

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة جيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama de khemis Miliana

كلية علوم الطبيعة و الحياة و علوم الأرض

Faculté des Sciences de la Nature et de la vie et science de la Terre



Polycopié de Cours

Agronomie I

Département : Sciences agronomiques

Cycle : L2 Sciences agronomiques

Présenté par :

Dr. TIRCH Nadia

Année Universitaire

2021-2022

Table des matières



Introduction	1
Partie I : Le Sol	
Chapitre I : Les composants du sol	2
I.1. Définitions du sol	2
I.2. Genèse du sol	2
I.3. Les éléments constitutifs du sol	4
I.3.1. Les constituants minéraux	5
I.3.1.1. Origine et types de constituants	5
I.3.1.2. Processus de l'altération de la roche mère	5
I.3.1.3. Analyse granulométrique et texture des sols	6
I.3.1.3.1. Classement des particules	6
I.3.1.3.2. Définition de la texture	7
I.3.1.3.3. Classification des textures	7
I.3.1.4. Propriétés des différents constituants minéraux	11
I.3.2. Les constituants organiques	13
I.3.2.1. Rôles de la matière organique dans le sol	13
I.3.2.2. Quels sont les constituants organiques du sol ?	14
I.3.2.3. Transformation de la matière organique dans le sol	15
I.3.2.3.1. La minéralisation	16
I.3.2.3.2. L'humification	18
I.3.3. Les complexes colloïdaux	23
Chapitre II. L'organisation morphologique des sols	25
II.1. Les organisations élémentaires	25
II.1.1. Formation des agrégats	26
II.1.2. La structure	29
II.1.2.1 Définition de la structure	29
II.1.2.2. Les composants de la structure du sol	29
II.1.2.3. Types de la structure	29

II.1.1.4. La netteté de la structure.....	31
II.1.1.5. Notion de stabilité structurale.....	31
II.1.1.6. Entretien de la structure.....	33
II.1.2. La porosité.....	35
II.1.2.1. Définition et types.....	35
II.1.2.2. Détermination de la porosité.....	38
II.2. L'horizon pédologique.....	39
II.3. Le profil pédologique.....	41
II.4. La couverture pédologique.....	42
II.5. Le sol et l'eau.....	43
II.6. L'atmosphère du sol.....	43
II.7. La température du sol.....	45
II.8. La couleur du sol	46
Chapitre III. Les propriétés chimiques du sol.....	47
III.1. Les phénomènes d'échanges des ions.....	48
III.1.1. Définition du complexe d'échange (complexe adsorbant des sols).....	48
III.1.2. Définition de la solution du sol.....	48
III.1.3. Echange entre le complexe adsorbant et la solution du sol.....	49
III.1.3.1. Echange des cations.....	49
III.1.3.2. Echange des anions.....	54
III.1.4. Importance du complexe adsorbant du sol.....	55
III.2. L'acidité du sol et le pH du sol.....	56
III.2.1. Définition.....	56
III.2.2. Les sources de production d'ions H ⁺	56
III.2.3. Les différentes expressions de l'acidité.....	56
III.2.4. Le pouvoir tampon des sols et les variations de leurs pH.....	57
III.2.4. Caractérisation du pH du sol.....	58
Chapitre IV. Les propriétés biologiques du sol.....	60
IV.1. Diversité des êtres vivants du sol.....	60
IV.2. La flore.....	60



IV.2.1. La microflore.....	61
IV.2.1.1 Les algues du sol.....	61
IV.2.1.2 Les champignons du sol.....	62
IV.2.1.3. Les bactéries du sol.....	66
IV.2.2. La biomasse végétale.....	68
IV.3. La faune du sol.....	68
IV.3.1. Diversité taxonomique de la pédofaune.....	68
IV.3.2. Diversité de taille de la pédofaune.....	69
IV.3.3. Abondance de la pédofaune.....	72
IV.3.4. Rôles essentiels de la pédofaune.....	72
IV.3.4.1. Rôles mécaniques.....	72
IV.3.4.2. Les effets chimiques directs et indirects.....	74
IV.4. Synthèse des fonctions des êtres vivants du sol.....	76
Chapitre V : Classification des sols (Notions).....	77
V.1. Le but de la classification.....	77
V.2. Critères de la classification des sols.....	77
V.3. Les différentes classifications (Russe, Américaine, Française)	78
V.3.1 La classification française.....	78
V.3.2. La classification américaine.....	81
V.3.3. La classification russe.....	82
V.4. Aperçu sur les sols d'Algérie et leurs relations avec le climat et la géomorphologie.....	84
V.4.1. Les sols des régions sahariennes.....	84
V.4.2. Les sols des régions semi-arides.....	84
V.4.3. Les sols des régions telliennes humides.....	85
V.4.4. Les sols « azonaux » (sols locaux).....	86

Partie II. L'eau

Chapitre VI : L'eau dans le sol.....	88
VI.1. Définition.....	88
VI.2. Caractéristiques de la molécule d'eau.....	88



VI.3. Rôle de l'eau du sol.....	89
VI.4. Sources de l'eau dans le sol.....	89
VI.5. Les états de l'eau dans le sol.	90
VI.6. Les forces de rétention de l'eau par le sol.	91
VI.7. Le potentiel de l'eau dans le sol.	92
VI.8. Valeurs caractéristiques: Notion d'eau utile.....	93
VI.9. Assèchement du sol.....	95
VI.10. Les mouvements de l'eau dans le sol.	95
VI.10.1. Mouvements descendants de l'eau de gravité.....	95
VI.10.2. Mouvements ascendants.....	97
VI.11. Bilan de l'eau dans le sol.	97
VI. 12. Déficit en eau	100
VI.12.1. Déficit pluviométrique (climatique).....	100
VI.12.2. Déficit agricole.....	100
VI.13. Besoin en eau des végétaux.....	101
VI.13.1. Mode de l'utilisation de la RU par les plantes.....	101
VI.13.2. Facteurs de l'alimentation en eau.....	102
Chapitre VII. Relations entre les trois phases du sol.....	103
VII.1. Les trois phases du sol.....	103
VII.2. Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol.....	103
VII.2.1. La porosité.....	104
VII.2.2. Stock d'eau.....	105
VII.2.3. La teneur en eau.....	106
VII.2.4. Indice (ou degré) de saturation.....	106
Références bibliographiques.....	108

Avant-propos

Ce polycopié de cours est destiné aux étudiants du cycle Tronc commun 2^{ème} année sciences agronomiques. Il peut également être un support pélagique pour les étudiants des autres spécialités de la filière des sciences agronomique (licence et master). Son objectif principal est d'être utilisé comme support de cours permettant à l'étudiant un bon apprentissage. En outre, il peut servir au large public s'intéressant à cette discipline.

Ce document intitulé « Cours d'Agronomie I : Sol et eau » a pour objectifs de permettre à l'étudiant d'avoir une conception totale du sol en tenant compte de sa partie vivante et de pouvoir reconnaître les différents constituants du sol, les relations qui existent entre eux., les relations qui existent entre eux et la plantes et leurs réactions sur les propriétés édaphiques.

Afin de faciliter la compréhension aux étudiants, de nombreux schémas, illustrations et tableaux complètent ce présent document.

Ce cours est scindé en deux parties ; la première est consacrée à l'étude du sol, elle est scindée en cinq chapitres et la seconde, qui traite l'eau, contient deux chapitres.

En parcourant ce document, je vous souhaite un bon apprentissage tout en restant à l'écoute de vos remarques et préoccupations qui pourront servir à l'amélioration de ce support de cours.

Introduction

Introduction

Un sol est un substrat caractérisé par une grande complexité, il contient des constituants solides (matière minérale et matière organique mais aussi des organismes vivants). Dans un bon sol, il y a pratiquement 50% de vide, dans lequel, vont circuler l'eau et l'air. C'est ce milieu complexe, organisé et structuré en petits agrégats, qui va être colonisé par les racines des plantes. Le sol se caractérise aussi par sa soumission aux agents environnementaux, sa variabilité temporelle et spatiale, sa couleur qui est le reflet de sa composition minéralogique et sa fertilité. Il abrite une grande part de biodiversité terrestre et joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes ; il est ainsi la source de services écosystémiques majeurs, parmi lesquelles assurer la production végétale, nourriture de l'homme et de l'animal.

Le sol assure plusieurs fonctions dont les plus importantes sont :

- Etre un milieu favorable au développement des plantes (capacité à nourrir les plantes).
- Etre l'habitat d'une grande diversité d'espèces animales souterraines champignons, bactéries...
- Etre un support pour les végétaux et pour les êtres vivants aériens.
- Etre capable, par le support physique qu'il constitue, par la circulation des fluides, par la présence d'organismes vivants, de transformer toute une série de produits qu'on lui apporte, notamment des produits dont on veut se débarrasser.
- Assurer la fonction de stockage c'est une sorte de « garde-manger » qui restitue l'eau ou les minéraux au fur et à mesure des besoins de la plante.

Ainsi, on peut parler de dégradation des sols à partir du moment où l'une de ces fonctions est altérée.

Sous ses différentes formes et états, l'eau est indispensable à l'émergence et au maintien de la vie et compose l'essentiel des êtres vivants. L'eau du sol a une importance considérable ; d'une part elle intervient dans la nutrition des plantes, à la fois directement et indirectement en tant que véhicules des éléments nutritifs ; d'autre part c'est un des principaux facteurs de la pédogenèse qui conditionne la plupart des processus de formation des sols.

Partie I : Le sol

Partie I : Le sol

Chapitre I : Les composants du sol

I.1. Définitions

D'un point de vue linguistique, le sol a des racines latines. Dérivé du latin : *solum* signifiant « fondement, base, surface de la terre, contrée ».

Les termes scientifiques du sol, comme beaucoup de vocables savants, ont plutôt des racines grecques :

- Pédo- : du grec *pedon*, qui signifie « sol ». Ainsi la pédologie est la science (-logie, du grec *logia*, « théorie ») du sol.
 - Édaph- : du grec *edaphos*, qui signifie « sol ».
- **Définition 1** : Le sol de l'agriculteur : Formation naturelle superficielle, meuble, de l'écorce terrestre, résultant de la transformation, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants, de la roche-mère sous-jacente, sous l'influence de processus physiques, chimiques et biologiques. (Larousse agricole, 2002).
 - **Définition 2** : c'est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent» (Aubert et Boulaine, 1980).
 - **Définition 3** : Le sol est la zone meuble plus ou moins épaisse parcourue par les racines des plantes. Il est le résultat de la dégradation de la roche mère (pour donner la matière minérale) et de la matière organique (d'origine végétale et animale).

I.2. Genèse du sol

Schématiquement, la formation de sol comprend trois phases qui se chevauchent plus au moins dans le temps. Il s'agit de :

- L'altération ou décomposition de la roche mère

- La biodégradation de la matière organique et son incorporation dans la fraction minérale.
- La différenciation résultant de la migration et accumulation de certains éléments au niveau de certaines couches ou horizons des sols.

Le déroulement de ces différentes phases qui peut être rapide ou lente reste sous l'influence de certains facteurs notamment le climat, la roche mère, la géomorphologie, les organismes vivants et le temps.

La figure 1 présente les différents processus qui interviennent dans la pédogenèse.

