sup> de sol soit 12 à 18 tonnes/ha/an. Les 2/3 sont dus à l'activité microbienne, l'autre tiers à celle des racines des végétaux.

Notons toutefois que la production de CO<sub>2</sub> est variable selon la saison, et selon les deux composantes essentielles que sont la température et l'humidité. A titre d'exemple, le tableau 2 montre les différences de teneur en CO<sub>2</sub> de l'air d'un sol en fonction des dates de mesure et du couvert végétal en place:

Tableau 2. Influence de la culture et de l'apport de fumier sur la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère du sol

Date	Teneur en CO <sub>2</sub> de l'atmosphère du sol à différentes dates				
	15 mai	25 mai	10 juin	7 juil.	27 juil.
Jachère non fumée	0,10	0,07	0,08	0,08	0,09
jachère fumée	0,22	0,32	0,17	0,36	0,35
Blé	0,61	0,32	0,35	0,48	0,30

La teneur de l'air du sol en CO<sub>2</sub> dépend également de l'importance des apports organiques, de la nature du sol et de sa profondeur.

### **2.3.3.2. L'air des sols à bonne structure se renouvelle très rapidement par le phénomène de diffusion**

Bien que produit abondamment, le CO<sub>2</sub> s'accumule peu dans le sol. Il s'évacue et est remplacé continuellement par de l'air frais venant de l'atmosphère. La cause de ce remplacement est le phénomène de diffusion qui tend à mélanger deux gaz de composition différente lorsqu'ils sont mis en contact. La diffusion sera donc d'autant plus rapide et l'aération d'autant plus efficace, que la porosité sera plus grande.

### **2.3.3.3. Le manque d'oxygène et l'excès de CO<sub>2</sub> du sol sont nuisibles et décelables**

Une teneur en CO<sub>2</sub> de l'air du sol nettement plus élevée que celle de l'air atmosphérique n'est pas nuisible, au contraire : l'acide carbonique joue un rôle capital en dissolvant lentement les minéraux insolubles : calcaires, phosphates, oligo-éléments. Cependant, au-delà d'une certaine proportion (2 à 5%) variable selon les plantes, il devient toxique.

Plus grave est le manque d'oxygène, dû à un excès d'eau ou au tassement excessif des sols en période humide dont voici quelques conséquences :

- asphyxie des racines, se manifeste par une chlorose;
- dépérissement des légumineuses, faute de bactéries aérobies;
- développement de bactéries anaérobies dont les fermentations produisent des substances toxiques.

Le symptôme de ces fermentations est l'apparition, dans le profil, de taches gris-bleu appelées « taches de *gley* » : cette couleur est celle de l'oxyde ferreux (FeO) qui s'est formé par réduction (perte d'oxygène) de l'oxyde ferrique ((Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de couleur rouille.

Sensibilité accrue des plantes au parasitisme. Privée d'oxygène, la plante voit son métabolisme modifié, devenant incapable de sécréter les substances de défense contre les maladies cryptogamiques et les ravageurs. Cette incapacité est accrue par le manque d'apport organique au sol, qui est souvent la cause de sa baisse de porosité.

## 2.4. LA TEMPERATURE DU SOL ET SON EVOLUTION

### 2.4.1. L'absorption de la chaleur solaire par le sol dépend de son exposition et de ses caractéristiques physiques

Les rayons solaires sont la principale source de chaleur du sol. Mais l'atmosphère qu'ils traversent en retient plus de la moitié.

La chaleur reçue dépend :

- de l'inclinaison du sol, liée à la latitude, à l'heure du jour et à la topographie;
- de sa couleur : albédo ; les sols de couleur foncée (riches en humus) sont plus facilement chauds, contrairement aux sols de couleur claire (sols calcaires) ;
- de son humidité : l'eau possède une chaleur spécifique élevée et demande donc beaucoup de chaleur pour se réchauffer (pour élever de 1°C 1 g d'eau, il faut 5 fois plus de chaleur que pour élever de 1°C 1 g de sable) ;
- de la présence d'un couvert, qui limite son réchauffement et son refroidissement (la neige par exemple, limite beaucoup le refroidissement des sols, ce qui explique la résistance importante des plantes en hiver et en sa présence).

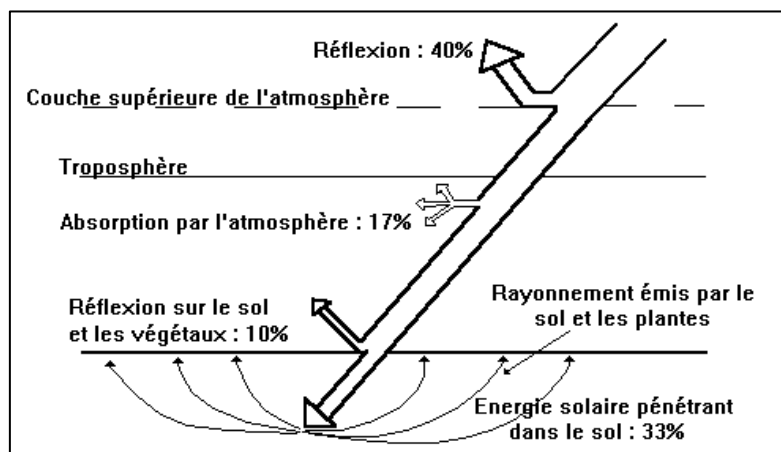


Fig. 10. Le rayonnement, source de chaleur du sol

Tableau 3. Chaleur spécifique des principaux constituants du sol

	Chaleur spécifique rapportée à	
	l'unité de poids	l'unité de volume
Eau	1	1
Sable	0,19	0,51
Argile	0,23	0,55
Calcaire	0,21	0,55
Humus	0,47	0,58

#### 2.4.2. La combustion des matières organiques est une source annexe de chaleur

Le dégagement de chaleur produit par la dégradation des matières organiques est largement mis à profit en culture maraîchère et horticole. Son action reste cependant limitée. Les matières organiques agissent surtout sur la température en améliorant la structure et sa stabilité, donc en favorisant l'élimination de l'excès d'eau, qui ralentit le réchauffement des sols.

#### ➤ Il existe des « sols chauds » et des sols « froids »

Les sols froids sont les sols humides, se ressuyant lentement faute d'une bonne perméabilité. Une couleur claire et une mauvaise exposition peuvent encore ralentir leur réchauffement au printemps (critère important à prendre en compte pour la culture de maïs par exemple).

Les sols chauds sont les sols perméables, rapidement ressuyés. Une exposition perpendiculaire aux rayons solaires, et une couleur foncée due à l'abondance de l'humus, augmente encore cette tendance.

#### 2.4.3. La température du sol varie, mais la profondeur atténue ces variations

Les oscillations diurnes sont de faible amplitude, mais dépendent de la limpidité de l'air : la perte de chaleur par rayonnement est d'autant plus forte, la nuit, que le ciel est plus clair (les gelées de printemps se rencontrent les nuits très claires). La couverture du sol par la végétation ou un *mulch* atténue cette perte calorifique.

Les oscillations saisonnières ont une amplitude d'autant plus marquée que le climat est plus continental. Ces oscillations varient avec la profondeur comme l'indique (fig.11).

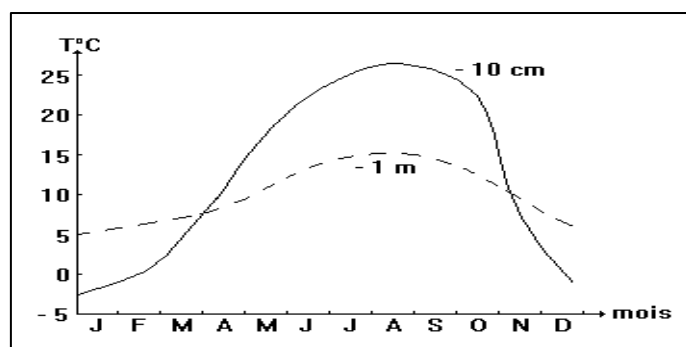


Fig.11. Évolution saisonnière de la température du sol

## 2.5. LA COULEUR DU SOL

C'est l'indice le plus immédiatement visible des variations de composition du sol. C'est d'abord un reflet de la teneur en matière organique : le sol est d'autant plus foncé qu'il est plus riche en humus. Mais la couleur traduit aussi l'état du fer dans le sol : un sol rouge possède des oxydes de fer peu hydratés ; amorphes, un sol jaune contient des oxydes de fer hydratés, mieux cristallisés. Malheureusement il n'y a pas de relations quantitatives entre la couleur et ce qu'elle révèle, par exemple il faut peu de fer pour colorer un sable et dans certains sols (vertisols) des quantités faibles de matière organique peuvent donner une coloration noire. De plus :

- **Taches grisâtres et rouille** : milieu subissant un engorgement temporaire.
- **Bleu verdâtre** : horizon ou ensemble du profil occupé en permanence par une nappe pauvre en oxygène.

La couleur du sol est déterminée par référence avec un code de couleurs. Les pédologues utilisent pratiquement tous le code Munsell Soil Color Charts.

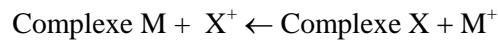
La couleur du sol traduit l'épaisseur du sol pouvant être prospectée par les racines (profondeur effective) et permet d'estimer la capacité de stockage du sol pour l'eau qui est fonction de l'épaisseur du sol

## CHAPITRE III : LES PROPRIETES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU SOL

### 3.1. LES PHENOMENES D'ECHANGES DES IONS

Le sol possède la propriété de retenir diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le complexe adsorbant du sol, c'est à dire l'ensemble des colloïdes (substances humiques, argile, sesquioxydes,...) dotés de charges négatives ou positives.

Les ions y seront retenus sous forme échangeable. En d'autres termes, si on traite un sol par une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il y aura échange entre les ions du complexe adsorbant et ceux de la solution :



L'absorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible :

***Les ions échangeables du complexe adsorbant sont en équilibre avec la solution du sol:***

Toute modification de la composition de la solution du sol provoque un changement de cet équilibre par échange : certains ions du complexe passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions, qui étaient auparavant en solution (adsorption).

Le pouvoir adsorbant est la propriété que possède le complexe adsorbant du sol, de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol (fig. 12).

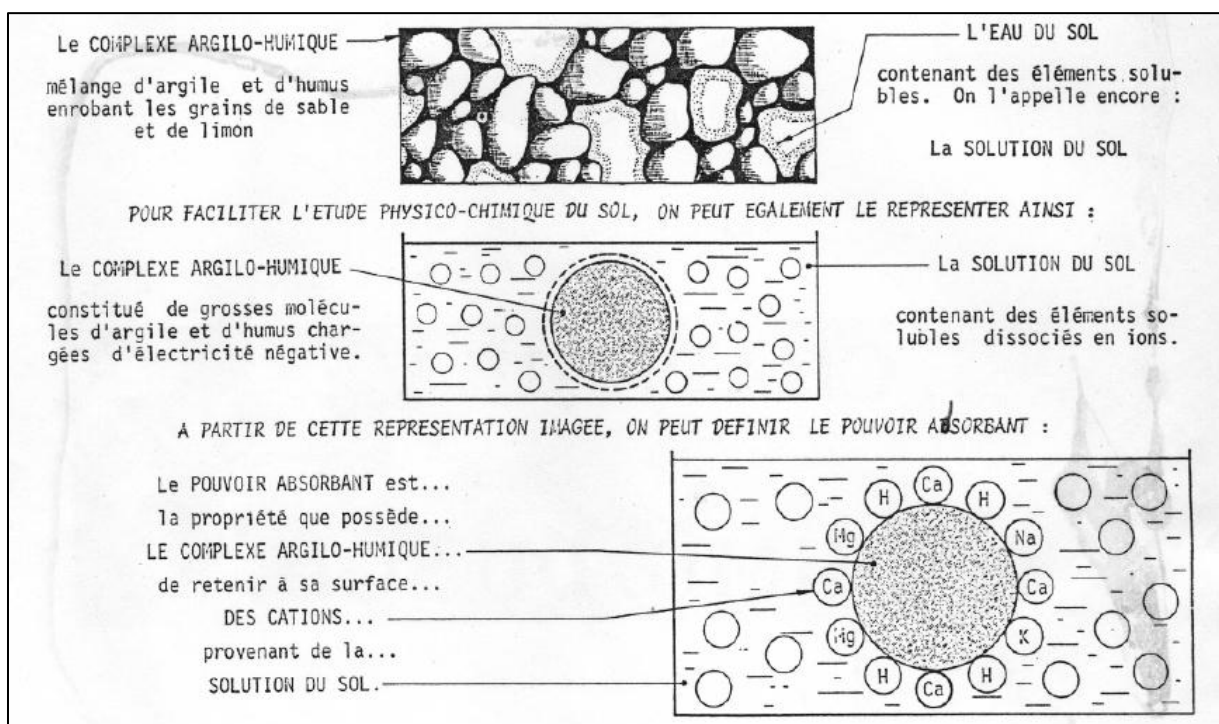


Fig. 12. Le complexe adsorbant du sol (tiré D. Soltner, 2014)

### 3.1.1. LA SORPTION ET L'ECHANGE DES CATIONS

Les cations sont fixés à la surface des colloïdes sur les plages où se développent des charges négatives. Les questions relatives à la nature des colloïdes négatifs du sol et de l'origine de leur charge ont déjà été discutées antérieurement dans les chapitres précédents. Nous n'y reviendrons pas ici.

### 3.1.1.1. Principaux facteurs réglant l'intensité des phénomènes de sorption et d'échange des cations

#### A. La nature des colloïdes

Le tableau 4 donne la capacité de sorption des principaux colloïdes négatifs à pH 7

Tableau 4. La capacité de sorption des principaux colloïdes négatifs à pH

Kaolinite	3 à 15 meq / 100 g
Halloysite	5 à 50 meq / 100 g
Montmorillonite	80 à 150 meq / 100 g
Illite	10 à 40 meq / 100 g
Chlorite	10 à 40 meq / 100 g
Vermiculite	100 à 150 meq / 100 g
Matière organique	100 à 450 meq / 100 g

Mais, **pour un même colloïde, les valeurs de CEC dépendent du pH** : l'augmentation des valeurs de pH se traduit généralement, pour les colloïdes négatifs, par une augmentation des charges négatives. Inversement, l'acidification du sol se traduit par une diminution de la sorption cationique.