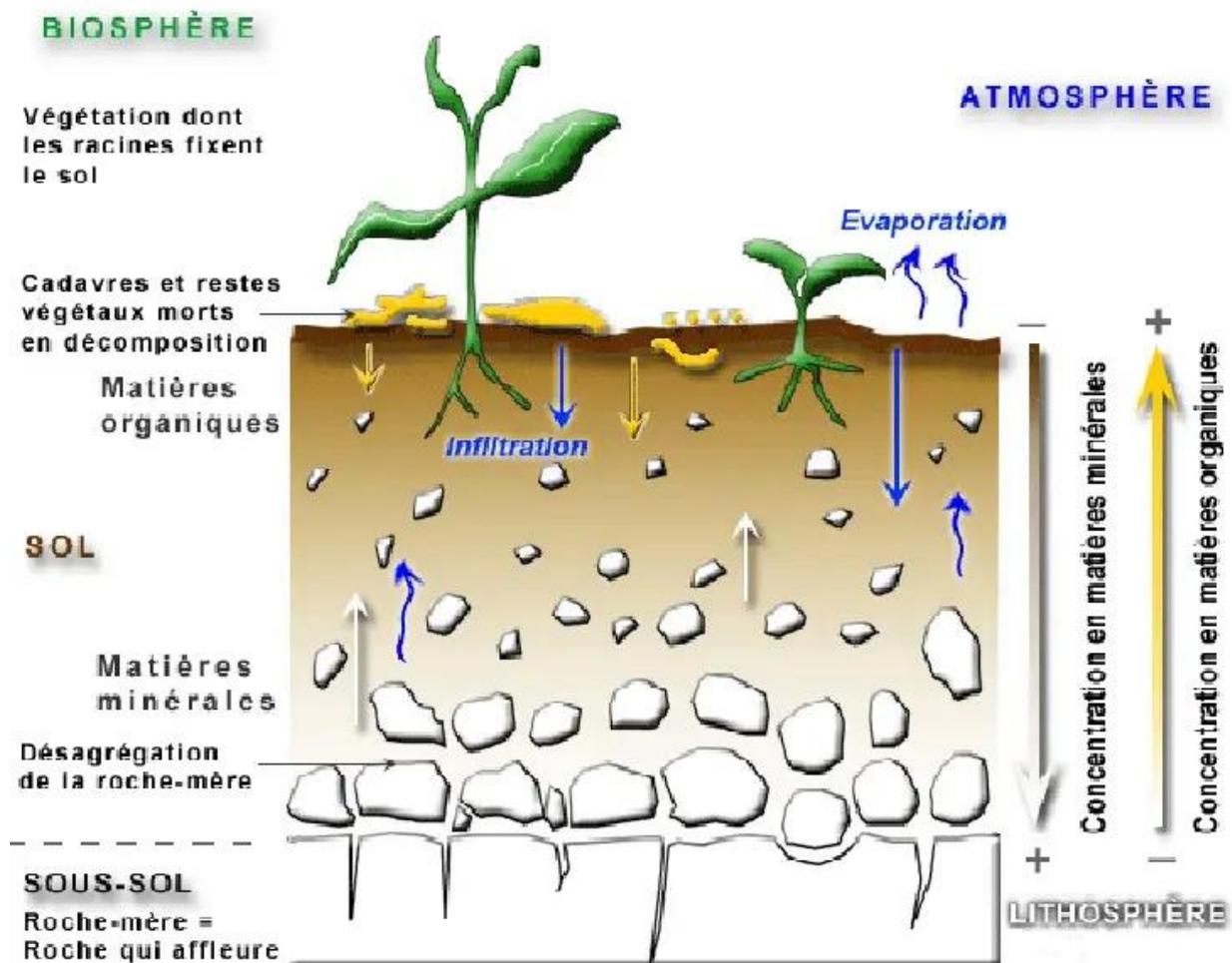


Figure 1 : Processus de formation du sol.

I.3. Les éléments constitutifs du sol

Le sol est constitué de trois fractions (**phases**) (Fig. 2) :

- La fraction minérale et la fraction organique forment l'ossature de sol et constituent la **phase solide**.
- L'eau (solution du sol) ; qui est un vecteur privilégié des matières et qui a pour origine les précipitations, les nappes et les ruissellements constitue la **phase liquide**.
- L'air (l'atmosphère du sol), qui a pour origine les matières en décomposition et la respiration ; constitue la **phase gazeuse**.

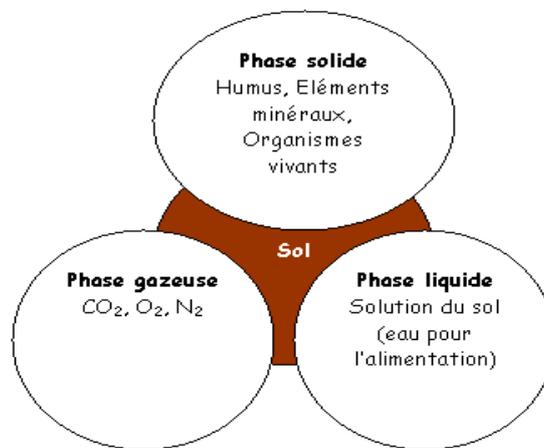


Figure 2 : Les trois phases composant le sol

Les différents constituants du sol sont résumés dans le tableau 1

Tableau 1 : Les différents constituants du sol

Constituants solides		Constituants liquides =Solution du sol	Constituants gazeux =Air du sol
Constituants minéraux	Constituants organiques		
Terre fine : Argiles, limons fins, limons grossiers, sables grossiers	Matière organique fraîche : - Constituants des tissus végétaux : cellulose, hémicellulose, tanins	Eau du sol Eléments solubles dissous : Substances organiques (acides organiques,	Constituants de l'air : O₂, N₂, CO₂ Gaz issus de l'activité des animaux du sol et

	- Déjections animales et animaux morts	sucres.... -Ions dans l'eau du sol : Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , NO ₃ ⁻ ...	des processus de décomposition : CO₂, H₂, CH₄...
Eléments grossiers : Gravier, cailloux, pierres, blocs	Matière humique : matière organique transformée		

I.3.1. Les constituants minéraux

I.2.1.1. Origine et types de constituants

Les constituants minéraux du sol sont :

- **Primaires (quartz, feldspaths, micas)**, hérités directement de la roche mère (altération). Ils sont plus abondants dans les fractions « grossières et moyennes »
- **Secondaires** issus de la transformation chimique des précédents. Ils constituent l'essentiel de la fraction fine (argiles...).

Les minéraux primaires et secondaires sont réunis dans le complexe d'altération. Si l'altération est « totale », elle libère des ions isolés.

I.3.1.2. Processus de l'altération de la roche mère

a. Désagrégation physique

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

b. Altération biogéochimique

L'altération biogéochimique des roches fait intervenir l'eau, associée ou non à l'oxygène, au gaz carbonique ou à des acides organiques, On distingue ainsi les processus suivants :

- **Hydratation** : Adjonction de molécules d'eau aux minéraux ce qui provoque une augmentation du volume, et entraîne ainsi l'ameublissement de cette roche.

- **Hydrolyse** : provoque un réarrangement important des réseaux cristallins des minéraux. C'est une décomposition par l'eau, très souvent activée chimiquement par la présence, à l'état dissous d'éléments actifs (acides minéraux et organiques). Elle est favorisée par une température élevée.
- **Oxydation** : lorsque la roche mère est altérée c-à-d que les éléments minéraux sont libérés, l'oxygène circulant dans le sol peut se recombinaison avec certains de ces éléments métalliques et donner lieu à des formes oxydées. Libération du Fe^{2+} de certains minéraux sous la forme ferrique $Fe(OH)_3$ (ex : silicates).
- **Dissolution** : intéressant certaines roches salines, par exemple, le gypse, ou même les calcaires, dont la dissolution est fortement favorisée par la présence de CO_2 .

La désagrégation physique et l'altération biochimique de la roche mère produisent un mélange de constituants de taille et de qualité minéralogique variées.

I.3.1.3. Analyse granulométrique et texture des sols

La séparation des constituants issus de l'altération de la roche mère selon la taille est obtenue par l'analyse granulométrique, qui distribue les constituants minéraux en classes de grosseur.

L'analyse granulométrique est pratiquée sur la terre fine (obtenue par tamisage au tamis à 2mm)

I.3.1.3.1. Classement des particules

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

- **Fraction grossière (cailloux et graviers)** : une première séparation à 2 mm distingue la fraction grossière (taille supérieure à 2 mm) de la terre fine. Les éléments grossiers forment le squelette du sol. Quand ils constituent la part essentielle dans la composition du sol, ils donnent ce que l'on appelle les sols squelettiques (exemple : certains sols de montagnes).
- **Sable** : Particules minérales de 50 à 2000 μm .
- **Limon** : 2 à 50 μm .

- **Argiles** : inférieures à 2 m.

Argile, limon et sable constituent la terre fine (Tableau 2) par opposition aux éléments grossiers qui comportent les fractions suivantes (Tableau3).

Tableau 2 : Dimensions des éléments minéraux du sol (terre fine)

CLASSE GRANULOMETRIQUE	DIMENSIONS (en μm)
Argile	< 2
Limon fin	2-20
Limon grossier	20-50
Sable fin	50-200
Sable grossier	200-2000

Tableau 3 : Dimensions des constituants de la fraction grossière

DENOMINATION	DIMENSIONS (en cm)
Graviers	0,2 à 2 cm
Cailloux	2 à 7,5 cm
Pierres	7,5 à 20 cm
Blocs	plus de 20 cm

I.3.1.3.2. Définition de la texture

La texture se définit comme étant la proportion relative des différentes fractions minérales du sol (Sables, Limons et Argiles). Ces différentes fractions se différencient selon la taille granulométrique de leurs particules. La détermination des proportions relatives (%) des fractions de Sable, Limon et Argile dans le sol, permet de connaître la texture du sol.

I.3.1.3.3. Classification des textures

Cette classification est importante dans la mesure où elle permet de définir en combinaison avec la structure (mode d'assemblage de ces agrégats constitue la structure de sol), l'essentiel des propriétés physiques du sol.

Comment déterminer la texture d'un sol ?

a. De façon aléatoire (sur le terrain)

Le visuel et surtout le toucher permettent de pouvoir évaluer les différents composants d'un sol. L'appréciation tactile de la texture sur le terrain peut se faire en malaxant entre le pouce, l'index et le majeur quelque cm³ de terre fine (il faut écarter au préalable tous les éléments grossiers de l'échantillon) prélevée de l'horizon à tester. On ajoute à l'échantillon de l'eau goutte à goutte tout en pétrissant, jusqu'à l'obtention d'une pâte (changeante à la pression). Le mélange obtenu est ensuite roulé en boule ou en boudin sachant que :

- Les argiles peuvent se pétrir en pâte qui ne s'effrite pas dans la main. La pâte colle un peu aux doigts, devient même très collante s'il est gorgé d'eau ; il est possible d'en faire un boudin assez fin (quelques mm de diamètre). A l'état sec, l'argile forme des blocs très durs et fortement cohérents ne tachant pas les doigts, qu'il devient très difficile d'humecter au-delà de 40% d'argile.
- Les sables grattent sous les doigts à partir de 0,1 mm, si les sables sont dominants, il se peut que l'on n'arrive pas à confectionner une boulette ou un boudin. Les sables fins inférieurs à 1mm ne grattent pas mais restent perceptibles par crissement à l'oreille (un limon humide sans sable ne crisse pas).
- Les sols riches en limons donnent entre les doigts des sensations d'onctuosité (aspect doux farineux), il est possible de former une boule mais celle-ci s'écrase facilement sous l'effet d'une pression (même faible). Les boudins se cassent vite à un fort diamètre. A l'état sec, le limon est poussiéreux, dessèche et tache les doigts ; des petits agrégats éclatent sous l'effet de la pression des doigts.

b. Au laboratoire

Dans un premier temps, il faut effectuer une analyse granulométrique du sol. Il faut ensuite interpréter cette analyse du sol avec le triangle de texture.

Principe de l'analyse :

L'analyse est pratiquée sur la terre fine (obtenue par tamisage au tamis à mailles 2 mm). Après destruction de la matière organique par un oxydant énergétique (eau oxygénée H₂O₂), les particules minérales sont dispersées à l'aide d'un dispersant alcalin (hexamétaphosphates de sodium), les particules grossières ou sable (d supérieur à 50 µm) sont séparés par tamisage ; les particules moyennes et fines sont obtenues par la mesure de la vitesse de sédimentation donnée par la loi de Stokes.

$$v = \frac{d^2(D-D')g}{18\eta}$$

v : vitesse de sédimentation (cm/sec)

d: diamètre de la particule(cm)

g : constante de la gravitation (9,8 cm/sec²)

D : densité des particules(g/cm³)

D': densité de l'eau(g/cm³)

η: viscosité de l'eau (g/(cm. sec))

La détermination de la texture d'un sol est réalisée en utilisant des triangles de texture. Les triangles peuvent être à trois dimensions (triangle équilatéral) dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile, exemple : triangle des textures USDA (Fig. 3) ou à deux dimension prenant en compte deux constituants seulement (argile et sable ou argile et limons) tel que celui du GEPPA (Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée) publié en 1963, qui se présente sous la forme triangle rectangle où ne sont représentés que les argiles et les limons et il contient 17 classes (Fig.4).

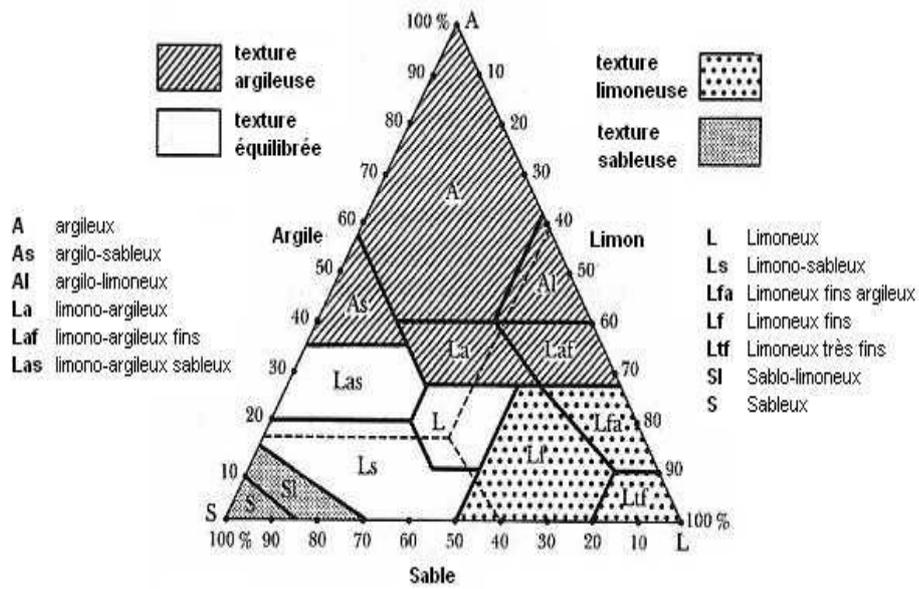


Figure 3 : Triangle des textures d'après USDA, 1975.

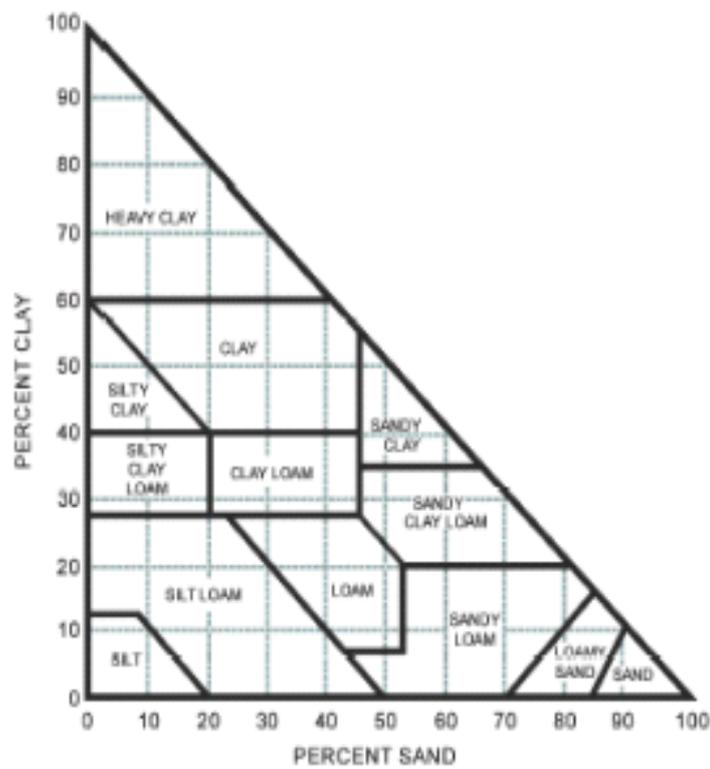


Figure 4 : Triangle des textures du système canadien GEPPA.

Ainsi, il est possible de regrouper les textures dans quatre catégories principales

- **Texture sableuse** : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserves d'eau et éléments nutritifs.
- **Texture limoneuse** : sols de mauvaises propriétés physiques : peu perméables, mal aérés et asphyxiants pour les racines.
- **Texture argileuse** : sols chimiquement riches mais à mauvaises propriétés physiques : sols lourds, imperméables, mal aérés formant un obstacle à la pénétration des racines et travail du sol difficile.
- **Texture équilibrée** : elle correspond à l'optimum. Exemple de granulométrie favorable à la culture : 25% d'argile, 30 à 35% de limons, 40 à 45% de sable

I.3.1.4. Propriétés des différents constituants minéraux

- **Les sables**
 - Favorisent la pénétration de l'eau et de l'air : ils rendent le sol perméable.
 - Ils retiennent peu l'eau : le sol est filtrant.
 - Ils facilitent les échanges de température : le sol se réchauffe vite au printemps.
 - Ils ne peuvent s'agglomérer en mottes : le sol est léger (et peut donc être assez sensible à l'érosion) et facilement pénétrable par les racines.
- **Les limons** : Les limons ont :
 - Fixation peu importante des ions
 - Cohérents à l'état sec
 - Non plastiques à l'état humide.
 - Ils rendent le sol «battant» : le sol a tendance à se tasser en surface sous l'effet des pluies et à former des croûtes (glaçage en surface).
 - Ils ont tendance à retenir l'eau en s'opposant à son infiltration en profondeur : le sol est imperméable en surface, asphyxiant pour les racines
- **Les argiles** : Les argiles se caractérisent par :
 - Une la rétention d'une grande quantité d'eau
 - Le gonflement à l'humectation et la rétraction à la dessiccation

- Cohérentes à l'état sec, plastique à l'état à l'état humide (capacité à être modelé)
- Elles sont électronégatives (Elles fixent les ions)
- Elles se flocculent ou se dispersent selon le milieu (ces propriétés résultent du fait que l'argile est un colloïde électronégatif).
- **L'état dispersé** : Les fines particules d'argile mélangées avec l'eau sont animées d'un perpétuel mouvement de répulsion permettant l'état de suspension. Ce trouble est dû aux charges électriques de même signe entourant les fines particules qui constituent l'argile.

Conséquence agronomique : Dans le sol sous l'effet de la pluie, l'argile est incapable de maintenir soudés les agrégats terreux. La structure se dégrade : on dit qu'elle est instable. Le sol devient lourd et asphyxiant.

- **L'état flocculé** : Si les charges électriques sont neutralisées, les particules s'agglomèrent en agrégats : il y'a flocculation. Ce phénomène se produit quand les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont abondants (les particules peuvent aussi fixer H^+ , Na^+ et NH_4^+).

Conséquence agronomique : Dans le sol, après une pluie, l'argile flocculée ne se mélange pas, elle gardera ses micelles agglutinées et elle maintient soudés les agrégats terreux. La structure est stable, elle résiste aux effets dégradants de la pluie : le sol reste aéré et meuble.

- **Influence de la nature des ions sur la flocculation**

La stabilité structurale dépend notamment de la bonne flocculation des argiles, et donc de la nature de cations présents dans le sol. Les cations Ca^{++} flocculent bien les argiles, ils sont suivis de Fe^{++} , Mg^{++} et Al^{++} . Cependant, K^+ , H^+ et surtout Na^+ n'ont qu'un faible pouvoir flocculant (Fig. 5).

Dans le sol, l'argile est normalement maintenue à l'état flocculé grâce aux sels solubles de calcium ; si le calcium est entraîné par lessivage, il y'a dispersion.

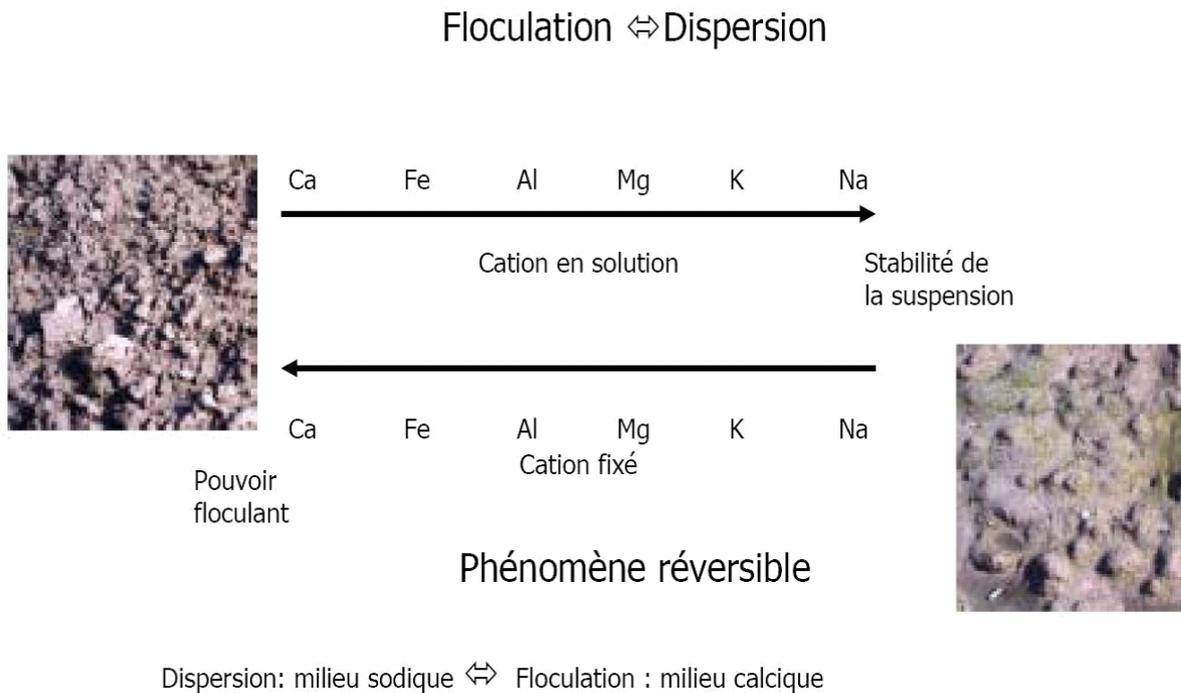


Figure 5 : Floculation et dispersion des argiles.

I.3.2. Les constituants organiques

I.3.2.1. Rôles de la matière organique dans le sol

La matière organique du sol joue trois rôles essentiels :

- **Energétique** comme source de carbone : le carbone de la matière organique est la source énergétique des microorganismes hétérotrophes.
- **Physique** comme élément majeur de la structure du sol.
- **Nutritionnel**, pour l'alimentation des plantes : la minéralisation de la matière organique libère les éléments nutritifs (N, P, K, S...) contenus dans les molécules organiques

Ces trois rôles dépendent des types de matière organique, de leur quantité et de leur transformation.

La figure 6 résume les différents rôles assurés par la matière organique dans le sol

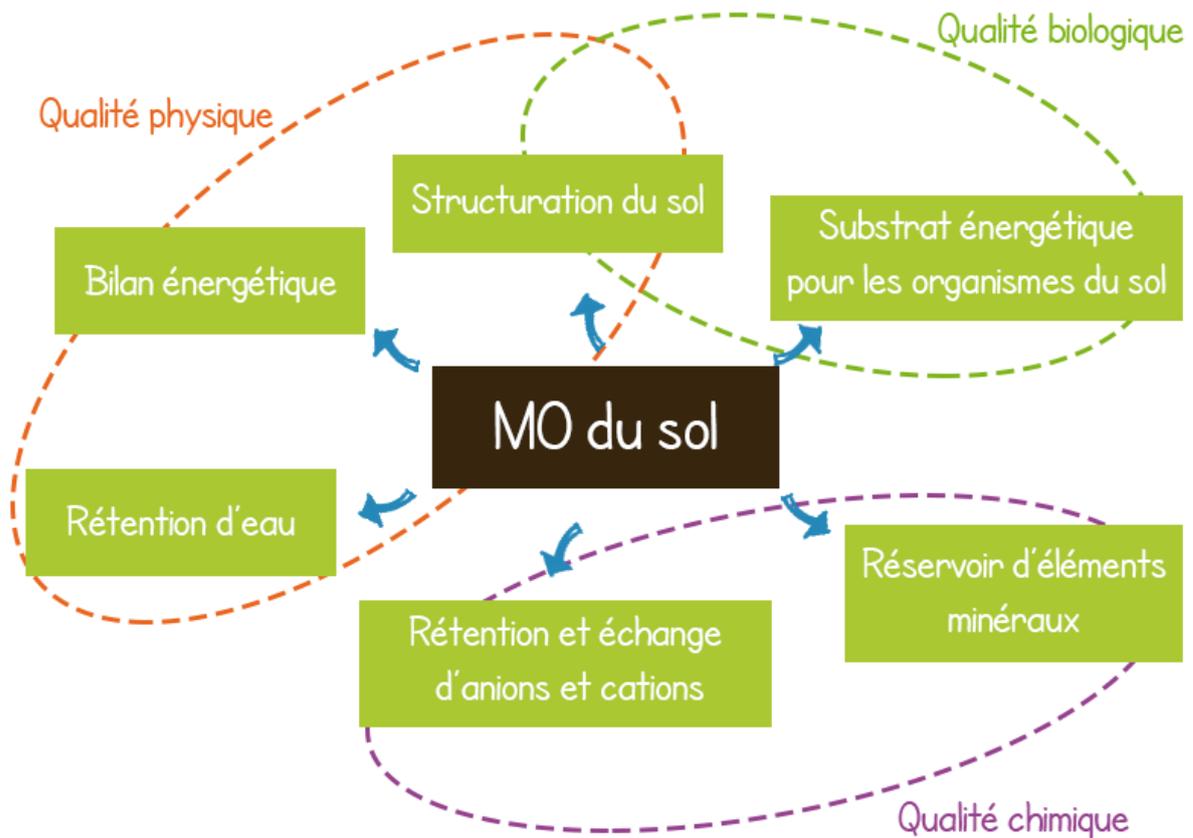


Figure 6 : Les rôles de la matière Organique.

I.3.2.2. Quels sont les constituants organiques du sol ?