A titre d'exemple, le tableau 5 donne les valeurs CaO sorbé (en meq / 100g d'argile) en fonction du pH :

Tableau 5. Les valeurs CaO sorbé (en meq / 100g d'argile) en fonction du pH

pH	CaO sorbé en meq pour 100g d'argile
2.61	0.53
3.81	3.75
4.75	6.75
6.35	8.70
6.90	11.90
7.00	14.95
8.00	16.76
8.60	25.44
10.54	35.12

#### B. La nature des ions

La fixation des ions suit un ordre préférentiel : les cations habituellement fixés sur le complexe sont :

- ✓ les ions H<sup>+</sup>
- ✓ les cations métalliques, parmi lesquels :
  - certains sont fixés en quantité importante : Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>,...
  - d'autres en quantité généralement plus limitée :

l'ion ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

les oligo-éléments :  $Mn^{++}$ ,  $Zn^{++}$ ,  $Cu^{++}$

le fer  $Fe^{++}$  ou  $Fe^{+++}$

l'aluminium  $Al^{+++}$

L'intensité avec laquelle ces ions sont retenus est en général la suivant :

Anions:  $SO_4 > F > NO_3 > Cl > Br > \dots$

Cations :  $Li < Na < Mg < Ca < Ba < Al < H$

Un cation est donc déplaçable par tous ceux qui sont situés à sa droite.

Mais cet ordre de préférence (cations à égales concentrations dans la solution du sol) est différent pour chaque type d'argile et pour l'humus.

### *Par exemple*

Kaolinite	$Na < H < K < Mg < Ca < Ba$
Montmorillonite	$Na < K < H < Mg < Ca < Ba$
Mica	$Na < Mg < Ca < K < H < Ba$

Acides humiques	$Na < K < Mg < Ca < Ba$
-----------------	-------------------------

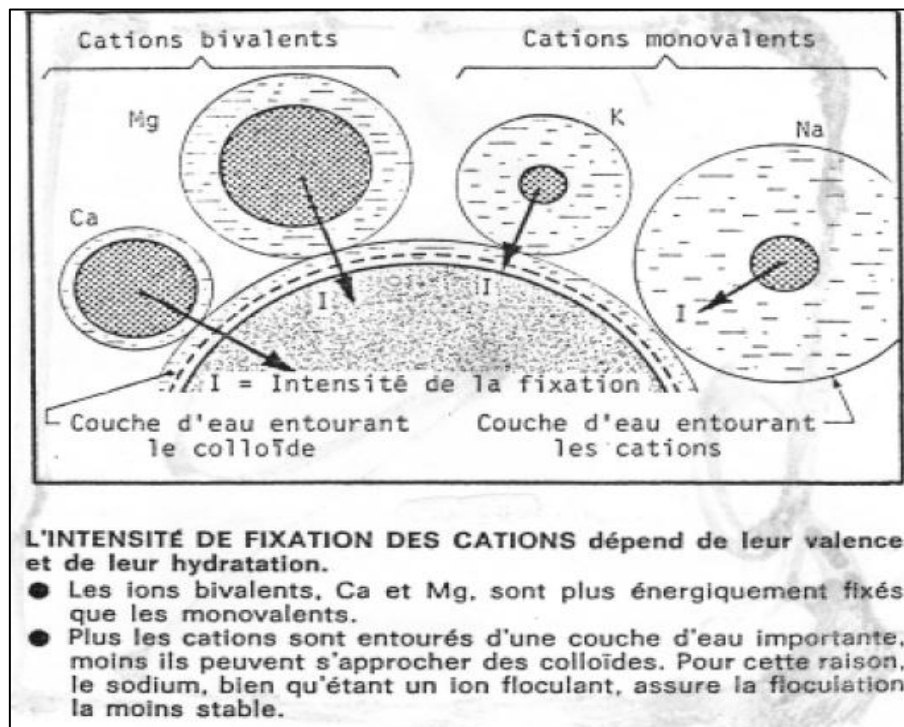


Fig. 13. La fixation des cations : valence et degré d'hydratation (tiré de D. Soltner, 2014).

**Cet ordre préférentiel de fixation**, d'une grande importance pédologique, peut s'expliquer ainsi :

→ **L'intensité de fixation dépend de la valence et de l'hydratation des ions :**

Les ions bivalents  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  sont plus énergiquement retenus que les ions monovalents  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , ...

Les ions faiblement hydratés ( $\text{Mg}^{++}$  et surtout  $\text{Ca}^{++}$ ), c'est à dire entourés d'une faible couche d'eau sont mieux fixés que les ions fortement hydratés ( $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$ ).

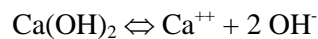
→ **Pour chaque ion, il existe un équilibre entre la quantité de cet ion fixée sur le complexe adsorbant et la concentration de cet ion dans la solution du sol.**

### 3.1.1.2. Le mécanisme de l'échange des cations

#### a) Deux exemples d'échange de cations

##### • Le remplacement des ions $\text{H}^+$ par des cations $\text{Ca}^{++}$

Lorsque l'on introduit de la chaux dans un sol, ses molécules se dissocient :



La concentration d'ions  $\text{Ca}^{++}$  augmente dans la solution du sol et cette concentration se communique au complexe, par exemple un complexe argilo-humique abondamment garni d'ions  $\text{H}^+$  : un cation  $\text{Ca}^{++}$  prend la place de deux ions  $\text{H}^+$ , qui se combinent aux anions  $\text{OH}^-$  apportés par la chaux pour former de l'eau :



##### • L'échange de cations $\text{Ca}^{++}$ contre des cations $\text{K}^+$ :

Si dans ce sol enrichi en calcium par le chaulage, on introduit du chlorure de potassium ( $\text{KCl}$ , engrais potassique), ce sel se dissout, puis se dissocie en anions  $\text{Cl}^-$  et cations  $\text{K}^+$ . Ces derniers, augmentant la concentration en ions  $\text{K}^+$  de la solution, provoquent un échange avec le complexe : ils prennent sur celui-ci la place d'ions  $\text{Ca}^{++}$ , à raison de 2  $\text{K}^+$  pour 1  $\text{Ca}^{++}$ . Ces cations  $\text{Ca}^{++}$  remis en solution forment, avec les anions  $\text{Cl}^-$  du  $\text{CaCl}_2$ , sel soluble qui peut être lessivé : cet apport d'engrais potassique a provoqué une décalcification du sol : **c'est l'action décalcifiante des engrais potassiques.**

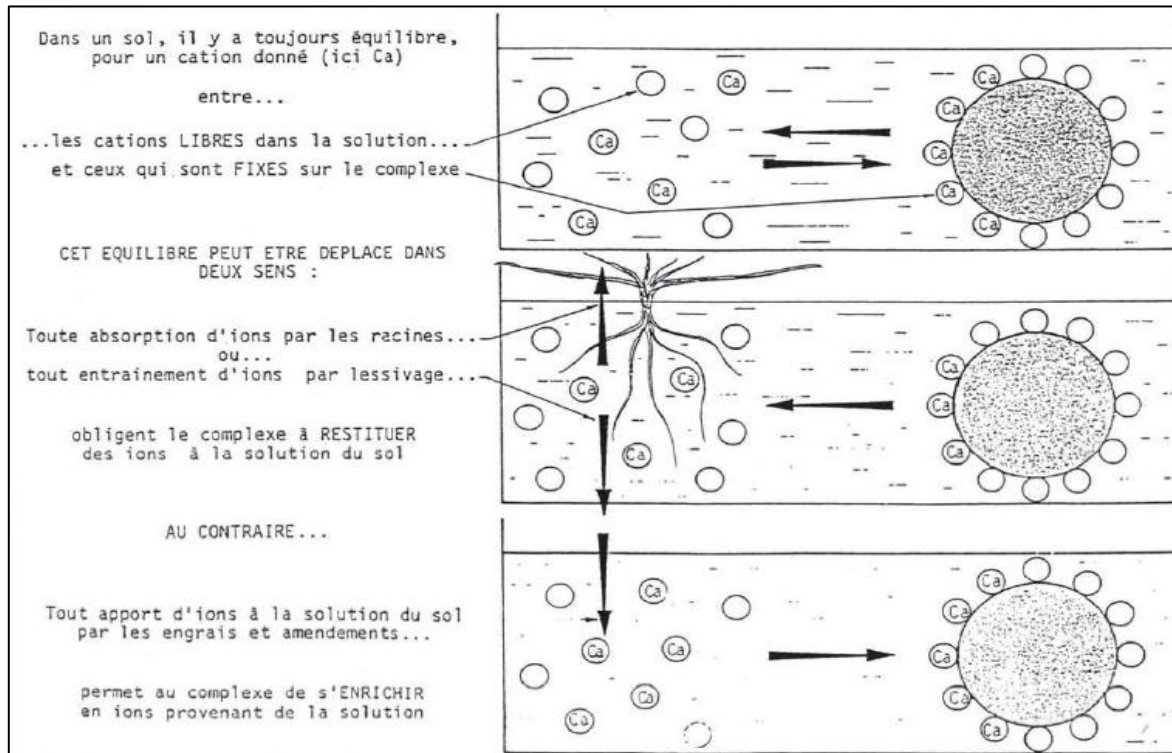
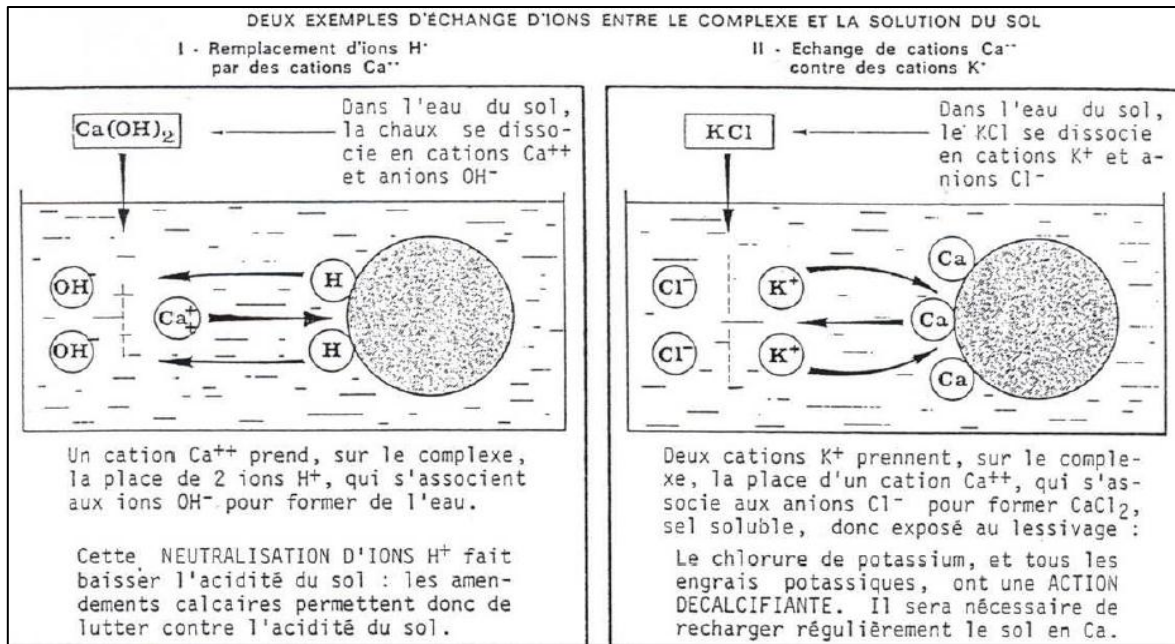
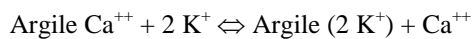


Fig. 14. La fixation des cations : valence et degré d'hydratation (tiré de D. Soltner, 2014).

**Recherche d'un équilibre entre complexe et solution du sol**

Supposons la présence simultanée des ions K<sup>+</sup> et Ca<sup>++</sup> dans le système : argile- solution du sol.

Nous avons l'équation d'équilibre :



Avec :  $k = \frac{\text{argileCa}^{++} \times (\text{K}^+)^2}{\text{argile K}^+ \times (\text{Ca}^{++})}$

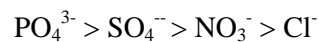
k = constante d'équilibre qui dépend de la nature des colloïdes, de la nature des ions,...

### 3.2. LA SORPTION ET L'ÉCHANGE DES ANIONS

Dans les eaux de drainage, on trouve beaucoup d'anions  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , .....

Apparemment donc ces ions ne sont pas retenus par le pouvoir adsorbant du sol. De fait, chacun sait que les nitrates sont très facilement perdus par lessivage.

Pourtant, les anions  $\text{PO}_4^{3-}$  sont très bien retenus. Certains anions peuvent donc être fixés, et leur énergie de fixation serait la suivante, par ordre décroissant :



Plusieurs mécanismes expliquent cette fixation : • la fixation sur les hydroxydes de fer et d'aluminium, colloïdes positifs liés à l'argile, en échange contre des ions  $\text{OH}^-$ ,

• fixation sur quelques valences positives des argiles, en échange contre des ions  $\text{OH}^-$ , ou sur des liaisons de bordure ( $\text{Al}^{+++}$ ),

• fixation sur l'argile ou l'humus par l'intermédiaire d'ions  $\text{Ca}^{++}$  (ponts calciques).

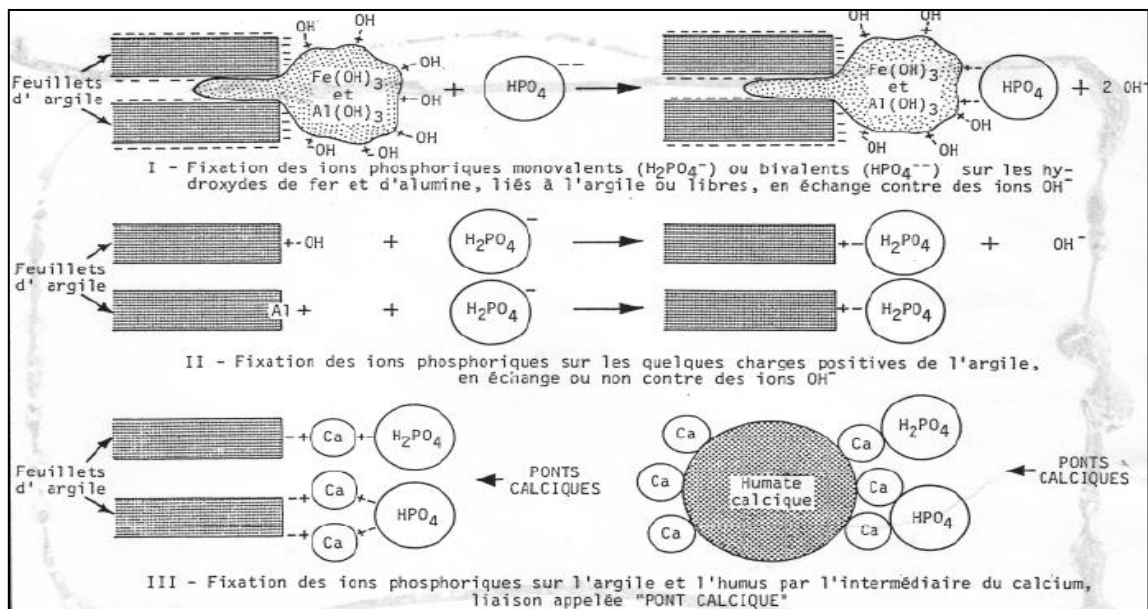


Fig. 15. Les trois modes de fixation des anions sur le complexe argilo-humique (tiré de Soltner, 2014)

### 3.3. LES PROPRIETES ELECTRO-IONIQUES DU SOL

#### 3.3.1. LES VALEURS CARACTERISTIQUES DU COMPLEXE ADSORBANT: CEC ET V%

### ***La capacité d'échange (T ou CEC)***

La capacité totale d'échange ou capacité d'échange de cations est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber (pour 100 g de matière sèche). Autrement dit, cette mesure représente le total des charges négatives du sol disponibles pour la fixation :

- des ions  $H^+$  et  $Al^{+++}$ ,
- des cations appelés bases échangeables :  $Ca^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  (l'ion  $NH_4^+$  peut être présent aussi, mais étant très minoritaire, il n'est pas pris en compte).

*On l'exprime en milliéquivalents (meq) pour 100 g de matière sèche. L'équivalent d'un corps étant le rapport masse atomique (en g) / valence de ce corps. Le milliéquivalent en est le millième.*

*Exemple : Un sol qui a une CEC de 20 meq pourrait retenir :*  
- en  $Ca^{++}$  :  $20 \text{ meq} * 40/2 = 400 \text{ mg de Ca} / 100 \text{ g de sol}$  ,  
- en  $Na^+$  :  $20 \text{ meq} * 23/1 = 460 \text{ mg de Na} / 100 \text{ g de sol}$ .

La CEC d'un sol dépend de la nature des colloïdes de ce sol et du pH de ce sol.

### ***La somme des bases échangeables (S)***

Il s'agit de la somme des quantités de cations basiques échangeables, fixés sur le complexe à un moment donné. On l'exprime également en meq pour 100 g de matière sèche.

La différence T-S représente donc la quantité d'ions  $H^+$  et  $Al^{+++}$  fixés. Cette différence peut encore être appelée insaturation.

$$T = S + Al^{+++} + H^+$$

### ***Le taux de saturation (V% ou S/T)***

Le taux de saturation est le rapport somme des bases échangeables / CEC, exprimé en %. Ce taux est variable d'un sol à l'autre, et, pour un même sol d'une année à l'autre. En effet toute cause capable d'apporter ou au contraire d'enlever des bases échangeables au complexe le fait varier.

Ce taux dépend :

- de la richesse chimique de la roche mère,
- de la fréquence et de l'importance des apports de cations (surtout Ca lors des amendements calcaires,...),

- de l'importance du lessivage, donc du climat, et de la perméabilité du sol.

Les sols calcaires ont souvent un taux de saturation supérieur à 80 %.

Les sols sableux peuvent être pauvres en bases et avoir un taux de saturation inférieur à 20 %. Le taux de saturation du complexe adsorbant est un précieux indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du sol. Toutefois, il faut se garder d'établir une équivalence automatique entre taux de saturation et niveau trophique : cette attitude semble critiquable car le niveau trophique (ou plus largement la fertilité) d'un sol dépend de beaucoup d'autres facteurs tels que la teneur en argile, la structure, l'aération, le PH, la profondeur prospectable par les racines, la réserve utile en eau, les teneurs en N P K ,...

Selon la valeur du taux de saturation, on peut ajouter un adjectif au nom du sol :

Taux de saturation S/ T	Adjectif
100 %	saturé
95 %	quasi-saturé
80 %	méso-saturé
50 %	oligo-saturé
30 %	Désaturé
15 %	hyper-désaturé
0 %	

Le complexe adsorbant, par son pouvoir adsorbant,

- met en réserve les éléments nutritifs qui, sans lui, seraient perdus par lessivage, en les échangeant principalement contre les ions  $\text{Ca}^{++}$ , faciles à déplacer,
- libère ces éléments pour les racines, en les échangeant notamment contre les ions  $\text{H}^+$  formés continuellement par l'activité biologique (microbes et racines) élaborant de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ),
- régularise la composition de la solution du sol, milieu de vie des racines et des microbes.

Ce mécanisme de régulation concerne, outre la teneur en bases échangeables, mais aussi la teneur en  $\text{Al}^{+++}$  et en  $\text{H}^+$ , ions responsables de l'acidité des sols.

### 3.4. LES ORGANISMES DU SOL

La population du sol est nombreuse, variée et en équilibre :

- **Elle est nombreuse** : bien que très variable d'un sol à l'autre et d'une saison à l'autre, la population du sol représente un poids de matière vivante à l'hectare d'environ 2 à 2,5 tonnes.
- **Elle est variée** : une grande diversité d'espèces, de taille, de modes de nutrition, de source d'énergie, caractérise les êtres vivants qui le composent.

- **Elle est en équilibre** : vivants en communauté, ces êtres sont tantôt en concurrence, tantôt en association. Très sensibles aux conditions de milieu, température, humidité, aération, pH, aliment organique et minéraux.

Tableau 6. Diversité et abondance des organismes vivants composant la faune et la microflore du sol

		Nombre d'espèces	Taille	Abondance <sup>1</sup>	Biomasse <sup>2</sup>
<b>Faune du sol</b>					
<b>Microfaune</b>	Nématodes	65	0,1 à 5 mm	106 à 108 /m <sup>2</sup>	1 à 30
	Protozoaires	65	0,2 mm	103 à 1011 /m <sup>2</sup>	6 à > 30
<b>Mésafaune</b>	Arthropodes inférieurs et enchytraéides	Arthropodes : 140 Enchytraéides : 36	0,2 à 4 mm	2x10 <sup>4</sup> à 4x10 <sup>5</sup> /m <sup>2</sup>	0,2 à 400
	<b>Macrofaune</b>	Lombrics, araignées, myriapodes	Lombrics : 11 Myriapodes : 6	> 4 mm	Lombrics : 10 à 103 /m <sup>2</sup> Myriapodes : 20 à 700 /m <sup>2</sup>
<b>Microflore du sol</b>					
<b>Bactéries</b>		104 génotypes microbiens	0,01 à 0,05 mm	108 à 109 /g	2 à 200
<b>Champignons</b>		différents / g	< 1 µm	104 à 106 /g	100 à 150
<b>Algues</b>			0,2 mm	102 à 104 /g	5 à 20

<sup>1</sup> Par gramme (/g) ou par mètre carré (/m<sup>2</sup>) de sol

<sup>2</sup> Gramme de biomasse par mètre carré (g/m<sup>2</sup>) de sol

source : Locatelli, 2013

### 3.4.1. La faune du sol

#### a) Les vers de terre

Leur population varierait de moins de 100 au m<sup>2</sup> des sols peu fermés, à plus de 1000 dans des sols recevant d'abondants apports organiques.



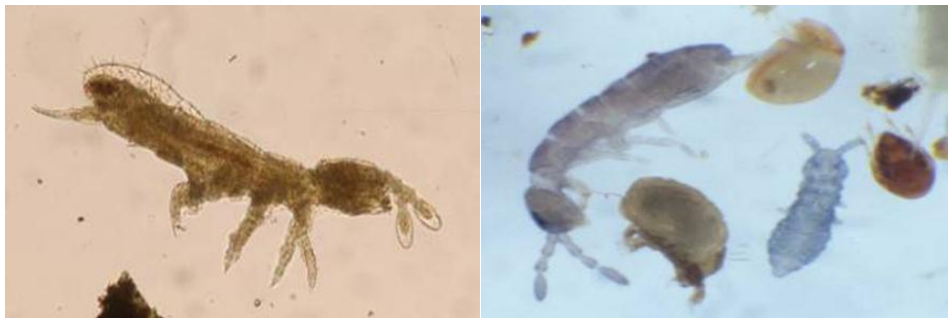
**Planche 1 : les vers de terre**

Leur mode de vie est celui d'êtres hygrophiles: recherchant une humidité et une température moyenne, ils descendent profondément de l'hiver et l'été, et remontent au printemps et à l'automne, mais restent actifs toute l'année. Ils se nourrissent presque uniquement de débris végétaux qu'ils prennent en surface et entraînent en profondeur, les malaxant avec la terre qu'ils intègrent.

Les conditions favorables à leur développement, sont une humidité modérée et de l'oxygène, un pH neutre, la présence de calcium, nécessaire au fonctionnement de leurs glandes, et surtout des aliments d'important apports organiques.

**b) Les anthropoïdes (mésafaunes): (insectes, arachnides et myriapodes)**

Les insectes et autres anthropoïdes appartiennent surtout à des espèces très petites (mésafaunes), citons surtout les collomboles (planche 2) (insectes), les acariens (planche 3), arachnides, les myriapodes (planche 4) et les isopodes (planche 5) dont on trouve parfois plus de 200 000 individus au m<sup>2</sup>, vivent dans la litière et l'espace poral à la surface du sol.



**Planche 2: les collemboles**



**Planche 3: les acariens**



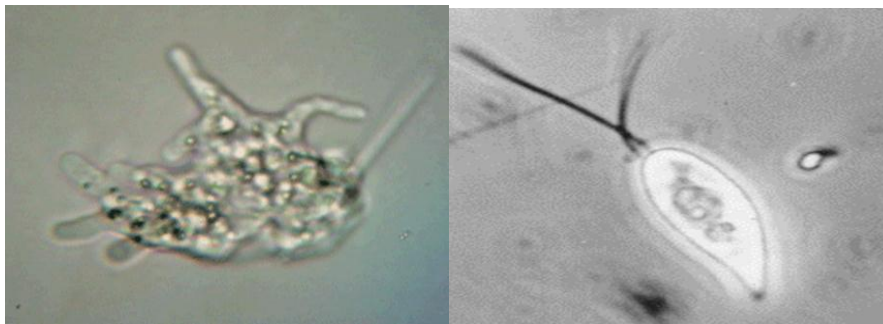
**Planche 4: les myriapodes**



**Planche 5: les isopodes**

**c) Les protozoaires (micro-organismes)**

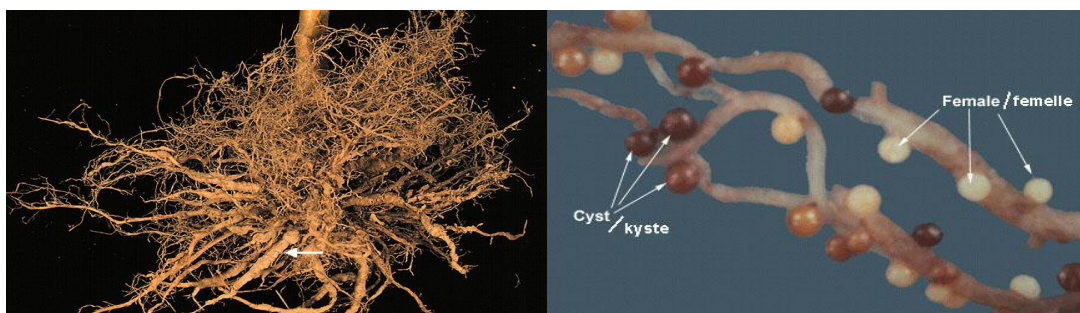
Animaux unicellulaires (planche 6) abondants dans les 10 premiers cm du sol, surtout dans des sols humides et riches en matière organique, leur nombre varie de 1 à 1,5 millions/ 1g de terre, ils sont prédateurs de micro-organismes, surtout des bactéries.



**Planche 6: Les protozoaires**

**d) Les Nématodes (micro-organismes)**

Petits vers ronds de 0,1 à 1 mm (planche 7), on peut en trouver de 150 000 à 20 millions / m<sup>2</sup> de terre surtout dans les prairies.



**Planche 7: a) Nématodes à gales**

**b) Nématodes à kystes**

**3.4.2. Le rôle de faune dans le sol**

Dans la formation du sol et l'entretien de sa fertilité, la faune du sol exerce une action mécanique, chimique et biologique:

- **une action mécanique: formation d'agrégats stable et amélioration de la porosité du sol:**

Les animaux du sol fragmentent les matières organiques, à la division sommaire des vers de terre, succède le broyage microscopique des myriapodes puis des collomboles, des acariens et des nématodes, puis le brassage énergétique qui subissent ces fragments dans le tube digestif des lombrics, les mélange aux éléments minéraux et aux micro-organismes qui y trouvent des conditions favorables à leur prolifération.

Ce malaxage s'accompagne aussi d'un transport des matières organiques dans tout le profil. A l'augmentation de porosité qui résulte de cette formation d'agrégats, s'ajoute la meilleure circulation de l'eau et de l'air au travers des galeries verticales des lombrics.