La fraction organique (biologique) est constituée de :

- **Les organismes vivants** appelées **biomasse**. Ils peuvent être d'origine végétale, animale ou microbienne.
- **La matière organique du sol** : Elle est composée
 - **d'éléments principaux** (le carbone-C, l'hydrogène-H, l'oxygène-O et l'azote-N).
 - **d'éléments secondaires** (le soufre S, le phosphore P, le potassium K, le calcium Ca et le magnésium Mg)
 - ainsi que **d'oligoéléments** (Fe, Cu...).

Elle se repartie en :

- **La matière organique fraîche** : végétale (résidus végétaux) et animale (déjections et cadavres).

- **Des composés organiques intermédiaires** : appelés matière organique transitoire (évolution de la matière organique fraîche).
- **Composés humiques (substances humiques, humus)** : ce sont des macro molécules de poids moléculaire élevé provenant de l'évolution des composés organiques transitoire, composées d'un assemblage de différentes chaînes hydrocarbonées sans répétition d'une séquence définie (contrairement aux molécules biologiques). L'ensemble de ces composés forme la matière organique stable. Ils sont issus de l'évolution biochimique lente des diverses matières organiques des sols (humification)
L'humus est, en général, lié à la matière minérale notamment, argiles (complexe argilo-humique).

La figure 7 montre la composition de la matière organique du sol.

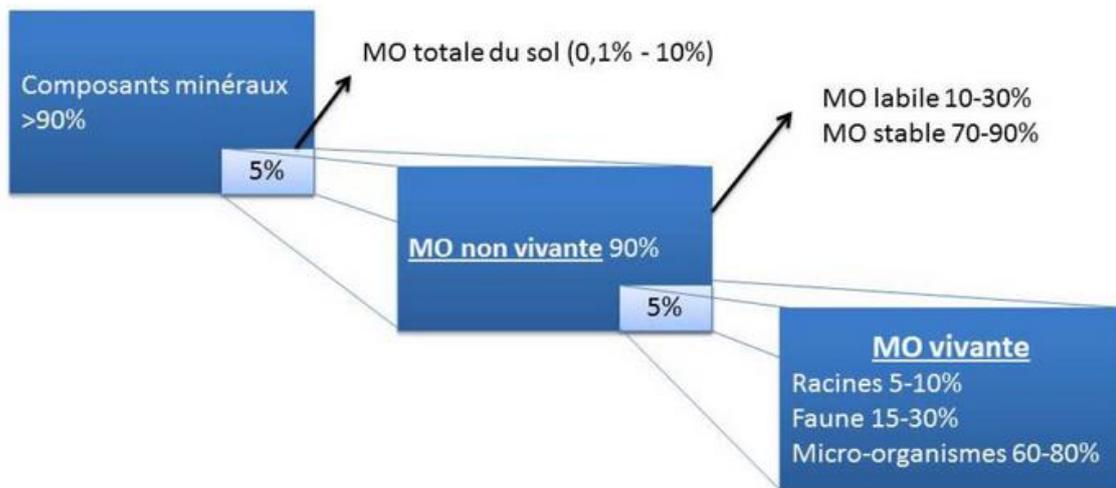


Figure 7 : Composition des matières organiques (en poids) d'un sol fertile.

I.3.2.3. Transformation de la matière organique dans le sol

La décomposition des organismes vivants dans le sol conduit à la formation d'une matière organique fraîche qui est le point de départ de deux processus de transformation : la minéralisation et l'humification

I.3.2.3.1. La minéralisation

Le processus de minéralisation conduit à la destruction et la transformation de la matière organique en éléments simples : gaz (CO_2), azote minéral (l'ammonium NH_4^+ , le nitrate NO_3) et éléments minéraux nutritifs pour les plantes. Ce sont surtout les microorganismes qui effectuent ces transformations. Beaucoup de facteurs interviennent dans ce processus :

- **La nature de la matière organique** : plus les molécules organiques sont complexes, plus la dégradation n'est difficile. Plus les molécules organiques sont petites et simples plus elles sont facilement dégradées par la biomasse vivante.
- **Facteurs physicochimiques du sol**
 - **Température du sol** : Les microorganismes du sol ont une activité optimale entre 25 et 35°C. La minéralisation est encore possible à des températures plus élevées par des enzymes produites par ces microorganismes. En dessous de 10°C, la minéralisation est très réduite.
 - **Humidité** : trop d'humidité empêche la circulation de l'oxygène nécessaire à la respiration des organismes vivants. A l'inverse la sécheresse provoque l'activité des populations microbiennes.
 - **Teneur en oxygène** : la plupart des transformations de la matière organique réalisées par les microorganismes demande de l'oxygène.
 - **pH du sol** : L'activité microbienne est optimale à la neutralité (pH=7).
 - **La composition du sol** : la teneur en matière organique, la teneur en argile et le type d'argile du sol conditionnent la qualité du complexe argilo-humique qui stocke les éléments minéraux assimilables par les plantes. La composition chimique du sol a également une action directe sur le pH du sol.

- **Cultures et pratiques culturales**

- Le type de culture intervient par son système d'enracinement et par les exsudats : racinaires. La rhizosphère joue un rôle important dans la vie du sol ; elle favorise le développement des microorganismes, grâce aux exsudats qui contiennent des sucres et d'autres substrats nutritifs.
- Les pratiques culturales agissent sur l'ensemble des facteurs physiques, chimiques et biologiques du sol.

Les effets des pratiques culturales sur la minéralisation de la matière organique sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Effet des pratiques culturales sur la minéralisation de la matière organique

Pratiques culturales	Facteurs du sol modifiés Conséquences sur la minéralisation de la matière organique
Travaux mécaniques (labours)	Structure et porosité du sol modifiées Minéralisation accélérée
Irrigation	Humidité du sol maintenue Durée de minéralisation plus longue
Fertilisation et chaulage	Fertilité chimique augmentée, pH relevé Restitutions de la culture (racines et organes aériens) plus élevées. Minéralisation augmentée.
Pesticides	Biomasse du sol moins importante Minéralisation réduite

I.3.2.3.2. L'humification

L'humification des diverses formes de matière organique fraîche aboutit à l'humus du sol. La formation de l'humus ou humification consiste en des recombinaisons de matières organiques de nature diverses. Ces recombinaisons sont issues de processus chimiques complexes qu'on appelle condensation et polymérisation.

Elle fait suite à la minéralisation. Sous l'effet des microorganismes, la partie de la matière organique ayant échappée à la minéralisation et essentiellement constituée d'éléments résistants comme la lignine, subit une dégradation à la base de l'édification des molécules nouvelles, de plus en plus complexes, de nature colloïdale et de couleur foncée, c'est l'humus et le processus de genèse de ces produits est l'humification.

Divers composés issus de ce processus améliorent significativement la situation interne du sol et le processus vital créant la fertilité naturelle et par conséquent la productivité. Sans humus, on ne pourrait pas parler de « sol » mais uniquement de « terre ».

L'humus peut être défini comme un composé organique amorphe, sombre, cohésif et hydrophile, avec un poids moléculaire compris entre 500 et 300 000 daltons.

La formation de l'humus dépend de microorganismes présents et surtout des enzymes qu'ils libèrent. Comme pour le processus de la minéralisation de la matière organique, beaucoup de facteurs interviennent : les facteurs physico-chimiques et biologiques du sol, les cultures et les pratiques agricoles. La formation de l'humus est ralentie en sol très acide, et hydromorphe, et lorsque la température du sol diminue.

L'humus est composé principalement des :

- **Acides humiques**

Les acides humiques se trouvent dans le sol en plus grande quantité que les autres composés humiques. Il est insoluble dans les acides et les alcools, et a un poids moléculaire intermédiaire. Il est constitué de couches très fines et planes liées entre elles, formant un matériel réticulaire spongieux.

Ils sont de constitution complexe, et sont peu mobiles, mais sont capables de se lier plus ou moins fortement selon leur type avec d'autres corps présents dans le sol et en particulier avec l'argile par des ponts calciques. Dans ce cas, on parle d'acides humiques gris qui caractérisent les mull calciques ; le complexe formé avec l'argile ou complexe argilo-humique est très stable. Il existe également des acides humiques bruns qui constituent des composés relativement peu stables qui caractérisent le moder.

- **Acides fulviques**

L'acide fulvique se caractérise par son poids moléculaire relativement bas et son association avec les polysaccharides présents dans le sol. Il est soluble dans les réactions acides et basiques. Du fait de son plus grand taux en acide carboxylique, il a une grande capacité intrinsèque à dissocier les minéraux originels du sol, ce qui influence la genèse de ce dernier. Les colloïdes anioniques peuvent former des complexes stables avec des cations polyvalents comme Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} , etc...

Les acides fulviques sont de constitution plus simple, et sont très mobiles et très vite entraînés par les eaux d'infiltration, qu'ils chargent de l'argile et du fer auxquels ils sont liés. Ce sont, par ce mécanisme, les principaux agents du lessivage du fer et de la podzolisation. Ils ont la capacité de chélater plusieurs minéraux du sol et de favoriser leur absorption par les plantes. Ce sont des acides pauvres en Carbone et riches en Azote, et caractérisent le *mor*. Ils se forment dans des milieux acides et confinés avec une activité bactérienne plus réduite par rapport à celle des champignons.

- **Acide himatomélanique**

L'acide himatomélanique est un mélange complexe de composés humiques tels que l'acide fulvique et l'acide humique, soluble dans les bases et l'alcool.

- **Humine**

L'humine est le composé humique le plus stable dans le sol, du fait de son haut poids moléculaire qui atteint 300 000 daltons. Elle est insoluble dans les divers agents chimiques de dégradation (acides, alcools et bases) et perdure fortement unie aux colloïdes minéraux les plus fins du sol comme les argiles. Cette caractéristique lui permet de persister dans le profil plus longtemps, si celui-ci n'est pas altéré par le labour. La

composition chimique et structurale de l'humine provient de la lignine des résidus de récoltes, en quantité particulièrement importante dans les sols forestiers.

Principales formes d'humus

La forme d'humus est un reflet fidèle de l'ensemble des activités biologiques des sols, elles-mêmes conditionnées par l'ensemble des facteurs écologiques à la base de la biodégradation de la matière organique.

Suivant qu'ils se forment en milieu aéré ou non on distingue deux grandes catégories d'humus :

- En conditions aérobiques : *Mull>moder>mor*. La formation de ces trois types d'humus diffère suivant la nature de végétation et le pH du sol.
- En conditions anaérobies : on trouve principalement les tourbes et l'Anmoor.
 - **Mull** : C'est l'humus de bonne qualité des forêts développées sur des sols suffisamment riches et peu acides. Les mull sont les humus formés en présence d'une forte activité biologique entraînant la décomposition rapide de la litière. Ce milieu est également marqué par la formation des complexes argilo-humiques, une rapide minéralisation et aussi par l'absence quasi-totale de la couche humifère.
 - **Le moder** : Humus dû essentiellement à l'action de petites espèces fauniques (larves d'insectes, des vers divers). Il est constitué de la masse d'humus comprenant de fins débris ciprogenes plus au moins remaniés riches en acides fulviques, peu de complexes argilo-humiques. Les processus de décomposition-humification sont nettement ralentis, il y'a formation de la couche humifère.

L'humus de type moder est souvent défini comme un intermédiaire entre le mull et le mor. Cet humus forestier aéré est caractérisé par la juxtaposition des fractions organiques et minérales et l'incorporation incomplète des matières organiques peu transformées au sol minéral. Les moders ressemblent aux mors au sens où ils sont constitués d'une accumulation de matière organique partiellement décomposée,

mais ressemblent aux mulls puisqu'ils présentent une certaine activité faunique responsable de la fragmentation et de l'incorporation de la matière organique.

- **Mor** : Les humus de type mor sont dits peu actifs et peu évolués. La transformation des matières organiques est très faible et très lente, si bien qu'elles s'accumulent en des couches distinctes superposées au sol minéral. Le passage est brutal entre les horizons organiques et minéraux contrairement au moder où la transition est plutôt modérée (Ponge, 2003). Les échanges entre horizons holorganiques et organo-minéraux sont quasiment nuls. L'horizon minéral sous-jacent est appauvri en microagrégats.
- **An moor** : Humus en conditions semi-permanentes d'hydromorphie et dû à l'activité alternée d'une microflore aérobie, d'une faune aquatique et terrestre. La décomposition de la matière organique est très lente mais l'incorporation des substances fines à la fraction minérale est très forte, il n'y a pratiquement pas de litières. An moor est un humus gris foncé à noir gorgé d'eau, il présente un aspect boueux, il a l'aspect terreux à l'état modérément humide (frais).
- **La tourbe** : Humus formé en conditions d'hygrométrie permanente, à partir de végétation à base de mousse et de roseau ; la minéralisation et l'humification sont extrêmement lentes et très incomplètes, débris et résidus organiques s'accumulent en couches épaisses (parfois de plusieurs de m) constamment imbibées d'eau et à structure fibreuse.

Entre ces principales formes existent de nombreuses formes intermédiaires et des variantes liées à d'autres facteurs de milieu. Ex : mull calciques au moor calcique.