- **une action chimique: lutte contre le lessivage et enrichissement en minéraux assimilables:**

Remontant en surface une partie des éléments lessivés, notamment du calcium, les vers de terre auraient tendance à limiter la décalcination du sol.

Mais le plus important encore semble leur rôle d'intermédiaire entre le sol et la plante: leurs déjections en effet sont considérablement plus riche en potassium, phosphore et magnésium assimilables.

- **une action biologique: stimulation de la flore microbienne des sols**

Tous les animaux du sol sont microphytophage, c'est-à-dire consomment des bactéries, des champignons et des algues.

Ce rôle semble indispensable à l'humification, on remarque que les matières organiques contenues dans les déjections des animaux du sol s'humifient plus facilement que les autres débris végétaux.

### **3.4.3. La flore du sol**

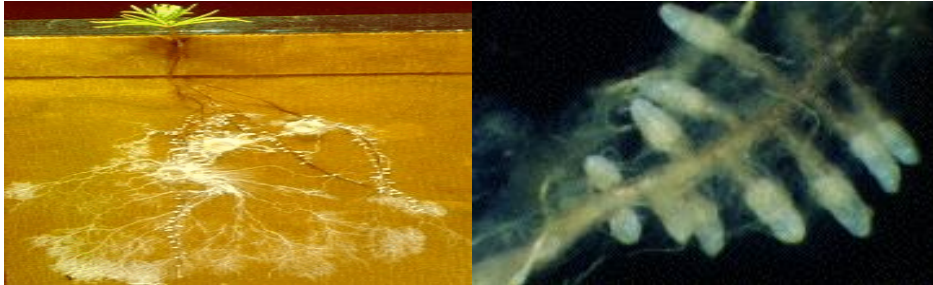
#### **a) Les algues**

Autotrophes abondent surtout dans les 2 premiers cm du sol, leur nombres atteint 100 000/g de terre. Certaines espèces pourtant sont hétérogènes et vivent dans les couches plus profondes, dégradent les MO.

#### **b) Les Champignons ou Mycètes, surtout des moisissures:**

Des genres *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Mucor* et *Trichoderma* leur population atteint 1 000 à 1500 km/ha, ce sont des êtres hétérotrophes, donc vivant au dépend des MO, d'autres, vivants en symbiose avec des plantes supérieures (planche 8) (le mycélium apporte des sels minéraux aux plantes et la plante apporte de la matière organique aux champignons).

Ils acceptent le milieu acide où ils ne rencontrent pas la concurrence des bactéries. Ils interviennent surtout dans la dégradation de la cellulose et la lignine, préparant ainsi l'humification, dans la dégradation des matières azotées en ammoniacque (ammonisation) préparant la tâche des microbes nitrificateurs.



**Planche 8: Champignons Ectomycorhises**

#### **c) Les actinomycètes**

Ont la taille et le caractère unicellulaire des bactéries, mais l'aspect ramifié des moisissures, leur population serait de 100 000 à 30 millions /1 g de terre, leur mode de vie est intermédiaire entre celui des moisissures et des bactéries: ils sont plus sensibles à l'acidité que les moisissures, et préfèrent des pH de 6 à 7,5, ils peuvent s'attaquer à la lignine, préparant l'humification, et ils sont capables de dégrader l'humus stables, libérant l'azote qu'ils contiennent, ils peuvent vivre en symbiose avec les racines des végétaux.

#### **d) Les bactéries**

La population bactérienne du sol est difficilement à évaluer, elle varie dans un champ en fonction de :

- la profondeur du sol (d'après Reimers) ;
- la saison (d'après Freankel) ;
- type du sol (d'après Waksman) ; en générale, pour une biomasse de 1 500 kg/ ha.

*Les bactéries peuvent être classées en 2 manières*

##### **1) En fonction de leur milieu de vie**

- **Aérobies:** ont besoin d'oxygène pour vivre, leur rôle agricole utile;
- **Anaérobies:** un milieu privé d'air, ont un rôle nuisible.

##### **2) En fonction de leurs sources d'énergie**

- **Hétérotrophes:** tirent leur énergie et leurs matériaux de construction de matière organique. Elles dégradent l'amidon, la cellulose, les protéines, l'urée... participent à la minéralisation et l'humification;

- **Autotrophes:** comme les plantes supérieures tirent leur énergie et leurs matériaux de construction uniquement dans les substances minérales.

Certaines transforment l'**ammoniaque** ( $\text{NH}_3$ ) en acide nitreux et en **nitrites** ( $\text{HNO}_2$ ): ce sont les bactéries nitreuses, **Nitrosococcus**.

D'autres oxydent l'acide nitreux et les **nitrites** ( $\text{HNO}_2$ ) en acide nitrique et le **nitrites** ( $\text{HNO}_3$ ): ce sont les bactéries nitriques, **Nitrobacters**.

Certaines encore peuvent se nourrir des **nitrites** du sol qu'elles retransforment ainsi en **azote organique**, les protégeant contre le risque de lessivage: ce sont les bactéries **Réorganisatrices**.

D'autres enfin peuvent, en milieu anaérobie, transformer les nitrates en azote gazeux qui est alors perdu. Ce sont les bactéries **Dénitrificatrices**.

- **Semi-autotrophes**

Ces bactéries ont une source d'azote minérale: l'azote de l'air contenu dans les cavités du sol, et une source de carbone organique. Ce sont les bactéries fixatrices d'azote.

- pour certaines, ce carbone est fourni par les glucides de plantes avec lesquelles elles vivent en association ou symbiose, les Rhizobium vivant dans les racines des légumineuses ;

- pour d'autres ce carbone est fourni par les matières organiques en décomposition dans le sol. Ce sont les *Azotobacter* et les *Clostridium*, bactéries libres dans le sol.

### ***La vie et l'activité des bactéries***

**Elles sont** affectées par 5 conditions de milieu qui sélectionnent les espèces et influent sur leur nombre:

- **L'aération**, qui explique notamment la diminution rapide du nombre de bactéries avec la profondeur.

- **L'humidité**, dont le niveau optimum est en général le même pour les racines et pour les microbes.

- **La température**, qui accroît le rythme de développement des microbes, jusqu'à un optimum de  $21^\circ$  à  $38^\circ$  selon les espèces.

- **Le pH**, auquel les bactéries sont beaucoup plus sensibles que les champignons : c'est entre pH 6 et 8 que leur développement est le meilleur.
- **La présence de calcium échangeable**, en rapport avec le pH, et nécessaire à la neutralisation des acides organiques formés par l'activité microbienne.

### 3.5. TRANSFORMATION D'ORIGINE MICROBIENNE

L'importance de l'intervention des microorganismes dans le cas de carbone (C), d'azote(N), de soufre (S), elle est capitale, puisque l'absence, voire l'inactivité des microorganismes, entraînerait un arrêt de l'approvisionnement naturel des sols en azote et un blocage du turnover de C, N, S se traduisant par l'accumulation de ces éléments sous forme organique inutilisable par les végétaux.

Dans le cas des autres éléments, tels que le phosphore (P), l'intervention microbienne est beaucoup plus discrète, les transformations microbiennes peuvent contribuer à l'enrichir ou à l'appauvrir. Les bactéries jouent un rôle dans toutes les transformations de la matière organique, dont la minéralisation. Elles synthétisent des polysaccharides très résistants à la dégradation qui forment une part importante de la matière organique humifiée (l'humus).

Effet de la rhizosphère: La rhizosphère est la région du sol située sous les racines des plantes et soumise à leur influence directe. 10% à 40% des composés photosynthétisés (à partir du CO<sub>2</sub> et de l'eau) par les plantes sont relargués dans la rhizosphère, soit sous forme de substances libérées directement par les racines (acides organiques, sucres) : c'est l'exsudation racinaire, soit sous forme de tissus végétaux détachés de la plante par frottements mécaniques. Cette « rhizo-déposition » est favorable à la multiplication des micro-organismes (bactéries, champignons microscopiques).

Définition :

Les effets: C'est un lieu d'intenses échanges entre le végétal et le substrat minéral. C'est dans la rhizosphère que par le biais des racines, le végétal s'ancre dans le sol, y puise les ressources minérales (cations, anions) et l'eau qu'il utilise pour sa croissance et sa régulation thermique par le processus d'évapotranspiration. Elle joue un rôle important dans la résistance des sols à l'érosion, au gel, aux incendies, aux inondations, etc. La rhizosphère a un effet protecteur sur le sol, comme elle est aussi l'habitat de nombreux micro-organismes, et d'invertébrés tels que les vers de terre.

**Conclusion:** On trouve dans les sols, une grande variété d'organismes vivants : des bactéries, des champignons, des algues, les parties souterraines des plantes, ainsi qu'une faune très variée allant des protozoaires aux mammifères. L'ensemble de ces organismes font partie intégrante du système sol et participe par leur activité à la formation et à l'évolution des sols.

## CHAPITRE IV : CLASSIFICATION DES SOLS (NOTIONS)

### 4.1. LES DIFFERENTES CLASSIFICATIONS (RUSSE, AMERICAINE, FRANÇAISE)

La classification **des sols** concerne le regroupement des sols ayant une gamme similaire de propriétés (chimiques, physiques et biologiques) dans des unités qui peuvent être géo-référencées et cartographiées. Les sols sont une ressource naturelle très complexe, beaucoup plus que l'air et l'eau.

Les sols contiennent tous les éléments chimiques naturels et combinent des états simultanément solides, liquides et gazeux. Par ailleurs, le nombre de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques et leurs combinaisons sont presque infinis. Il n'est donc pas étonnant que de nombreuses approches différentes aient été proposées pour arriver à un regroupement judicieux des différents sols. De plus, des systèmes de classification des sols ont été développés dans des buts différents :

- **La Soil Taxonomy** pour interpréter les études de sols;
- **Légende FAO pour représenter la répartition mondiale et la géographie des sols;**
- **Base de référence mondiale pour faciliter les corrélations** entre les différents systèmes de classification des sols.

On peut distinguer trois étapes différentes pour illustrer le développement de systèmes de classification des sols. Les plus anciens systèmes de classification des sols (Russie, USDA 1938) ont porté sur l'environnement et les facteurs de formation des sols pour classer les sols en sols zonaux (déterminés par le climat et la végétation) et les sols azonaux et intrazonaux (déterminés par le matériau d'origine et le temps de développement). La différence entre les sols azonaux et intrazonaux a été faite sur la base du développement du profil du sol. Un développement ultérieur a été axé sur les processus qui se produisent dans le sol lui-même (comme la ferallitisation, la salinisation, la lixiviation et l'accumulation etc ...). Ces processus ont été grossièrement caractérisés par les propriétés du sol. Un bon exemple de cette dernière approche est le système de classification français (CPCS, 1967). La classification moderne des sols a commencé avec la publication de la 7<sup>e</sup> version de la *Soil Taxonomy* USDA, où les propriétés du sol précisément définies et quantifiées en tant que telles, ou en combinaison, ont été utilisées pour définir les «horizons de diagnostic ». Ceux-ci ont été utilisés à leur tour pour définir les grandes classes de sols.

Des approches postmodernes de classification des sols font un usage intensif des statistiques et comprennent des systèmes numériques de classification des sols (développés par Webster, Fitzpatrick et McBratney, entre autres).

## **4.2. APERÇU SUR LES SOLS D'ALGERIE ET LEURS RELATIONS AVEC LE CLIMAT ET LA GEOMORPHOLOGIE (d'après J.-H. Durand).**

### **4.2.1. Les sols des régions sahariennes**

La formation des sols dans cette région est entièrement dominée par les conditions climatiques où le vent joue un rôle prépondérant. D'où formation de deux grands types de sols éoliens :

*Sols éoliens d'ablation* sans « terre fine » et dont le caractère essentiel, l'absence de terre fine, ne dépend pas de la roche mère. L'enlèvement de toutes les parties de roches suffisamment fines pour être entraînées ne laisse sur place que des cailloux plus ou moins grossiers qui se concentrent en surface et donnent ce qu'on appelle à tort un « reg » 10. La roche mère ne joue ici qu'un rôle secondaire : elle n'intervient que pour différencier le produit final : sol calcaire dont les éléments sont finement vermiculés, sol siliceux, gypseux... Le « reg » est par excellence un sol zonal, son caractère est constant : surface couverte de cailloux éolisés reposant sur une épaisseur très variable d'alluvions plus ou moins meubles.

*Sols éoliens d'accumulation* formés par les particules entraînées par le vent qui s'accumulent dans les zones abritées formant des dépôts de sable plus ou moins développés : rehboub, nebka, dunes, jusqu'aux grands Ergs. Ces accumulations de sable peuvent grimper le long des versants des montagnes et former des placages sableux plus ou moins importants (dans la région d'Aïn-Sefra, de Beni-Ounif, de Laghouat). La roche mère n'intervient ici que pour différencier le sable accumulé, mais ne joue aucun rôle déterminant dans la genèse du sol formé par l'action du vent. Un profil étudié dans la région de Laghouat peut caractériser les sols de ces dunes. Bien drainé, sans végétation ni culture, il est homogène sur toute son épaisseur (4 à 5 m) et le sable roux qui le constitue ne contient pas de sels solubles. La granulométrie révèle deux maxima : à 0,3 mm (39,4 %) et à 0,15 mm (37,4 %).

### **4.2.2. Les sols des régions semi-arides**

Il n'existe pas de définition nette de la semi-aridité. Selon J.-H. Durand, on peut dire pour la pédologie qu'on passe de la zone aride à la zone semi-aride lorsque la végétation, entretenue par une pluviométrie encore faible (de 200 à 500 mm par an), est cependant suffisante pour freiner l'action du vent dont le rôle devient dès lors secondaire dans la pédogenèse. Et l'on passe de la zone semi-aride à la zone « humide » lorsque la pluviométrie est suffisante pour donner un tapis végétal herbacé continu ou subcontinu et un couvert forestier.

C'est pourquoi on peut dire que le sol zonal est, dans ces conditions, dû à l'équilibre vent-pluie dans la zone semi-aride. L'armoise blanche et l'alfa qui constituent la végétation de ces régions ont un enracinement assez profond pour pouvoir résister à la sécheresse. Les sols de cette région peuvent

ainsi être fixés par cette végétation steppique, mais leur évolution est freinée par le manque d'eau de percolation. La pluviosité n'est pas assez forte pour modifier le complexe absorbant qui reste dans son état primitif. D'où la stabilité du profil de ces sols. Les roches mères sont en général calcifères : alluvions éoliennes déposées sur des calcaires pulvérulents. Elles constituent cependant un facteur de différenciation donnant, suivant leur nature : des sols contenant du calcaire ou du gypse (sols calciques), et des sols qui n'en contiennent pas (sols «en équilibre»), mais ces derniers sont rares.

**Les sols calciques** ne présentent qu'un seul horizon différencié peu épais. Ils sont plus ou moins riches en calcaire, leur complexe absorbant est saturé par l'ion Ca et leur pH est toujours compris entre 7 et 8.

Ils contiennent des doses appréciables de matières organiques (entre 0,3 et 1 %), mais pas de sels solubles, l'ensemble donnant à leur horizon meuble une structure motteuse. Dans ces sols, le calcaire est surtout présent dans la fraction sableuse et n'intervient que peu dans leur dynamique. Ce sont donc des sols calciques typiques.

Ces conditions seraient favorables à l'agriculture, mais ces sols reposent en général sur une croûte calcaire pulvérulente imperméable aux racines, sur laquelle nous reviendrons. A côté des sols calciques typiques, on observe deux sous-types : des sols gypseux et des sols formés aux dépens d'éboulis des deux précédents, présentant toujours les mêmes caractères : texture légère, bonne perméabilité mais faible capacité de rétention de l'eau due à leur relative pauvreté en colloïdes.

**Les sols en équilibre** : sols ayant les mêmes caractères que les sols calciques mais formés sur roche mère non calcifère. Leur complexe absorbant est encore saturé en ion Ca, les mouvements de substances y sont inexistantes et ils ne présentent qu'un seul horizon différencié. Ces sols sont rares en Algérie car les roches calcaires ou gypseuses couvrent environ 90 % de la surface des zones semi-arides. Cependant, on peut retrouver de ces sols « en équilibre », non calciques, dans la région d'Aflou et sur les formations d'épanchement de l'Oranie occidentale (basaltes par exemple).

Enfin, on trouve encore dans ces zones semi-arides, en position intra- zonale, des sols éoliens d'ablation ou d'accumulation et des sols lessivés. Mais, d'une façon générale, l'étude des sols des régions semi-arides montre que, contrairement à l'opinion souvent admise, les sols n'y sont pas normalement riches en sels solubles. Par contre, il est fréquent d'y rencontrer des solontchak (sols salins) dans les bas-fonds mal drainés ou alimentés en eau par une nappe phréatique superficielle. Il en est de même d'ailleurs dans les régions sahariennes.

#### **4.2.3. Les sols des régions telliennes humides**

Les sols de ces régions humides peuvent se définir par leur mode de formation original : entraînement de substances en profondeur sous l'action des eaux d'infiltration. Mais cette migration est conditionnée

par la nature de la roche mère, très variable dans le Tell algérien du fait de sa structure plissée. D'où une grande variété de sols dont le seul caractère commun est un lessivage plus ou moins poussé, et que J.-H, Durand classe en trois grands groupes.

**a) Le groupe calcaire** comporte tous les sols formés à partir de roches calcaires. Deux types de sols : sols calcaires et sols décalcifiés.

*Les sols calcaires* ne présentent qu'un seul horizon différencié et se caractérisent par l'accumulation de calcaire au sommet du profil. Cet apport de calcaire vers la surface n'est pas partout le fait du même processus. Il peut se faire par l'intermédiaire des végétaux, soit mécaniquement, les racines remontant les débris de roche pris en profondeur, soit chimiquement, la plante accumulant dans ses parties aériennes du calcaire libéré ensuite par destruction des matières organiques. La chaleur et l'humidité provoquent également un mouvement qui peut se produire pour les sels solubles, même avec une faible hydratation si la perméabilité du sol est suffisante pour que les mouvements de l'eau soient rapides sous l'action de fortes températures. Enfin, cette accumulation superficielle peut encore résulter d'une attaque du complexe absorbant par le gaz carbonique de l'eau de pluie, fixant le calcaire dissous qui précipite ensuite par suite d'une sécheresse trop grande du milieu et d'une forte température.

*Les sols décalcifiés* sont également formés sur roches calcaires et ont une teneur en calcaire variable avec la profondeur. Mais à la différence des précédents, les horizons superficiels en contiennent moins que les horizons sous-jacents, le calcaire s'accumulant au sommet de la roche mère sous forme de nodules et à l'état diffus. Ces sols décalcifiés sont très répandus en Algérie où ils couvrent de grandes surfaces. Dans les régions telliennes, ils se forment chaque fois que la roche mère est argileuse ou donne des produits de décomposition argileux. En d'autres termes, les sols calcaires occupent en Algérie les régions dans lesquelles les roches mères calcifères donnent par altération des produits de décomposition perméables et les sols décalcifiés là où -tout ou partie du carbonate de chaux a disparu de la roche mère calcaire et où, par conséquent, sa décomposition superficielle donne des produits argileux imperméables.

**b) Groupe non-calcaire**, qui comporte les sols formés sur roche mère non calcaire. Deux types principaux : sols insaturés et sols podzoliques. Les sols insaturés résultent de la décomposition superficielle de roches non calcaires donnant des éléments grossiers riches en bases (les granites de Nedroma par exemple) ou encore des éléments argileux imperméables : sols formés par les schistes, les micaschistes, basaltes, granites basiques, ainsi que sur les alluvions argileuses. Des roches comme les gneiss et leurs arènes, certains schistes (schistes crétacés par exemple), relativement perméables et donnant par altération des produits fins peu perméables" et pauvres en bases, donnent une autre variété

de sols insaturés : des sols insaturés acides. Ce sont en général des sols de montagne plus ou moins argileux.

*Les sols podzoliques* se forment dans des conditions d'humidité telles que les sels sont dissous et entraînés en profondeur de même que les colloïdes organiques et minéraux (argile, silice colloïdale). D'une façon générale, dans les régions où la pluviosité annuelle est supérieure à 500 mm, les sols podzoliques se forment en Algérie à partir de roches non calcaires produisant des éléments grossiers pauvres en bases; perméabilité et pluviométrie sont alors suffisantes pour permettre la destruction quasi totale du complexe absorbant. Ces sols, très acides se rencontrent dans les régions Nord de l'Algérie, sur les grès de Numidie, les gneiss et certaines dunes, et supportent normalement de belles forêts d'arbres acidophiles (chênes) avec sous-bois dense de bruyère, de dyss, etc. caractéristique.

*c) Groupe des terres rouges méditerranéennes* : il s'agit des sols fortement rubéfiés qui se rencontrent fréquemment en Algérie. Leur aspect est variable suivant les régions, et on peut trouver ces sols en profils normaux sur des terrasses alluviales ou mélangés intimement à des affleurements de roches mères. Dans le premier cas il est à peu près admis que ces sols proviennent du dépôt de limons rouges entraînés dans les plaines par les eaux. Dans le second cas, le problème de leur formation est toujours posé. Ils sont très probablement fossiles, la rubéfaction résultant de la formation de composés ferrifères rouges à partir des silicates.

#### **4.2.4. Les sols «azonaux» (sols locaux)**

A peu près toutes les variétés de sols « azonaux » se retrouvent en Algérie : sols de marais, sols dunaires, sols d'éboulis, sols alluviaux divers, etc. Nous ne reprendrons ici que les plus caractéristiques, laissant de côté ceux qui ne présentent pas de caractères particuliers en Algérie (par exemple les sols dunaires, les sols d'éboulis ou les sols alluviaux), ou ceux qui n'ont qu'une extension très limitée (sols tourbeux, sols de marais), pour nous en tenir à deux séries de sols locaux particulièrement importants en Algérie : les sols salins et les sols à encroûtement.

*Les sols salins*, qui contiennent ou ont contenu aux premiers stades de leur évolution un excès de sels solubles, sont très répandus dans le Tell algérien (plaines de la Mleta et de l'Habra en Oranie, notamment, où la salinité des sols est le principal problème de la mise en valeur) et dans les Hautes Plaines où ils forment de vastes placages aux alentours des chotts. Ce sont surtout des solontchak où les chlorures de sodium sont en quantités telles (plus de 0,2 %) que la végétation naturelle de la région laisse place à une végétation halophile qui disparaît elle-même lorsque la proportion de sels augmente trop.

L'origine des sels peut être variée. Ils proviennent souvent de la décomposition de roches salifères sous l'influence des agents climatiques et des facteurs biologiques. Très nombreux sont les affleurements de

roches salifères en Algérie : gypse triasique; grès du Crétacé moyen; marnes sénoniennes dans le Sud-Constantinois; poudingues, grès et limons rougeâtres de l'Oligocène continental (Aquitaniens) ; poudingues et grès carténiens; argiles, grès et poudingues helvétien; gypse, marnes et calcaires du Sahélien; grès du Pliocène continental (bassins fermés des Hautes Plaines); formations quaternaires des plaines littorales, des basses plaines oranaises et des dépressions fermées... pour ne citer que les principaux.

Mais de toute façon, les solontchaks ne peuvent pas se former sur place car il n'y a jamais assez de sels solubles dans les roches mères, même dans les gypses triasiques affleurant en diapirs. Ils ne peuvent se former que par accumulation des sels en surface dans des bassins fermés, la pluviométrie étant insuffisante pour entraîner en profondeur les sels accumulés. Les solontchaks se forment donc par remontée capillaire d'eaux de nappes souterraines et évaporation in situ. Du fait de l'excès de sels, les colloïdes sont floculés, le sol garde une bonne structure, est perméable à l'air et à l'eau, mais les cultures comme le développement de toute végétation y sont impossibles sans drainage.

**Les sols à encroûtement** sont particulièrement nombreux en Algérie. Ils ne constituent pas un type de sol original, mais se caractérisent par la formation d'une croûte, plus ou moins épaisse et souvent très dure, au sommet du profil, formant un encroûtement calcaire, gypseux ou salin (dans ce dernier cas, il s'agit simplement de solontchaks encroûtés). Ces encroûtements résultent d'une remontée capillaire de substances dissoutes dans l'eau. Dans tous les profils à encroûtement calcaire, le matériau encroûté n'est pas en surface mais à une certaine profondeur fonction du niveau de la nappe qui fournit l'eau de percolation et de l'amplitude locale des températures dont les variations provoquent les mouvements de l'eau. C'est au contraire toujours en surface que se présente l'horizon cimenté par le gypse dans les sols à encroûtements gypseux (région du Souf).

Le mode de formation de ces encroûtements (qui est d'ailleurs toujours discuté, certains, comme G. Gaucher, contestant la possibilité d'une remontée capillaire du calcaire sous l'influence de la seule évaporation dans les conditions actuelles en Algérie) a longtemps été confondu avec celui des grands placages de croûte calcaire qui recouvrent d'immenses espaces dans les Hautes Plaines comme l'a montré J.-H. Durand, ces confusions résultaient de l'imprécision des définitions des différentes formations croûtales en Algérie et de l'absence d'une étude morphologique de l'ensemble du phénomène en rapport avec les conditions du milieu.

**La croûte calcaire** proprement dite, ou croûte zonaire, constitue une véritable carapace continue. Ce n'est pas un sol, mais un dépôt de nappe. Elle résulte en effet du ruissellement en nappe sur des surfaces en faible pente d'eau chargée de bicarbonate de chaux, soumise ensuite à un échauffement provoquant l'évaporation de l'eau et la précipitation du calcaire. La croûte zonaire en Algérie est fossile. C'est très vraisemblablement au Villafranchien qu'ont pu être réalisées les conditions

climatiques nécessaires à son dépôt : pluies d'orage et fortes températures. La croûte zonaire se trouve partout où de l'eau chargée de calcaire a pu ruisseler en nappe : sur les confins sahariens où elle forme de vastes placages, sur les calcaires pulvérulents des Hautes Plaines steppiques ainsi que sur les terrasses anciennes du moyen et du bas Chelif qu'elle a protégées contre l'érosion et qui se trouvent ainsi en relief en bordure des plaines.

On a souvent confondu, avec les croûtes calcaires proprement dites, certaines formations calcaires ou gypseuses d'aspect pulvérulent. Les calcaires pulvérulents surtout couvrent de grandes surfaces dans la partie occidentale des Hautes Plaines autour des chotts. Ils reposent en général sur des calcaires lacustres. Ce sont des formations de dépôt aqueux qui se forment par précipitation du bicarbonate de chaux en solution dans l'eau par suite de son échauffement et du départ du gaz carbonique d'équilibre. Ce ne sont donc que des calcaires précipités par voie chimique : une boue calcaire se dépose rapidement et vient tapisser le fond des lagunes. On trouve également des dépôts localisés aux abords des sources, dépôts de source se formant dans les mêmes conditions. Ces calcaires pulvérulents, constituent donc simplement deux types de tuf calcaire, sans rapport avec les croûtes.

*Les gypses pulvérulents*, beaucoup moins répandus, sont des dépôts typiques de nappes d'eau salée, chotts et sebkhas. Leur dépôt est dû à l'évaporation de l'eau et à sa concentration jusqu'à saturation. Lorsque la concentration augmente, les sels plus solubles se déposent à leur tour sous forme de cristaux plus ou moins fins, dépôts lagunaires typiques.

## PARTIE II: L'EAU

### CHAPITRE V : L'EAU ET LE SOL

Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol, une part est évaporée directement pendant et après la pluie ; les gouttes peuvent être interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltre et réhumecte le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration. Une fraction réduite finalement gagne la profondeur et atteint la nappe. Un profil habituel de la quantité d'eau contenu dans une coupe du sol et du sous-sol habituel de la quantité d'eau contenu dans une coupe du sol et du sous-sol montre une augmentation de la teneur en eau avec la profondeur.