Fonctions de l'humus dans le sol

a. Fonctions pédologiques

L'humus intervient dans :

- La désagrégation des roches et des minéraux (éléments de l'altération chimique de la roche).

- La mise en place des horizons humiques des sols (dynamique de la matière organique).
- La migration de certains éléments chimiques du sol notamment les sesquioxydes.

b. Les fonctions physiques

- L'humus est partiellement responsable de :
- La thermo protection superficielle des sols
- La structuration et porosité des sols.

c. Nutritives

- Source d'éléments nutritifs libérés au cours de l'humification
- Contribution au pouvoir adsorbant
- Répartition verticale des éléments nutritifs avec récupérations sur les activités radicales
- Attaque des réserves minérales du sol.

L'équilibre entre les processus de minéralisation et d'humification est à la base de la plupart des propriétés agronomiques des sols.

La figure 8 illustre le processus de dégradation de la matière organique dans le sol.

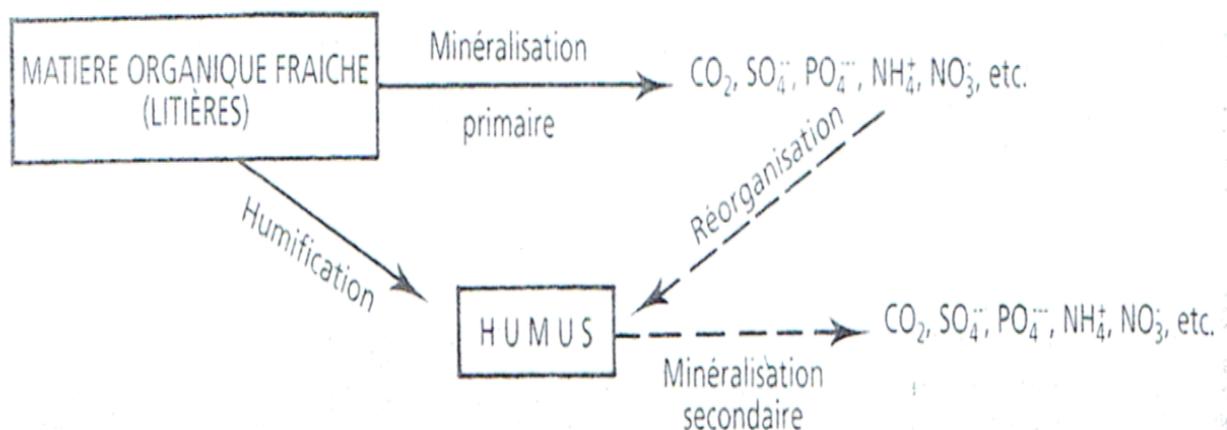


Figure 8 : Processus de dégradation de la matière organique dans le sol.

I.3.2. Les complexes colloïdaux (complexe argilo-humique)

Les colloïdes du sol qui sont l'argile et l'humus s'associent (formation de liaisons) pour former des complexes organo-minéraux appelés complexes argilo-humiques (CAH) ou complexes adsorbants. Le complexe argilo-humique intervient surtout comme ciment colloïdal pour assurer la cohésion des agrégats du sol et il apporte aux plantes les nutriments.

- **Structure de complexe argilo-humique**

Un cation, généralement le calcium ou le fer assure liaison des argiles et des polymères organiques, en formant un pont entre les deux. Le calcium donne des liaisons solides très stables, qui empêche la minéralisation rapide de la matière organique humifiée et qui s'oppose à la dispersion des argiles (Fig. 9).

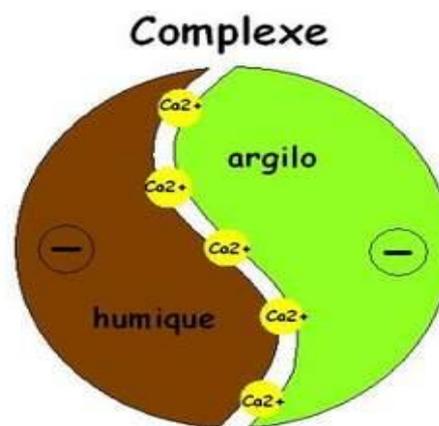


Figure 9 : Structure du complexe argilo-humique

- **Effet du complexe argilo-humique**
 - Un complexe argilo-humique stable procure au sol des propriétés favorables à sa fertilité :
 - La floculation des colloïdes argilo et humiques favorise une structure aérée et un stockage hydrique suffisant.
 - La liaison argilo-humus freine la minéralisation de la matière organique humifiée.
 - En s'y liant, l'humus empêche la dispersion de l'argile.
 - L'intégration de l'argile et de l'humus dans un même composé augmente la capacité du sol à retenir les bioéléments indispensables aux plantes (Fig. 10).

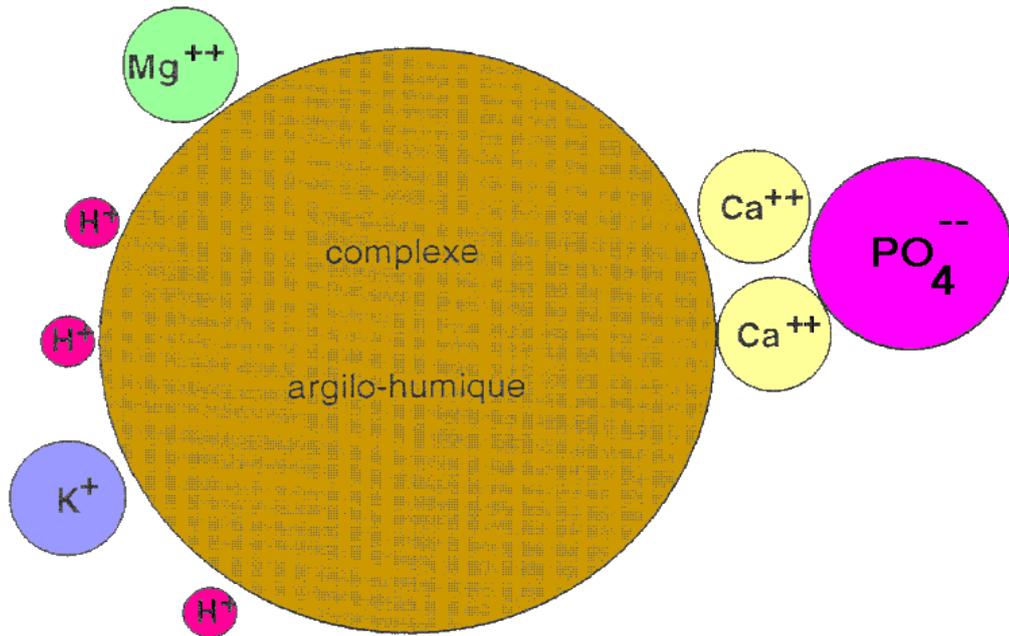


Figure 10 : Fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

Chapitre II

L'organisation morphologique des sols

II.1. Morphologie des sols

Le sol étant un milieu naturel, c'est par sa morphologie qu'il est tout d'abord facilement identifiable. En effet, ce que tout ou chacun voit des sols dans les paysages et qu'il peut interpréter à partir du regard est, principalement, du domaine de la morphologie (on pourrait dire « anatomie »).

On distingue des :

- Couleurs (rouge, blanc, sombre, brun, jaune...)
- constituants (argiles, sables, calcaire, sels... matières organiques)
- structures superficielles (mottes fines ou grossières, tassements, pellicules sans porosité, traces de roues de machines agricoles, flaques d'eau dans les champs, fissurations...)
- morphologies de profondeur, visibles quand il y a des coupes (les couches superposées, leurs couleurs et leurs structures)
- variations latérales, en surface et en profondeur, en fonction des roches, des reliefs, des végétations, des activités humaines ;
- dégradations d'origine humaine : érosions, tassements, salinisation, pollutions... ;
- aménagements anthropiques : terrasses, labours, cultures en courbes de niveaux, irrigation, drainage, urbanisation, constructions avec des matériaux issus des sols...

Tout cela permet d'identifier les sols, leur présence et leur diversité et comprendre les sols et leurs rôles.

II.1. Les organisations élémentaires

Les constituants minéraux et organiques du sol ne sont pas disposés les uns par rapport aux autres d'une façon quelconque. Au contraire, les constituants du sol sont organisés les uns par rapport aux autres afin de former des organisations élémentaires (agrégats, mottes, vides...) qui sont le premier niveau d'organisation d'un sol.

II.1.1. Formation des agrégats

L'association entre la matière organique et les éléments fins du sol aboutit à la formation d'agrégats dont la taille peut varier de quelques micromètres à quelques centimètres. L'assemblage de ces agrégats constitue la structure de sol.

Un agrégat est un agglomérat de particules dont la cohésion interne est assurée par les argiles, le fer, les matières organiques et l'eau. Un agrégat est le résultat de l'organisation naturelle des constituants solides du sol.

On distingue deux types d'agrégats

- **Micro-agrégats** de 20 à 250 μm de diamètre, très stables, formés de matière organique fortement aromatique liée aux argiles et aux limons fins, et de polysaccharides bactériens (Fig. 11).

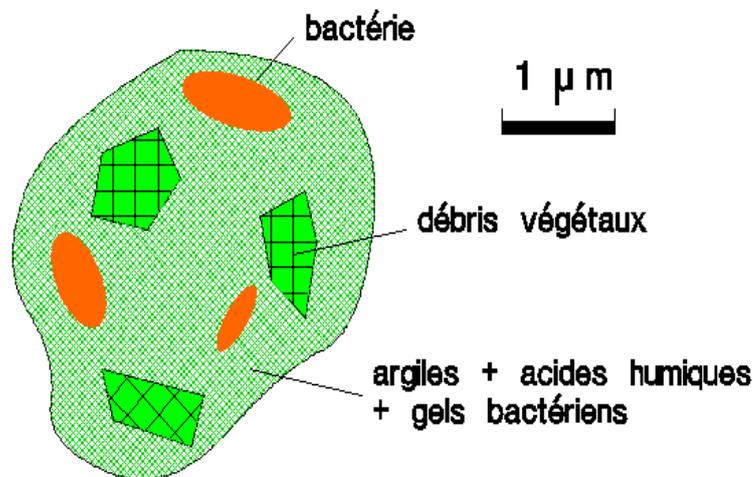


Figure 11 : détail d'un micro agrégat

- **Macro-agrégats** > 250 μm de diamètre, contenant des limons grossiers et des sables, agrégés par des polysaccharides bactériens (Fig. 12).

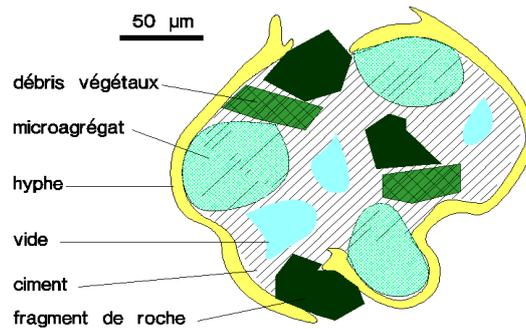


Figure 12: détail d'un micro agrégat

Les agrégats qui correspondent au niveau de structuration le plus apparent peuvent être assemblés en ensemble plus grands constituant ainsi une sur-structure. Inversement, les mêmes agrégats se subdivisent souvent en agrégats plus petits délimités par des microfissures et qui se dégagent passivement mais sous l'action des doigts ou d'un instrument (couteau): il s'agit alors d'une sous-structure (Fig.13 et 14).

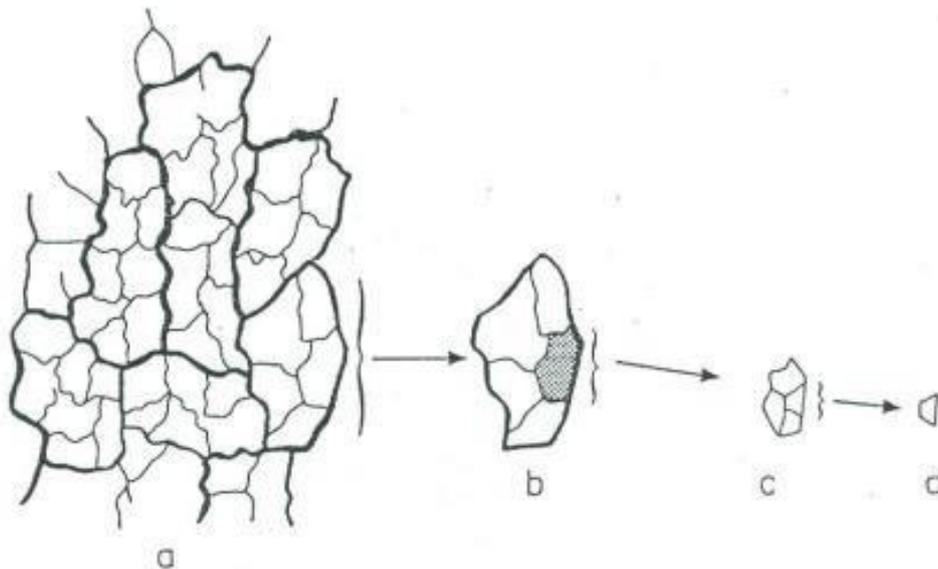


Figure13:Niveaux de structuration du sol.