#### 5.1. LE ROLE DE L'EAU DU SOL

Le sol est un système physique généralement non saturé d'eau. Dans les sols normalement drainés, l'eau joue un rôle essentiel en tant que liant des constituants et assure la pérennité de structures acquises au cours du temps, qu'elles soient d'origine biologique (êtres vivants et racines) ou qu'elles résultent de processus physiques (fissures). Du fait d'une forte dessiccation ou en présence d'un excès d'eau, les conditions peuvent être réunies pour que l'eau n'assure plus son rôle **d'agent de cohésion**. Il peut en résulter une instabilité physique aussi bien en surface (susceptibilité à l'érosion), qu'en profondeur (tendance à l'effondrement des macropores). L'histoire énergétique détermine une partie de l'organisation des sols et a des conséquences sur leur comportement actuel. La mise en valeur de certains sols et/ou les pratiques liées à l'agriculture intensive, en particulier par l'épuisement de la réserve en eau ou l'excès d'irrigation, tendent à produire des déséquilibres préjudiciables à la stabilité physique et aux conditions de l'activité biologique. Les conséquences en sont souvent mal évaluées mais risquent d'affecter les propriétés des sols à long terme.

#### 5.2. RELATIONS ENTRE LES TROIS PHASES DU SOL

Dans un sol naturel, les différents éléments (air, eau, grains) sont disposés en ordre dispersé et suivant un arrangement lié à la fois aux conditions et à l'histoire ultérieure subie. On peut schématiser les 3 phases dans un diagramme simplifié (fig. 16) dans lequel on distinguera :

- les volumes occupés par chaque constituant respectivement  $V_s$  pour les grains,  $V_w$  pour l'eau,  $V_a$  pour l'air avec

$V = V_s + V_w + V_a$  le volume total et  $V_v = V_w + V_a$  le volume des vides ;

- les masses des grains  $m_s$ , de l'eau  $m_w$  (la masse de l'air est nulle : pesée dans l'air) ;
- les poids des grains  $p_s$  et de l'eau  $p_w$ .

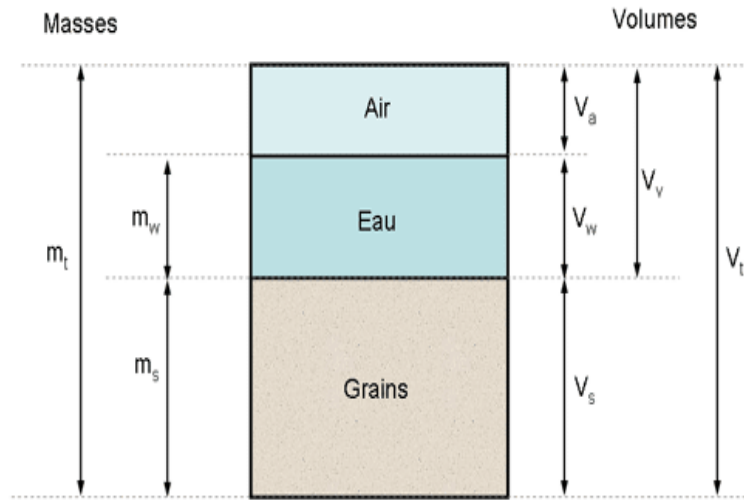


Fig. 16. Diagramme des phases d'un sol

### 5.3. MESURE DES VOLUMES OCCUPES PAR LES DIFFERENTES PHASES DU SOL

A partir de ces éléments, on peut définir les propriétés géométriques des sols qui figurent dans le tableau 7

.Tableau 7. Définition des paramètres géométriques des sols

	Symbole	Unités	Expression
Teneur en eau	w	%	$\frac{m_w}{m_s} = \frac{\rho_w}{\rho_s}$
Indice des vides	e	/	$\frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s}$
Porosité	n	/	$\frac{V_v}{V_t} = \frac{V_a + V_w}{V_t}$
Volume spécifique	v	/	$\frac{V_s + V_v}{V_t}$
Degré de saturation	$S_r$	%	$\frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_w + V_a}$
Teneur en air	$A_a$	%	$\frac{V_a}{V_t}$
Masse volumique des grains	$\rho_s$	Mg/m <sup>3</sup>	$\frac{m_s}{V_s}$
Poids volumique des grains	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	$\frac{p_s}{V_s}$
Densité relative des grains	G	/	$\frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$

Masse volumique de l'eau	$\rho_w$	Mg/m <sup>3</sup>	$\frac{m_w}{V_w}$
Poids volumique de l'eau	$\gamma_w$	kN/m <sup>3</sup>	$\frac{\rho_w}{V_w}$
Masse volumique humide du sol	$\rho$	Mg/m <sup>3</sup>	$\frac{m_s + m_w}{V_a + V_w + V_s}$
Poids volumique humide du sol	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	$\frac{\rho_w + \rho_s}{V_a + V_w + V_s}$
Masse volumique du sol saturé	$\rho_{sat}$	Mg/m <sup>3</sup>	$\frac{m_s + m_w}{V_s + V_w}$
Poids volumique saturé du sol	$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	$\frac{\rho_w + \rho_s}{V_w + V_s}$
Masse volumique sèche	$\rho_d$	Mg/m <sup>3</sup>	$\frac{m_s}{V_t}$
Poids volumique sec	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	$\frac{\rho_s}{V_t}$
Masse volumique déjaugée	$\rho'$	Mg/m <sup>3</sup>	$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$
Poids volumique déjaugé	$\gamma'$	kN/m <sup>3</sup>	$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

Les valeurs de ces grandeurs géométriques peuvent varier dans des intervalles assez larges. Le tableau 8 donne par exemple les valeurs de poids volumiques  $\gamma$  de quelques sols. Pour les sols rencontrés couramment en France on pourra, en première approximation, considérer que au-dessus de la nappe  $\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$  et au-dessous de la nappe  $\gamma_{sat} = 20 \text{ KN/m}^3$ . Les teneurs en eau naturelle varient aussi dans un large domaine comme l'indique le tableau 8.

Tableau 8. Quelques valeurs des poids volumiques de sols et celles de teneur en eau

Type de sol	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Type de sol	w (%)
Sables et graviers lâches	17 - 19	Sables et graviers lâches	15 - 25
Sables et graviers compacts	20 - 22	Sables et graviers compacts	5 - 10
Argiles molles	16 - 18	Silts	20 - 30
Argiles raides	19 - 22	Argiles N.C. faible plasticité	20 - 40
Tourbes	11 - 14	Argiles N.C. forte plasticité	40 - 90
Argiles vasardes	13 - 15	Argiles O.C. faible plasticité	10 - 20
Roches tendres	20 - 23	Argiles O.C. forte plasticité	20 - 40
Roches dures	24 - 27	Sols organiques	50 - 150
		Tourbes	100 - 1000

Dans un dépôt homogène, ces teneurs en eau diminuent avec la profondeur d'enfouissement, juste après le dépôt au fond de la mer on obtient souvent des valeurs  $w_{nat} \approx 1,75$  à  $2 w_L$ . Dès le début de l'enfouissement, elles diminuent très rapidement ; la figure 17a montre la variation de teneur en eau dans le cas d'un dépôt artificiel de kaolinite, et dans le cas d'un stérile de minerai sur la figure 17b.

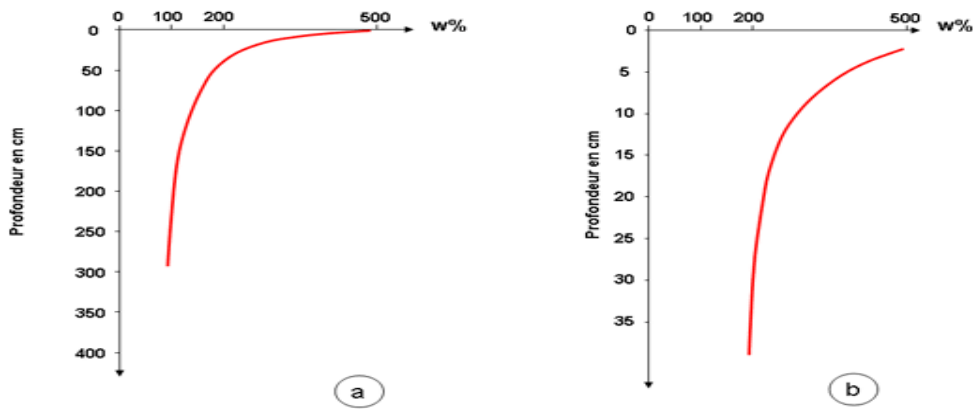


Fig. 17. Profil de teneur en eau avec la profondeur (sédimentation sous poids propre)  
a – kaolin  
b – stérile de laverie

La porosité d'un sol est toujours inférieure à 1, l'indice des vides peut, par contre, être très largement supérieur à 1. L'arrangement des grains joue un rôle fondamental sur les valeurs de porosité ou d'indice des vides. A titre d'exemple, la figure 18 montre deux arrangements théoriques pour des grains équi-granulaires, respectivement cubique ou rhombique qui conduisent aux valeurs du tableau 9.

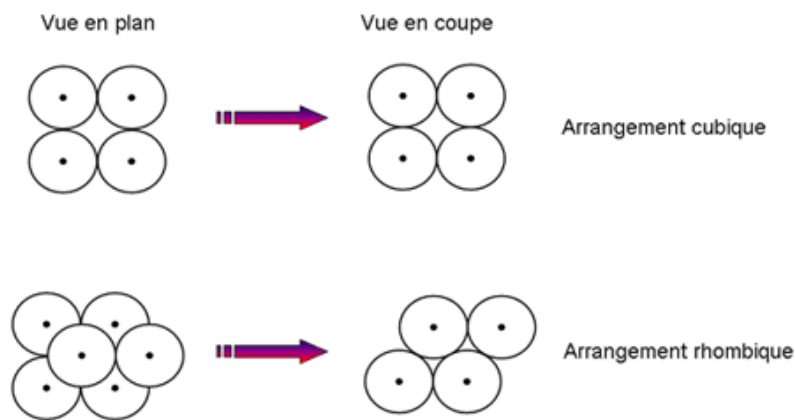


Fig. 18. Arrangements possibles pour des grains équi-granulaires

Tableau 9. Arrangement théorique de grains équi-granulaires

Arrangement	Nombre de points de contact d'un grain	Porosité	Indices des vides
Cubique	6	0,476	0,91
Rhombique	12	0,26	0,35

Les grandeurs géométriques sont reliées entre elles par des relations dont on fournit quelques exemples dans le tableau 10.

Tableau 10. Relations entre les grandeurs géométriques

$e = \frac{n}{1-n}$
$n = \frac{e}{1+e}$
$v = 1 + e$
$A_a = n (1 - sr)$
$e.Sr = w.G.$
$\gamma = \frac{\gamma_s + e Sr \gamma_w}{1+e}$
$\gamma = \gamma_d (1 + w)$
$\gamma_s = \gamma_d (1 + e)$

#### 5.4. LES FORMES DE L'EAU DANS LE SOL SONT LES MEMES LES ETATS DE L'EAU DANS LE SOL

##### **Eau de gravité**

C'est l'eau occupant momentanément ou de façon plus ou moins permanente (eau de saturation) les pores les plus grossiers du sol, ou la macroporosité. Cette eau est soumise à la pesanteur et n'est donc pas retenue par le sol après ressuyage. C'est cette eau de gravité qui assure l'entraînement des substances dissoutes ou en suspension. Elle contribue donc à la différenciation des profils. On fait d'habitude la différenciation entre l'eau de gravité à écoulement rapide et celle à écoulement lent.

##### **Eau capillaire**

On distingue l'eau capillaire absorbable qui correspond à l'eau contenue dans la microporosité de 0,2 à 8  $\mu\text{m}$  (pores de réserve), et l'eau capillaire non absorbable ou eau liée, correspondant à la porosité très fine < 0,2  $\mu\text{m}$  (pores résiduels). L'eau capillaire absorbable est donc l'eau retenue par le sol après *ressuyage* : elle est utilisable par les végétaux. C'est en outre la phase liquide qui compose la " solution du sol ", c'est à dire le réservoir des substances dissoutes et le milieu d'altération des minéraux.

##### **Eau hygroscopique**

C'est l'eau adsorbée par le sol aux dépens de l'humidité atmosphérique. Il s'agit donc d'une mince pellicule d'eau entourant les particules minérales et organiques. Très énergiquement retenue, elle n'est susceptible d'aucun mouvement et n'est pas absorbable par les végétaux.

Les sols retiennent leur eau avec une énergie variable qui est fonction de leur texture ou de leur contenu en matière organique. Il est donc possible de mesurer les forces de rétention de l'eau du sol.

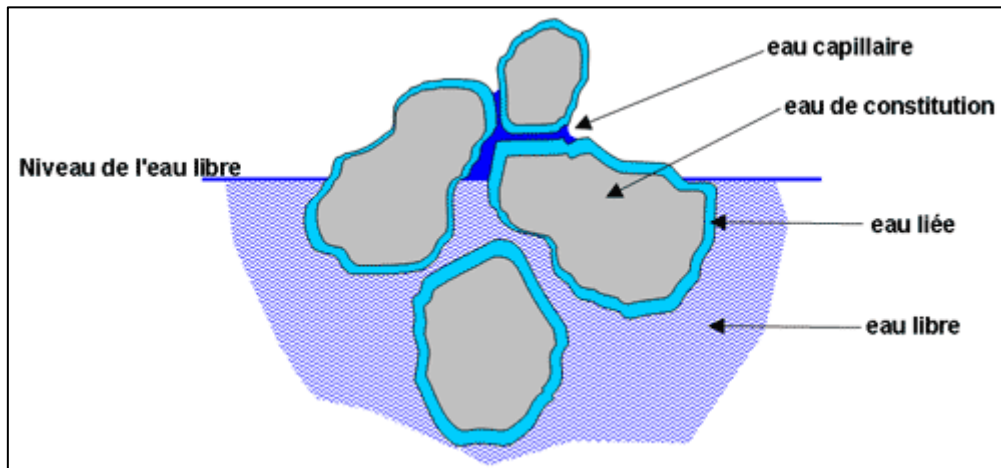


Fig. 19. Les formes de l'eau dans le sol.

### 5.5. LES FORCES DE RETENTION DE L'EAU PAR LE SOL

Dans le sol, l'eau peut prendre diverses directions du fait des forces en présence (Fig. 20) :

- **La Gravité** : écoulement de l'eau en profondeur.
- **La Tension Superficielle** : attraction de l'eau par les particules de sol. La tension superficielle est d'autant plus forte que les particules sont fines et compactées.
- **La Pression Osmotique** due à la présence de sels dans le sol : son effet est considéré comme négligeable en l'absence de vapeur.
- **La succion des racines** : attraction vers les racines.

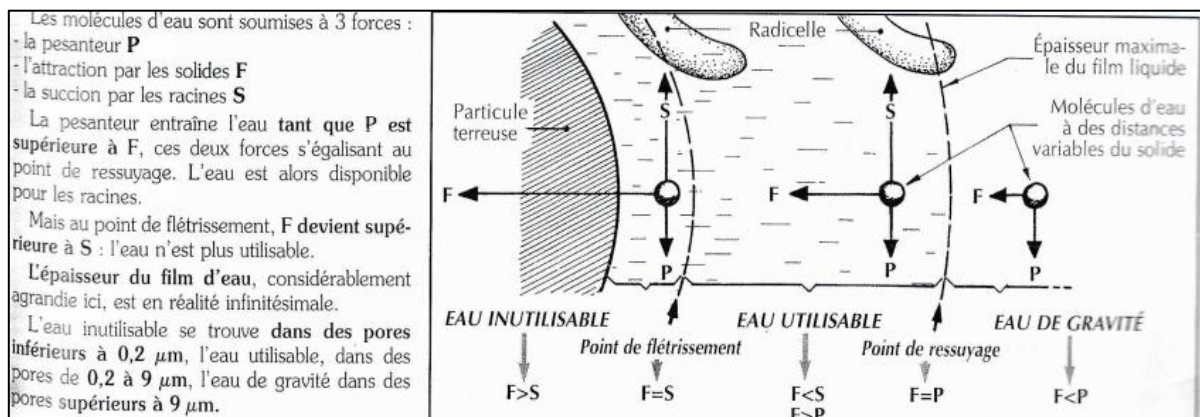


Fig. 20. Les trois forces s'exercent sur l'eau du sol

Ces forces ont pour effet de limiter la mobilité de l'eau. L'énergie potentielle de l'eau liée au sol est ainsi réduite par rapport à celle de l'eau libre. La différence d'énergie potentielle de l'eau entre deux points explique la possibilité de déplacement de l'eau dans le sol : les mouvements d'eau dans le sol permettent de rétablir l'équilibre d'énergie potentielle de l'eau entre ces deux points.

L'énergie avec laquelle le sol retient l'eau est exprimée au travers d'une tension (pression négative). Celle-ci est mesurée en bar à l'aide d'un tensiomètre ou d'une sonde tensio-électrique. La tension

exercée par le sol sur l'eau limite la disponibilité de l'eau pour la plante. Les racines doivent alors appliquer une force de succion plus élevée pour absorber l'eau nécessaire à leurs besoins vitaux.

## 5.6. LE POTENTIEL DE L'EAU DANS LE SOL

C'est la différence d'énergie libre entre l'eau du sol et une eau de référence (eau libre et pure à la pression atmosphérique). Le potentiel traduit l'état de liaison de l'eau du sol ou la quantité d'énergie qu'il faudrait fournir pour l'extraire du sol.

Selon Mermoud (2006), le potentiel total comprend plusieurs composantes, chacune liée à une force agissant sur l'eau qui modifie son énergie par rapport à celle de l'eau libre et pure. Ces champs de force sont dus principalement :

- *à la gravité* : potentiel gravitationnel **Pot<sub>g</sub>**
- *à la pression de l'eau en milieux saturés* : potentiel de submersion **Pot<sub>s</sub>**
- *à l'attraction de l'eau par la matrice solide en milieux non saturés* : potentiel matriciel **Pot<sub>m</sub>**
- *à la présence de sels* : potentiel osmotique **Pot<sub>o</sub>**

**Potentiel total  $P_t = Pot_g + Pot_s$  ou  $Pot_m + Pot_o + \dots$**

## 5.7. LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE SOL

Ils sont de trois types ; mouvements descendants (action de la pesanteur sur l'eau de gravité), mouvements ascendants (capillarité) et mouvements latéraux (circulation oblique de l'eau gravitaire) (Figure 17).

### *Mouvements descendants et latéraux*

Ils correspondent aux processus d'infiltration des eaux dans les sols et les formations superficielles. Cette infiltration est liée à la perméabilité du substratum et est exprimée par la vitesse d'infiltration de l'eau gravitaire. La perméabilité d'un sol est d'autant plus élevée que la porosité non capillaire (macroporosité) est importante. D'où l'influence prépondérante à cet égard de la texture du sol mais aussi sa structure et de sa stabilité.

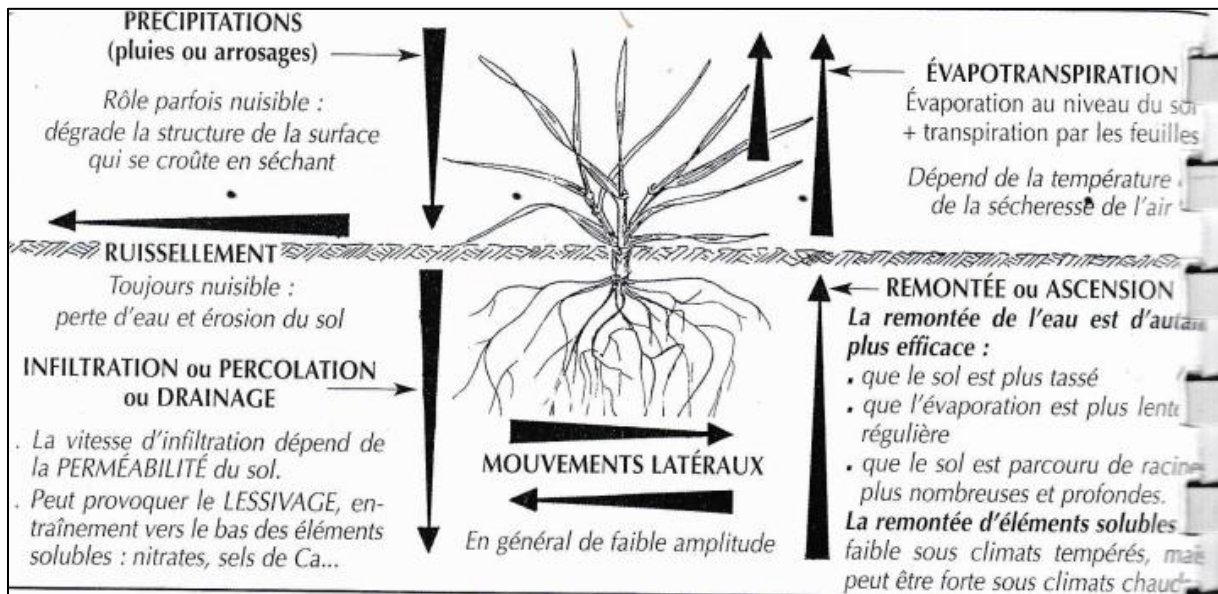
Si la perméabilité du sol est élevée, son ressuyage est rapide. A l'opposé, si cette perméabilité est faible, particulièrement dans les horizons profonds, le drainage du profil devient déficient et il se forme une nappe dite *perchée*, par engorgement plus ou moins prolongé des horizons de surface. Cet excès d'eau, même temporaire, est à l'origine de processus *d'hydromorphie* qui influencent fortement la pédogenèse (milieu réducteur, anaérobie, accumulation de matière organique mal décomposée, dynamique particulière de fer, etc.).

La circulation latérale des nappes est liée à une topographie de versant. Les pédologues utilisent parfois le terme de « lessivage oblique » pour désigner les mouvements latéraux des nappes. Cette circulation latérale des eaux d'infiltration joue un rôle important dans la formation de certains sols à horizons profonds indurés (cuirasses ferrugineuses tropicales, sols isohumiques à croûtes calcaires, etc.).

### **Mouvements verticaux ascendants**

Ils s'effectuent par remontées capillaires lorsque l'évaporation est suffisante pour déclencher le mouvement ascendant de la solution du sol. Ce mouvement peut être entretenu par la présence d'une nappe phréatique peu profonde.

La décroissance de la teneur en eau dans les horizons de surface a pour effet d'augmenter le pF, d'où un appel par succion de l'eau des zones sous-jacentes à pF plus bas.



**Fig. 21. Les mouvements de l'eau dans le sol**

## **5.8 BILAN DE L'EAU DANS LE SOL**

*Le départ de l'eau du sol, par évapotranspiration représente la DEMANDE*

Lorsqu'une culture élabore **1kg** de **MS**, ce sont quelque **600 litres** d'eau qui sont puisés dans le sol. Les 12 tonnes/ha de maïs par exemple exigent 7200 m<sup>3</sup> d'eau.

**a) Pourquoi de telle quantité ?**

- L'eau de **CONSTITUTION**, celle qui entre dans la composition des tissus végétaux (75 à 90% de leur poids).

- L'eau de **VEGETATION** au contraire, celle qui, puisée par les racines, traverse la plante avant d'être rejetée dans l'atmosphère par les feuilles, représente en moyenne 500 litres/kg de MS.

- L'eau **EVAPOREE** par le sol vient s'ajouter à celle que prélèvent les plantes.

L'ensemble de l'eau transpirée par la plante, et de l'eau évaporée par le sol, qui constitue l'**EVAPOTRANSPIRATION (ET)**.

**b) l'évapotranspiration potentielle (ETp) est une valeur climatique**

l'ETp est théoriquement la quantité d'eau que cède à l'atmosphère par évapotranspiration.

**En réalité, l'ETp est une mesure climatique** effectuée à partir de relevés météorologiques, selon des formules dont les plus employées sont la formule de TURC, adaptée à la grande région, et celle de BOUCHET convenant mieux à la petite région.

**DEUX FORMULES DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE**

**La formule de TURC : ETp mensuelle (en mm) =  $0.40 \left( \frac{t}{t + 15} \right) * (lg + 50)$**

t = température moyenne mensuelle (ou décadaire)

lg = valeur moyenne mensuelle (ou décadaire) de la radiation globale en cal/cm<sup>2</sup>/j.

= lg<sub>A</sub> = (0.18 + 0.62 h/H), formule dans laquelle :

h = durée d'insolation mensuelle (ou décadaire) : fournie par la station météorologique de la région.

lg<sub>A</sub> et H = valeur donnée par les tableaux ci-dessous :

**Tableur 11. Valeur de lg<sub>A</sub> radiation maximale** qui atteindrait le sol en absence de l'atmosphère

° de latitude nord	42°	43°	44°	45°	46°	47°	48°	49°	50°	51°
Avril	819	812	805	798	791	785	778	771	764	757
Mai	939	937	934	932	929	927	925	922	920	918
Juin	985	985	984	984	984	984	983	983	983	983
Juillet	954	952	950	948	946	944	942	940	938	936
Aout	846	840	835	829	823	917	812	806	800	794
Septembre	689	879	669	658	648	638	627	617	607	597

Tableur 12. **Valeur de H ou durée mensuelle du jour en heures**

° de latitude nord	42°	43°	44°	45°	46°	47°	48°	49°	50°	51°
Avril	401	403	404	405	407	409	410	412	413	415
Mai	452	455	457	461	465	468	472	475	479	483
Juin	454	458	462	467	471	476	480	485	490	495
Juillet	451	465	468	472	475	479	483	488	492	497
Aout	429	432	435	437	439	442	444	447	449	452
Septembre	376	376	377	377	377	377	377	378	378	378

**La formule de BOUCHET :  $ETp = \alpha * \lambda * P$**

**P en mm** = évaporation mesurée sous abris avec un évaporimètre de PICHE pendant la période de considérée (jour, mois ou décade)

$\alpha = 0.37$

$\lambda$  = valeur donnée par le tableau ci-dessous :

Tableur 13. **Valeur de  $\lambda$**  en fonction de la température moyenne de la période considérée (jour, mois ou décade)

<b>Température Moyenne <math>\lambda</math></b>	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
	1.81	1.87	1.92	1.98	2.04	2.11	2.17	2.25	2.32	2.40	2.49	2.57	2.66	2.76	2.86
<b>Température Moyenne <math>\lambda</math></b>	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°	24°	25°	26°	27°	28°	29°
	2.97	3.08	3.20	3.32	3.45	3.59	3.73	3.88	4.03	4.20	4.36	4.54	4.72	4.92	5.11

**c) L'évapotranspiration dans les champs : évapotranspiration MAXIMALE (ETm) et évapotranspiration REDUITE (ETr).**

si l'ETp calculée est la mesure utilisée pour connaître la perte d'eau théorique par l'ensemble sol-culture (ETp sert à calculer le bilan de l'eau), ce n'est pourtant qu'une valeur moyenne. Que se passe-t-il au niveau de chaque champ ?

- **si le sol est largement pourvu en eau**, l'évapotranspiration dépend non seulement des conditions météorologiques mais aussi de la COUVERTURE végétale.

**On affecte celle-ci d'un coefficient Kc** (c pour culture) qui réduit ou augmente la valeur de l'ETp et l'on appelle évapotranspiration maximale (ETm) ou REALLE MAXIMALE la quantité d'eau évaporée par l'ensemble sol-culture selon le stade végétatif :  $ETm = ETp * Kc$ .

**Ce coefficient est inférieur à 1** dans les premiers stades de la culture, mais il peut devenir supérieur lorsque celle-ci atteint son plein développement.

- **si maintenant l'évapotranspiration d'eau par le sol vient à baisser**, soit que le sol s'assèche soit qu'il se constitue en surface une couche sèche freinant la perte d'eau, l'évapotranspiration réelle diminue. Elle devient l'évapotranspiration REDUITE (ETr).

**Mais cette réduction de l'évapotranspiration peut aussi venir de la plante** si l'air devient très chaud et sec, autrement dit si l'ETp devient trop forte : les plantes limitent alors d'elles-mêmes leur transpiration, donc la circulation d'eau qui les traverse.