- (a) Aspect général
- (b) Élément de la sur-structure
- (c) Éléments de la structure
- (d) Élément de la sous structure

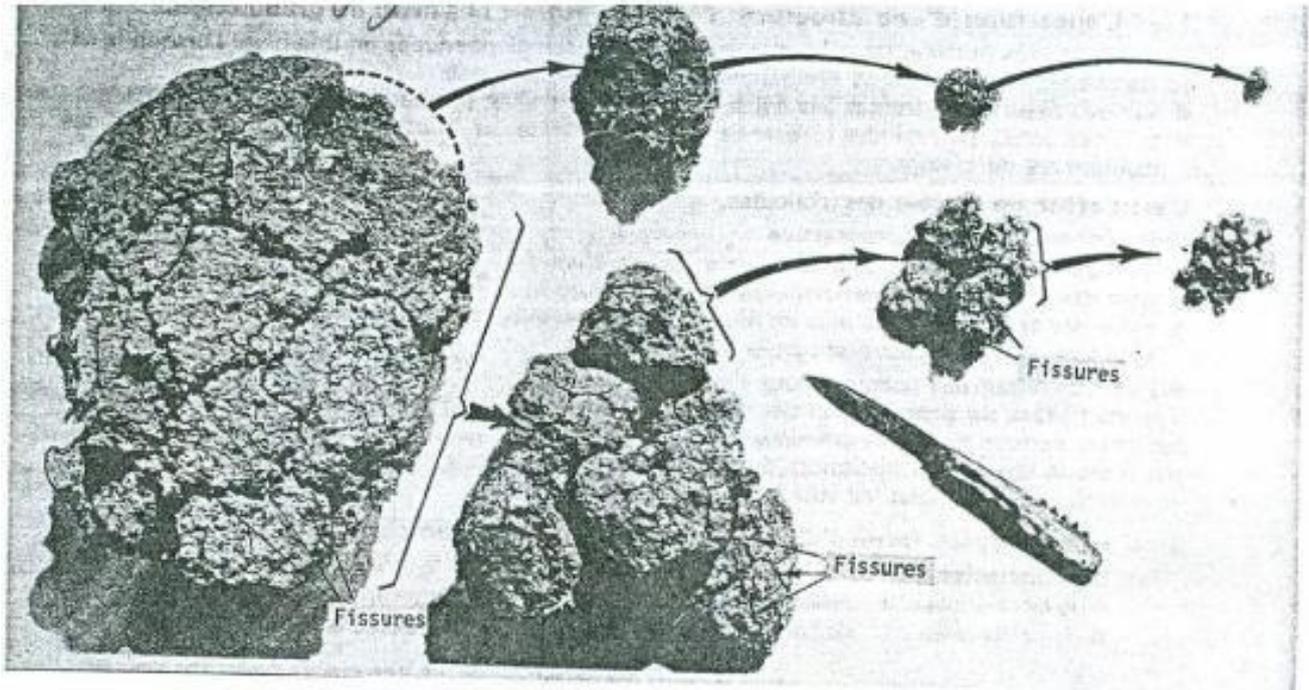


Figure 14 : Les divers niveaux emboîtés de structuration d'une motte.

- **Mécanismes de formation des agrégats**

Trois mécanismes sont à l'origine de formation des agrégats :

- La **floculation des colloïdes électro-négatifs (argile et composés humiques)** : elle se fait en présence de cations flocculant (Ca^{2+} , Al^{3+} , Mg^{2+} ...)
- La **cimentation des constituants** (particules floculées et éléments squelettiques), due à la présence de matière organique, de minéraux argileux, de fer, de calcaire, de silice. L'activité biologique (faune et flore du sol) joue également un rôle important de cimentation des constituants entre eux et dans la formation du complexe organo-minéraux.
- La **fissuration** : la formation de fentes de retrait lors de l'alternance des périodes sèches et humides, isole les unités structurales qui font former des faces à arêtes vives (structure anguleuse). La fissuration est d'autant plus développée que le sol est plus argileux (et pauvre en humus) et que les argiles du sol sont de type gonflant.

II.1.2. La structure

II.1.2.1 Définition de la structure

La structure d'un horizon se définit comme le mode d'arrangement des différentes particules solides (sables, limons, argiles, matières organiques) du sol et la conséquence de cet assemblage (formation d'agrégats).

Ces agrégats s'assemblent à différentes échelles comme des pièces d'une construction et finissent par présenter une organisation structurale visible à l'œil nu.

La structure est un état du sol, variant à court terme, par exemple selon les saisons. Elle dépend de la texture, du taux d'humidité, de la matière organique et de l'activité de la faune.

II.1.1.2. Les composants de la structure du sol

La structure d'un sol se construit à partir de différentes composantes que l'on peut diviser en trois groupes :

- **Les matériaux** : argiles, sable, limon et humus.
- **Les « ciment »** : mucilage, polysaccharides, calcium, fer, aluminium...
- **Les « artisans »** : L'activité biologique du sol (racines, hyphes de champignons, micro et macroorganismes).

Les éléments climatiques (pluie, vent, gel, sécheresse), les travaux du sol et la production agricole intensive influencent constamment la structure du sol.

II.1.1.3. Types de structures

La structure traduit la façon dont les particules terreuses sont disposées les unes par rapport aux autres. On distingue différents types de structures reflétant des propriétés physiques ou chimiques différentes (Fig. 15) :

- **Structure massive (compacte)** : Éléments sableux noyés dans une masse d'argile : sol imperméable à l'air et à l'eau : le sol est asphyxiant
- **Structure particulière** : pas ou peu d'agrégation, éléments minéraux et organiques dissociés. Elle peut être issue de phénomène de battance ou de mauvais traitement au sol ou par manque de ciments argileux ou humiques. Le sol est filtrant.

- **Structure grumeleuse** : agrégats de taille réduite (2 mm à 2 cm) elle favorise les échanges entre les végétaux et le sol ainsi que la vie microbienne.
- **Structure prismatique** : issue de la fissuration des argiles ou des sols sodiques, ils se forment des prismes verticaux de 10 à 15 cm de diamètre. Indique des variations d'eau très importantes. Mauvais contact racinaire trop d'air après avoir eu trop d'eau.
- **Structure polyédrique** : agrégats de grande taille (4 cm) à arêtes plus ou moins vives sans direction privilégiée. Faible contact avec les racines. Le sol est perméable et assure une bonne aération.
- **Structure lamellaire** : parallélépipèdes aplatis, arêtes vives à bord relevé, issues de couches alternées d'argile et de sable ou de mauvaises pratiques d'entretien du sol, obstacle à la pénétration verticale des racines et de l'eau.

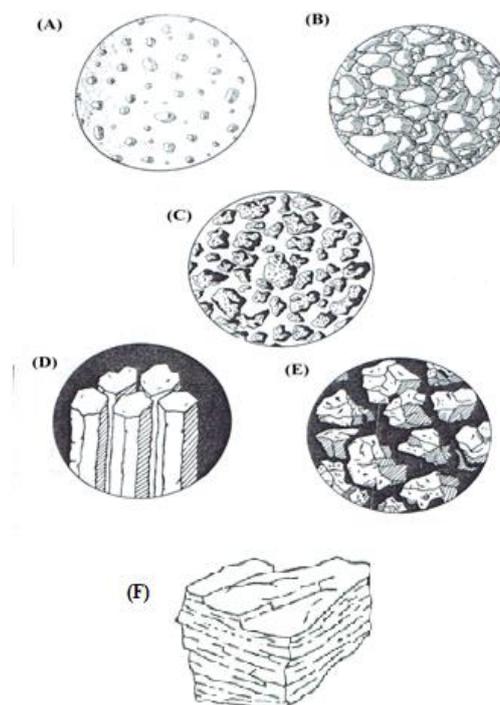


Figure 15 : Quelques exemples de structure du sol.

- (A) Structure massive
- (B) Structure particulaire
- (C) Structure grumeleuse
- (D) Structure prismatique
- (E) structure polyédrique
- (F) Structure lamellaire

II.1.1.4. La netteté de la structure

La netteté de la structure s'apprécie par la proportion d'agrégats structurés, plus au moins facilement décelables dans la masse. Elle se caractérise en trois classes de « peu nette » à « très nette » :

- **Structure peu nette** : éléments structuraux mal formés, pratiquement invisibles in situ. Dans la main, un prélèvement se décompose en quelques agrégats entiers, mélangés à de plus nombreux agrégats brisés et à une masse importante de « poudre ».
- **Structure nette** : éléments structuraux bien formés, moyennement stables et apparents, moyennant un examen attentif in situ.
- **Structure très nette** : éléments structuraux bien formés, stables, aisément visibles in situ, adhérant peu les uns aux autres. Dans la main un prélèvement se décompose presque uniquement en agrégats entiers avec quelques agrégats brisés et très peu ou pas de «poudre».

II.1.1.5. Notion de stabilité structurale

Le terme stabilité structurale désigne la permanence de structure sous l'action de divers agents de désagrégations (pluie, vent, tassement...), c'est un aspect très important de la qualité physique de sols.

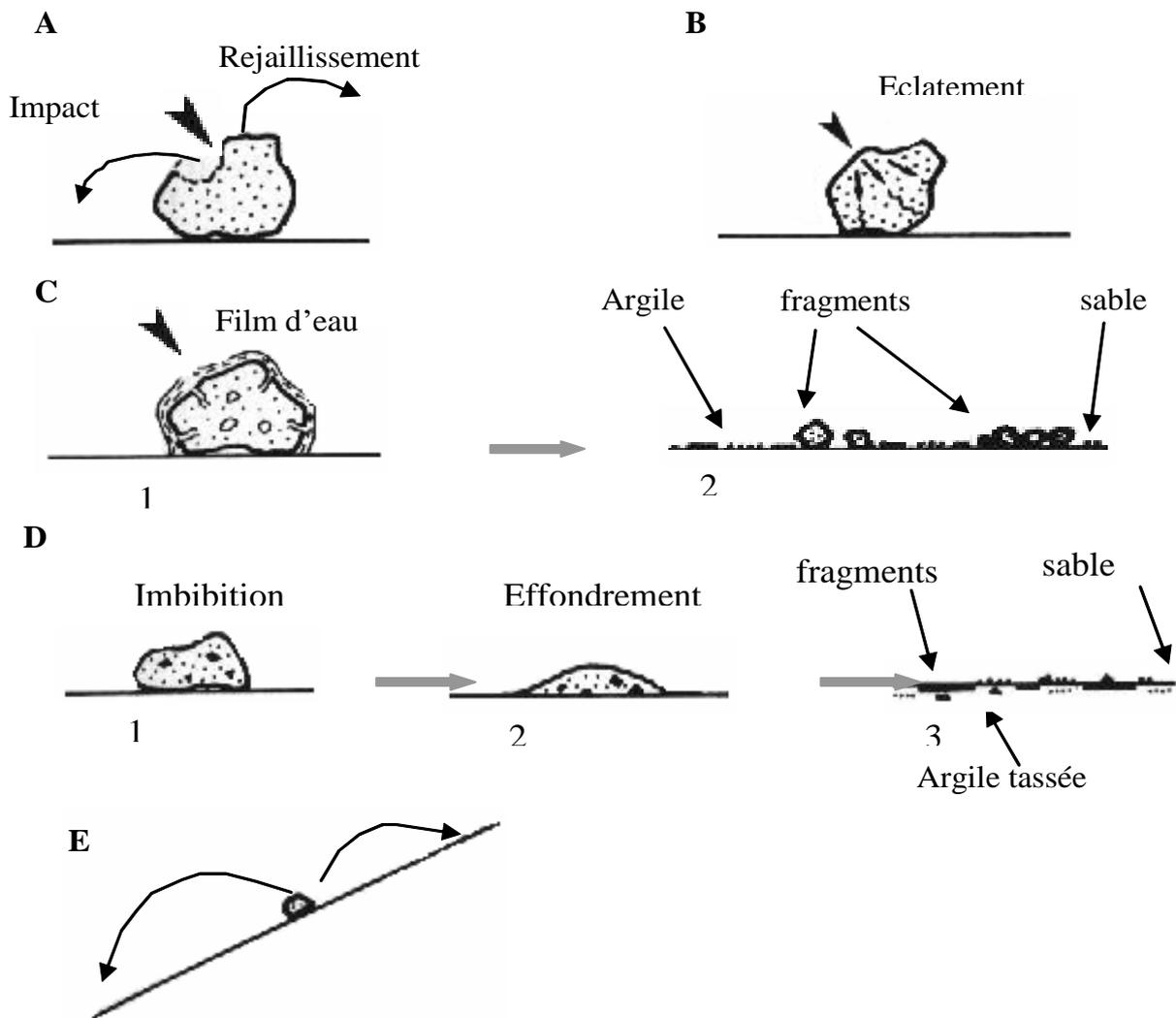
Sous l'action des facteurs dégradants, le sol opposera une résistance plus ou moins forte que l'on appelle stabilité structurale.