**Il leur suffit pour cela de fermer plus ou moins leurs stomates.** Ce mécanisme les protège contre une perte d'eau supérieure au débit que pourrait leur fournir le sol. Elles évitent ainsi de se flétrir.

Cette protection a cependant une importante conséquence : en se fermant, les stomates limitent du même coup les échanges gazeux, donc la fonction chlorophyllienne. La plante ne travaille plus.

**L'ETr est donc toujours inférieure ou égale à l'ETm.**

**Il faut aussi remarquer** que la réduction du rendement par manque d'eau varie selon la **période végétative** : chaque plante possède une « **période critique** » au cours de laquelle il est capable qu'elle ne manque pas d'eau.

Tableau 14. Coefficients culturaux Kc à appliquer à l'ETp pour diverses cultures en fonction de leurs stades

	<b>Kc</b>	<b>Jusqu'à</b>	<b>Kc</b>	<b>Jusqu'à</b>	<b>Kc</b>	<b>Jusqu'à</b>	<b>Kc</b>	<b>Jusqu'à</b>
<b>Maïs</b>	0.3 à 0.6	6/8 feuilles	0.8	9/10 feuilles	1.15	Grains laiteux	0.9	Grains pâteux
<b>Pois</b>	0.5	5/6 feuilles	0.5 à 1	Début floraison	1.2	Fin floraison	1	10j. après fin floraison
<b>Blé</b>	0.5	Début tallage	1	2 nœuds	1.2	Epiaison	1	25j. après épiaison
<b>Haricot</b>	0.5	Bouton floral	0.8	1ere gousse	1	Fin floraison	0.6	10j. après fin floraison
<b>Tournesol</b>	0.5	Bouton 3 cm	1.2	Début floraison	1	Fin floraison	0.9	40j. après début floraison
<b>Pomme de terre</b>	0.5	Tubérisation	1	Floraison	1	Défanage	0.5	Maturité

## 5.9. BESOIN EN EAU DES VEGETAUX

**L'eau disponible pour la plante, pluie et réserve utile du sol, représente L'OFFRE**

Les plantes disposent de deux apports d'eau pour faire face à leurs besoins, représentés par l'ETp :

- **La fraction des pluies** se produisant pendant leur période de végétation (1<sup>er</sup> avril à 1<sup>er</sup> octobre en moyenne) absorbée et retenue par la couche de sol accessible aux racines ;

- **La fraction de l'humidité accumulée** par le sol en hiver. Cette dernière fraction est la **RESERVE UTILE (RU)**.

C'est la quantité d'eau contenue dans la tranche de sol explorée par les racines, entre le point de ressuyage (**He**, pour humidité équivalente) et le point de flétrissement (**Hf**).

Mais les plantes ayant d'autant plus mal à extraire l'eau que l'humidité s'approche du point de flétrissement, on nomme **RESERVE FACILEMENT UTILISABLE (RFU)** la quantité d'eau égale à 1/2 ou 2/3 de la RU soit 1/4 à 1/3 de l'humidité équivalente.

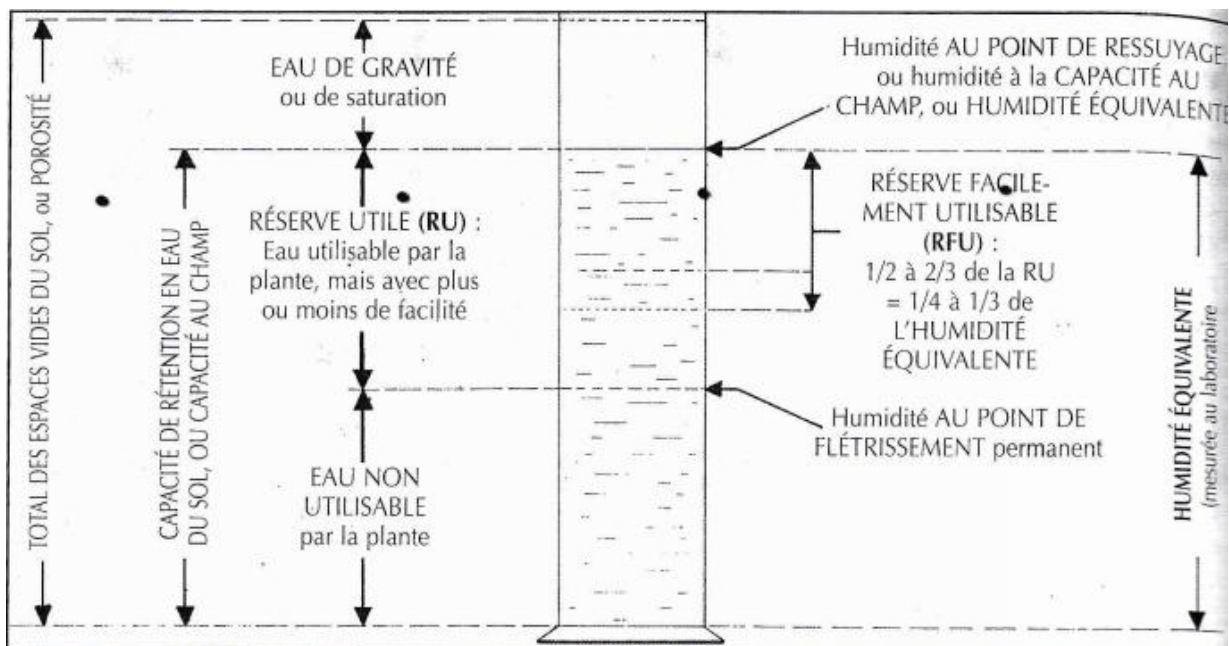


Fig. 22. La réserve utilisable (RU) et la réserve facilement utilisable (RFU)

La RU et la RFU sont plus élevés :

- que le sol a une texture plus fine et une bonne teneur en humus.
- que le sol est plus profond et que les cultures ont un enracinement plongeant ;
- que les pluies hivernales ont été plus abondantes et bien retenues.

Tableau 15. Valeur de la RFU de quelques sols, en fonction de leur texture et de la profondeur d'enracinement des cultures (en mm)

Cultures	Profondeur moyenne d'enracinement	RFU en mm pour différents sols			
		Sableux	Sablo-limoneux	Argilo-limoneux	Argileux mal structurés
Maraîchères betteraves	30 cm	35	80	70	50
Céréales	40 cm	50	130	130	35
Luzernes	50-60cm	70	170	170	130
Vergers	120 cm	100	200	170	130

RFU en mm d'eau :  $3 \cdot Da \cdot He \cdot P$

**Da**=densité apparente du sol

**He** = humidité équivalente en % de la terre sèche

**P** = profondeur de la couche de terre parcourue par les racines, en mètres.

### 3- l'expression et le calcul du DIFICIT EN EAU

a) Quelques termes : déficit pluviométrique – déficit agricole – dose d'arrosage – fréquence d'arrosage.

**LE DEFICIT PLUVIOMETRIQUE** est obtenu, pour un mois, une décade, ou plusieurs mois, par soustraction de l'ETp mois la pluviométrie :

$$Dp = ETp - P$$

Ce déficit peut être calculé, pour les sols encore peu couverts de végétation et secs en surface, comme c'est le cas pour un maïs entre la levée et le stade de 40-50 cm, à partir de l'ETr :

$$Dp = ETr - P$$

Mais une partie de l'eau du sol, de la RFU, peut être utilisée pour combler ce déficit, sans qu'il soit besoin d'irriguer, d'où le calcul d'un autre déficit :

**Le DIFICIT AGRICOLE** d'un mois ou d'une décade peut donc s'exprimer ainsi :

$$Da = (ETp \text{ ou } ETr - P) - k(RFU)$$

**Le coefficient k**, que l'on choisit entre 0 et 1, indique la fraction de la RU absorbée que l'on ne désire pas reconstituer. Si l'eau d'irrigation est abondante, on prend  $k = 0$ . On exprime ainsi que l'on désire, par irrigation, reconstituer complètement la RFU.

L'irrigation se propose de combler le déficit agricole.

**Mais avec quelle fréquence et quelles doses ?**

**La DOSE D'ARROSAGE** doit combler le déficit en eau évitant toute perte par percolation. Elle devra donc ramener l'humidité de la couche asséchée par les racines, au maximum à une humidité voisine de la capacité au champ. Comme on n'attend pas, pour irriguer, que toute la réserve utilisable soit consommée, autrement dit que les plantes aient atteint le Pf, on peut dire que la **dose d'arrosage doit correspondre à la RFU, et au maximum à la RU.**

**La FREQUENCE DE DOSAGE** dépend de l'importance du déficit et de celle de la dose d'arrosage : pour un même déficit en eau, mensuel par exemple, les arrosages seront d'autant moins fréquents que la capacité de rétention du sol et la profondeur d'enracinement, par conséquent la RFU, seront élevées :

**Exemple** : pour un mois de juillet,  $ET_p = 123$  mm,  $P = 23$  mm. On désire arroser deux sols, la RFU est, pour l'un 50 mm, pour l'autre 25 mm. On prend  $k = 0$ , ce qui signifie que l'on désire qu'à la suite des arrosages de juillet, la RFU du sol soit à nouveau remplie.

(Si par contre la récolte devait être enlevée fin juillet, le sol devant rester sans culture par la suite, il y aurait intérêt à épuiser cette RFU fin juillet. On prendrait alors  $k = 1$  ou 0.5)

### Quelles seront les doses d'arrosage et leur fréquence ?

**Déficit pluviométrique** =  $123 - 23 = 100$  mm = déficit agricole puisque  $k = 0$ .

**Dose d'arrosage** = RFU = 50 mm pour le 1<sup>er</sup> sol, et 25 mm pour le second.

### Fréquence d'arrosage :

$100$  mm/50 mm = 2 arrosages pour le 1<sup>er</sup> sol, donc tous les 15 jours.

$100$  mm/25 mm = 4 arrosages pour le 2<sup>e</sup> sol, donc toutes les semaines.

### b) les prévisions des irrigations

Cette prévision répond à deux nécessités :

- **l'une à long terme** : bien calculer un réseau d'irrigation pour les années à venir, en fonction des quantités qu'il aura à fournir en période de pointe ;
- **l'autre à court terme** : bien utiliser ce réseau, chaque année, en fonction des besoins réels des cultures.

Tableau 16. Fiche de calcul du bilan d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles.

Parcelle : Culture : <i>Maïs</i> RFU : <i>40mm</i>		Pluie (mm) (1)	ETp (mm) (2)	Déficit ou excédent calculé (1) - (2)		Déficit réel (3)	Irrigation (mm) (4)	BILAN (3) - (4)	Observation
<b>Avril</b>	1° Décade	+ 15	- 23	- 8		-8	-	-8	Déficit pluviométrique ramené théoriquement à 30mm par mois (10mm/décade) Pour les plantes sarclées encore peu couvrantes : ETr très réduite par rapport à ETp
	2° Décade	+ 35	- 23	+ 12		0	-	0	
	3° Décade	+ 24	- 23	+ 12		0	-	0	
<b>Mai</b>	1° Décade	+ 3	- 29	(- 26)	-10	-10	-	-10	
	2° Décade	+ 12	- 29	(- 17)	-10	-20	-	-20	
	3° Décade	+ 10	- 29	(-19)	-10	-30	-	-30	
<b>Juin</b>	1° Décade	0	- 24	(-24)	-10	-40	30	-10	
	2° Décade	+ 15	- 24	-9		-19	-	-19	
	3° Décade	+ 35	- 24	+9		-10	-	-10	
<b>Juillet</b>	1° Décade	0	- 37	-37		-47	40	-7	
	2° Décade	0	- 37	-37		-44	40	-4	
	3° Décade	+ 12	- 37	-25		-29	-	-29	
<b>Aout</b>	1° Décade	+ 25	- 31	-6		-35	-	-35	
	2° Décade	+ 20	- 31	-11		-46	-	-46	
	3° Décade	+ 22	- 31	-9		-55	-	-55	
<b>Septembre</b>	1° Décade	+ 13	- 25	-12		-67	-	-67	
	2° Décade	+ 24	- 25	-1		-68	-	-68	
	3° Décade	+ 38	- 25	+13		-55	-	-55	

**REFERENCES** (*Livres et photocopiés, sites internet, etc*) :

Baize, D., & Girard, M. C. (2009). *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae.

Blondel J., 1979- Biogéographie et écologie. Ed. Masson.

Duchaufour P., 1994- Pédologie, sol, végétation, environnement. Ed. Masson.

Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., Houot, S., & Gury, M. (2018). *Introduction à la science du sol-7e éd.: Sol, végétation, environnement*. Dunod.

Kazi-Tani, N., & Rullière, D. (2019). On a construction of multivariate distributions given some multidimensional marginals. *Advances in Applied Probability*, 51(2), 487-513.

Létourneau, M. (2012). Effet du gel et du dégel sur les propriétés mécaniques et physiques des sols argileux.

Lim H., 1982- Agronomie moderne. Base physiologique et agronomique de la production végétale. Ed. Masson.

Sigg, L., Behra, P., & Stumm, W. (2001). *Chimie des milieux aquatiques*. Dunod.

Soltner D. (2014). Les bases de la production végétale. Tome 1, le sol et son amélioration. Collection sciences et techniques agricoles. 26<sup>e</sup> édition.

**Sites web :**

[http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences\\_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/mouvements.html](http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/mouvements.html)

<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/classification-des-sols/fr/#:~:text=Les%20plus%20anciens%20syst%C3%A8mes%20de,origine%20et%20le%20temps%20de>

<http://www.vinsvignesvignerons.com/Geologie/Etude-des-sols-Pedologie/Horizons-Denomination-des-sols>

<https://fr.slideshare.net/HalimaBV/lorganisation-morphologique-du-sol>

<https://www.youtube.com/watch?v=JDbHU6j9hWo>

<https://www.youtube.com/watch?v=R24gsQOKops>

<https://www.youtube.com/watch?v=ruESdcShW5U>

L'azote : <https://www.youtube.com/watch?v=MZqLCYW0Apc>

Le carbone : <https://www.youtube.com/watch?v=w7Ht5NgbhT0>

Le soufre :

<https://www.youtube.com/watch?v=XNmjBS2V1os>