- **Dégradation de la structure**

La structure du sol est soumise à diverses formes de dégradation qui ont un impact négatif sur leurs propriétés physico-chimiques et biologiques.

La destruction de la structure se produit par une perte de porosité, de perméabilité, une prise en masse, un état de dispersion et à la surface du sol, par la formation d'une croûte de surface. Les facteurs de dégradation les plus courants sont :

- Action des précipitations : En saisons humides, dégradation des structures grumeleuses (fragmentées) par gonflement des argiles, rupture des agrégats par action mécanique des gouttes de pluies, dilution des cations flocculant et formation des croûtes de battance (Fig. 16 et 17).



- (A) Désagrégation progressive, taraudage puis dislocation.
- (B) L'impact exploite des fissures préexistantes et provoque l'éclatement de l'agrégat
- (C) L'eau après chaque impact, enveloppe l'agrégat, comprimant l'air interne. La succession de compression et de détentes brutales entraîne l'effondrement de l'agrégat dont il reste (en 2) des fragments, du sable et de l'argile qui sont différentiellement déplacés par le ruissellement.
- (D) Agrégat détruit par imbibition et franchissement de la limite de liquidité. Processus favorisés par la présence de l'argile gonflante.
- (E) Sur une pente, les rejaillissements successifs déterminent une indiscutable progression des débris de l'amont vers l'aval.

Figure 16 : Action des précipitations



Figure 17: Croute de battance croutes formées sous l'action de la pluie.

- Vents ou orages violents : Provoquent la rupture des agrégats par action mécanique.
- Disparition des ciments organique : disparition des ciments organiques (polysaccharides) par une biodégradation très rapide (de ces ciments), un travail du sol excessif peut activer cette biodégradation.
- Tassement par instruments aratoires lourds sur sol cultivé ce qui provoque une baisse de porosité avec disparition des pores grossiers.

II.1.1.6. Entretien de la structure

Comme il a été cité précédemment, les composantes qui forment la structure sont « matériaux », « ciment » et « artisans »

Il semble difficile voire pratiquement impossible de modifier la texture Il est possible au besoin d'humus dans un champ. Une action trop brutale dans ce sens peut être toutefois néfaste. Elle doit donc se planifier à long terme et il est important d'en vérifier d'abord la pertinence.

D'autre part, le producteur agricole peut intervenir sur le processus de structuration du sol par le chaulage, en intensifiant l'enracinement et l'activité biologique ainsi que le travail mécanique, lorsque nécessaire.

- **Le chaulage**

La chaux joue deux rôles importants pour l'obtention d'une bonne structure du sol :

- Le calcium sert de lien entre les composantes du sol (argile, humus) pour former des agrégats plus au moins stables.
- La chaux permet de neutraliser l'acidité produite par les microorganismes et d'offrir par le fait même un environnement favorable à l'acidité biologique et aux racines.

Il est donc fondamental de bien évaluer les besoins en chaux des divers types du sol et de mettre en place une régie de chaulage adaptée.

- **La stimulation de l'activité biologique**

La présence d'une activité biologique intense est incontournable pour l'obtention et le maintien d'une structure du sol adéquate. Certaines pratiques la favorisent :

- Maintenir un sol aéré et drainé
- Maintenir des plantes en croissance.
- Nourrir les organismes du sol (apport de matière organique jeune).
- Chauler adéquatement.

- **L'intensification de l'enracinement**

Les racines ont un très fort pouvoir de structuration, elles agissent à plusieurs niveaux :

- Structuration en surface et en profondeur.
- Production du mucilage.
- Nourriture pour les micro et macroorganismes.

La diversification des cultures permet d'intégrer facilement des engrais verts dans la rotation soit en intercalaires ou en dérobés. Cette pratique s'avère un moyen efficace d'entretenir une bonne structure des sols sur la ferme. D'autre part, elle apporte de la

matière organique jeune, favorable à l'activité biologique. D'autre part, elle maintient une forte présence de racines dans le profil du sol. Finalement, le couvert végétal obtenu par la culture d'engrais vert protège le sol à l'automne.

- **L'intervention mécanique**

Le travail mécanique est parfois considéré à lui seul comme un facteur destructeur du sol, particulièrement lorsqu'il est effectué dans de mauvaises conditions. Toutefois, s'il est accompagné des pratiques de régie, cet impact négatif peut être limité.

Dans des champs difficiles, où la structure du sol est très mauvaise, un travail mécanique peut devenir indispensable pour briser les zones indurées et fournir l'aération nécessaire pour enclencher le processus de structuration. L'outil à privilégier dépend de la profondeur à laquelle il faut intervenir et de l'action recherchée. Si le problème se situe en profondeur, la sous-soleuse peut être un bon outil si elle est utilisée avec toutes les précautions qui s'imposent.

- Travailler à la bonne profondeur : Une évaluation sur le terrain permet avant toutes interventions, de déterminer la profondeur de la zone problème. Le sous-solage doit s'effectuer environ 10 cm dessous de cette zone.
- Travailler dans de bonnes conditions : Pour bien fissurer le sol, la sous-soleuse doit être passée en conditions sèches.
- Faire un test sur une partie de champ : Pour s'assurer que sous-soler est la bonne pratique pour un champ, il faut faire un test sur une parcelle avant de travailler l'ensemble du champ.

II.1.3. La porosité

II.1.3.1. Définition et types

Selon le degré d'humectation, les vides du sol sont occupés en majeure partie soit par l'eau, soit par l'air. Leur ensemble représente la porosité.

La porosité est le volume des vides exprimé en pourcentage du volume total divisé lui-même en deux parties : capacité en air et capacité en eau.

La porosité donne des indications essentielles sur les propriétés physiques, assurant à sa plante son alimentation eau et la respiration des racines.

Selon l'origine et la forme des pores, on distingue différents types (Fig. 18)

- **La porosité d'altération :** Les porosités d'altération sont celles qui se développent à l'intérieur et à la surface des minéraux des roches, par dissolution et transformation de ces minéraux. Ces porosités ne sont pas visibles à l'œil nu ni à la loupe sauf celles qui affectent les surfaces des graviers et des sables. Toutefois, elles sont observables au microscope.
- **Les porosités texturales :** Les porosités texturales sont celles qui subsistent entre les particules une fois que celles-ci sont au contact entre elles : on peut dire qu'il s'agit des vides qui résultent de l'entassement des particules.

La morphologie et le volume des vides de cette porosité sont fonction de :

- **La taille et morphologie des particules constitutives :** les vides qui séparent les particules argileuses sont très petits et ne sont visibles qu'au microscope alors que les vides d'un matériau sableux sont plus grossiers et partiellement visibles à l'œil nu.
- **La pression des contraintes qui s'exerce sur les matériaux.** Parmi ces contraintes deux sont importantes : le dessèchement qui provoque le rapprochement des particules souvent d'une manière irréversible (on parle de tassement hydrique)
- **L'activité biologique,** en effet, une racine qui pousse ou un animal qui se déplace à l'intérieur du sol, provoquent autour d'eux des contraintes qui rapprochent les particules entre elles : on parle de tassement biologique.
- **La porosité structurale :** dans l'arrangement précédent, et sous l'influence de facteurs externes - climatiques, biologiques, mécaniques - se développent des lacunes, des fissures qui accroissent le volume de l'espace poral textural ; cet accroissement est l'espace poral structural, à son tour divisé en espace poral lacunaire et espace poral fissural et les pores d'entassement des agrégats arrondis.

Les porosités structurales sont celles qui résultent de l'organisation des particules entre elles mais aussi de la structuration (formation d'agrégats).

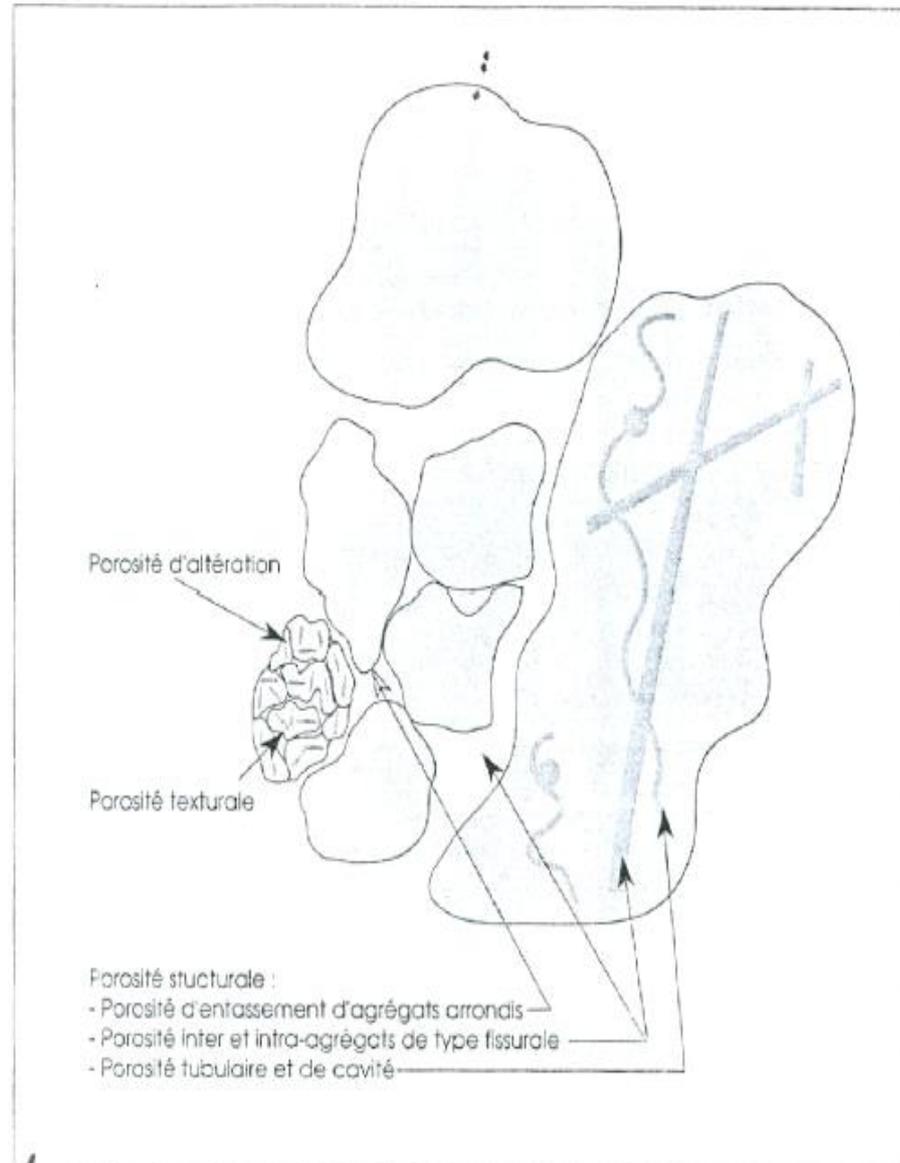


Figure 18: Origine des différents types de porosité.

Une autre approche de la porosité est associée à la dynamique de l'eau dans le sol :

- **La microporosité ou porosité capillaire** : correspond au volume des capillaires qui retiennent l'eau après ressuyage du sol

- **La macroporosité ou porosité non capillaire** : représente dans ces conditions le volume occupé par l'air. Ces deux grandeurs ne coïncident pas avec les porosités texturale et structurale.

La porosité totale est le premier facteur de fertilité des sols. Elle favorise l'enracinement, le stockage de l'eau pour la plante et la circulation de l'air nécessaire au bon fonctionnement des racines. Le travail du sol comme le labour, a pour principal but d'augmenter la porosité du sol. Cependant, au niveau de la profondeur maximum des labours, on assiste à un brusque abaissement de la porosité dû à un tassement par la pression qu'exerce les roues des tracteurs après plusieurs passages. Il constitue un horizon d'étranglement qu'on appelle semelle de labour. La présence de la semelle de labour, affecte la perméabilité et l'accumulation des réserves d'eau.

II.1.3.2. Détermination de la porosité

- **Sur le terrain**

La porosité s'observe à l'œil nu à la loupe. On peut alors distinguer trois catégories de vides :

- **Les vides inter-agrégats** : ce sont les fentes et les fissures qui séparent les agrégats. Ces vides sont liés aux types de structures : il s'agit, d'une porosité structurale.
- **Les vides intra-agrégats** : ils sont situés à l'intérieur des agrégats. Ils sont généralement de petites dimensions et ont pour origine des cavités et canalicules laissées par des radicelles ou des fissures entre micro-agrégats. Ce type de porosité comprend aussi les porosités texturales concernant l'entassement des sables et des graviers.
- **Les vides trans-agrégats** : ces vides sont généralement assez gros (plus de 2 mm de diamètre). Ce sont, par exemple des trous de galeries creusés par des animaux (ex : vers de terres) ou des chenaux creusés par des racines plus au moins grosses...

- **Au laboratoire**

Pour mesurer la porosité totale, on prélève sans tasser un volume connu de terre, que l'on pèse après dessiccation à 105°C. On en déduit la densité apparente du sol sec : D' . La densité réelle D des constituants solides du sol s'estime à 2,65

La porosité totale s'exprime par :

$$P (\text{porosité}) = \frac{(D - D')}{D} \times 100$$

La densité apparente ou la masse volumique apparente D' (sans unité dans la formule ci-dessus) est mesuré par le quotient m/V , m étant la masse du sol après dessiccation (en grammes) et V est le volume prélevé en cm^3 .

II.2. L'horizon pédologique

Grâce à la pédogenèse (formation et l'évolution des sols), Le sol apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées appelés « les horizons pédologiques » (Fig. 19). Ces derniers s'organisent et forment le profil pédologique. Il atteint finalement un état d'équilibre avec la végétation et le climat.

Les horizons sont donc, des couches horizontales. Ces couches est structurellement homogène et sont séparées entre elles par des limites plus aux moins nettes. Chaque horizon est formé d'un assemblage d'organisations élémentaires et forment le deuxième niveau d'organisation du sol. Chaque horizon est un volume caractérisé par son contenu (agrégats, vides, couleur, texture, structure, enracinement, matière organique...) et son contenant (limites, épaisseur, sont extension spatiale).

Les horizons sont donc des volumes considérés comme homogènes et dont l'organisation dans les trois dimensions verticales et latérales, permet de reconstituer le volume complet de la couverture pédologique.

Classiquement, les principaux horizons sont les suivants:

- Horizon A: horizon de surface à matière organique (débris de végétaux et humus) ;
- Horizons B: horizons intermédiaires apparaissant dans les sols évolués ;

- Horizon C: roche peu altérée.

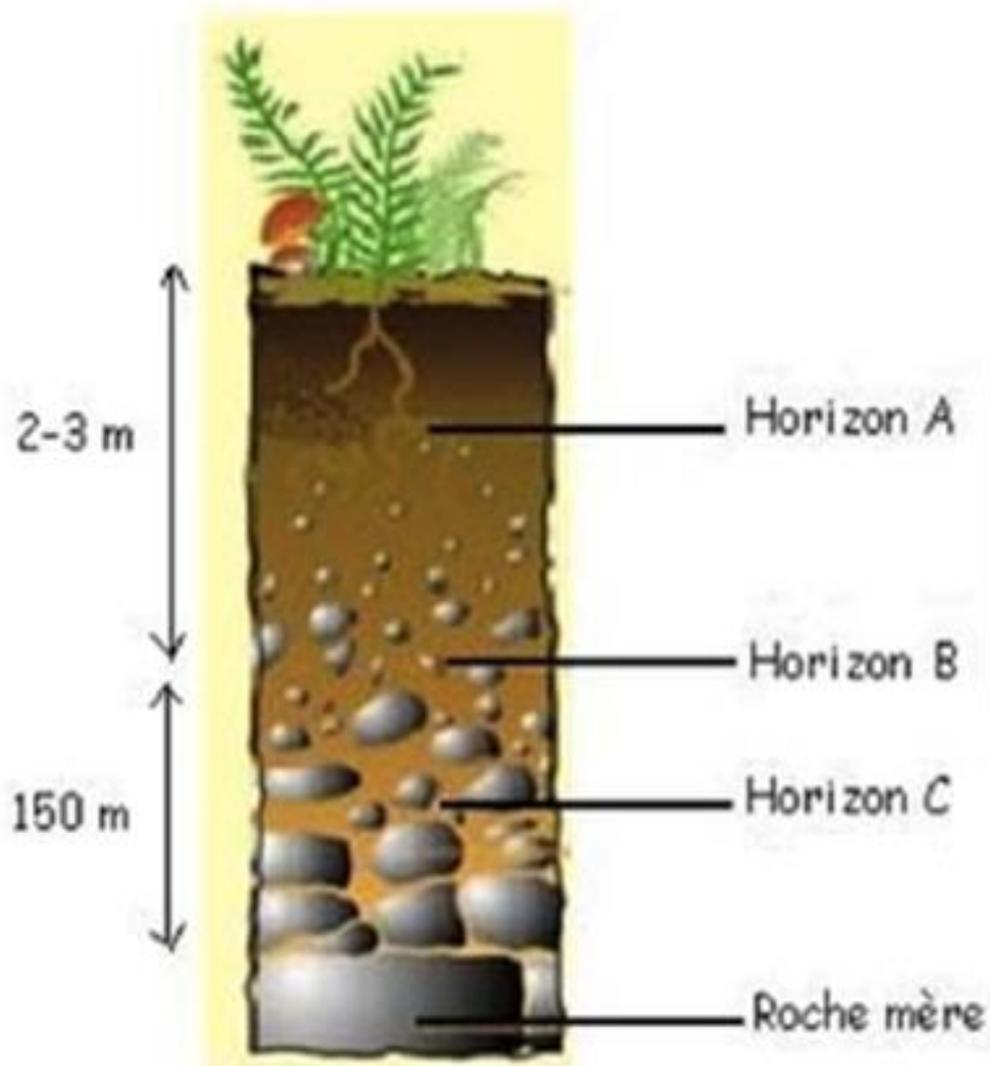


Figure 19 : Horizons pédologiques.

A l'échelle internationale, la désignation des principaux horizons est la suivante :

A : horizon de surface, contenant de la M.O., souvent appauvri.

(B) : B « structural » ou d'altération différent d'une part de la roche-mère par son degré d'altération plus fort (présence de Fe_2O_3 libre), d'autre part de l'horizon de surface A par sa structure différente.

B : horizon enrichi par illuviation en éléments fins ou amorphes : argile, oxydes de fer et d'aluminium, parfois humus.

C: matériau originel aux dépens duquel sont formés A et (B) ou B.

H : horizon organique tourbeux.

G : horizon de couleur gris verdâtre, riche en fer ferreux, à taches rouille, se formant au sein ou à la limite supérieure d'une nappe.

R : roche dure sous-jacente.

II.3. Le profil pédologique

Le profil d'un sol est l'ensemble des différentes couches (horizons) superposées que l'on observe sur une coupe verticale du sol depuis la surface jusqu'à la roche mère (Fig. 20 et 21).

Le profil est une coupe de sol suffisamment large et profonde pour laisser apparaître tous les horizons et leurs variations latérales. Son étude est une opération fondamentale à la base de nombreuses classifications et d'étude de sols.

L'étude d'un profil se base sur sa description sur terrain qui est complétée par des analyses au laboratoire.

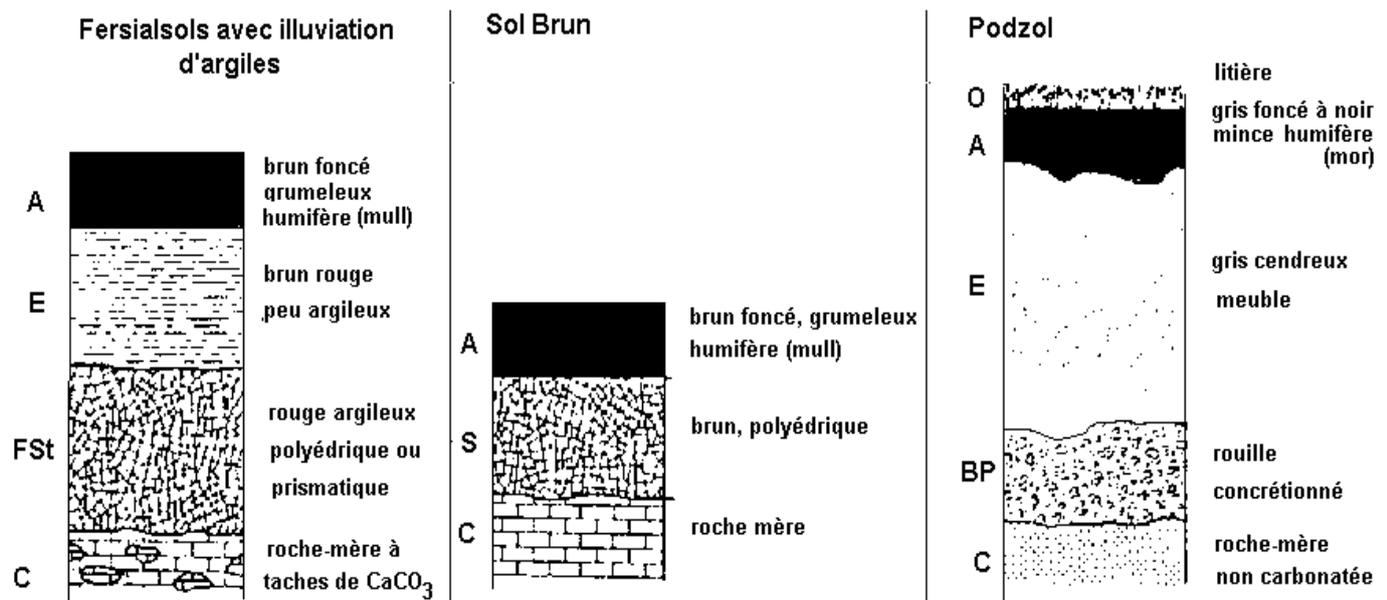


Figure 20 : Profils pédologiques représentant des horizons du sol.



Figure 21 : Photo d'un profil pédologique.

✚ Importance d'un profil pédologique

Le profil pédologique présente les divers avantages suivants :

- Permet de prendre très tôt des décisions par rapport au système de labour à pratiquer et les cultures qui peuvent être pratiquées.
- Constitue l'outil de base à prendre en compte dans le cadre du choix des spéculations et du système d'exploitation pour l'accroissement des rendements agricoles.
- Permet de prendre des décisions pour l'amélioration du niveau de fertilité des sols, l'accroissement des productions agricoles, la diversification des produits agricoles.
- Fait apparaître que le sol est constitué de strates successives de texture, structure et consistance, autrement dit de caractéristiques physico-chimiques différentes. Ce sont ces propriétés qui permettent au sol d'assurer ses fonctions plus au moins efficaces.

II.4. La couverture pédologique

Le sol est la partie meuble de la lithosphère qui constitue l'épiderme des terres émergées et il fait partie intégrante du paysage. Cette couche appelée *couverture pédologique* est organisée depuis l'échelle du continent ou de la région jusqu'à la maille élémentaire du minéral argileux.

Le terme « couverture pédologique » est utilisé pour évoquer l'aspect spatial et continu du sol.

La description de la couverture pédologique, de manière ponctuelle, au niveau de profils de sol, permet de distinguer les trois premiers niveaux d'organisation

- Le niveau des organisations élémentaires (volume associant les constituants).
- Le niveau des assemblages (d'organisations élémentaires).
- Le niveau des horizons (volumes pédologiques se décrivant en termes d'un ou plusieurs types d'assemblages et de leurs relations).

I.5. Le sol et l'eau

L'eau du sol a une importance considérable ; d'une part, elle intervient dans la nutrition des plantes, à la fois directement et indirectement, en tant que véhicule des éléments nutritifs dissous ; d'autre part, c'est un des principaux facteurs de la pédogenèse, qui conditionne la plupart des processus de formation du sol. Les sources principales de l'eau du sol sont d'une part l'eau des précipitations, et aussi dans certaines stations, l'eau sous terraine (nappes phréatiques permanentes alimentées souterrainement).

II.6. L'atmosphère du sol

Dans le sol, l'air occupe les pores abandonnés par l'eau lors de son retrait, d'abord les plus grossiers, puis les plus fins. Sa quantité dépend ainsi d'une combinaison entre la texture, la structure et le taux d'humidité.

La composition de l'air dans le sol présente des fluctuations saisonnières liées à l'activité biologique : la respiration des racines, de la microflore aérobie et de la faune

consomme de l'oxygène et rejette du gaz carbonique. La fixation d'azote et la dénitrification bactériennes modifient les concentrations en azote alors que du méthane peut être consommé ou produit.

Deux gaz jouent un rôle important dans les échanges gazeux qui règnent dans le sol :

- L'oxygène qui conditionne la respiration des racines et des organismes du sol et qui intervient aussi dans les réactions d'oxydation caractéristiques de la pédogenèse ;
- Le dioxyde de carbone CO_2 , produit de l'activité respiratoire, nécessaire aux organismes autotrophes pour leurs synthèses (bactéries nitrifiantes par exemple).

Ces deux gaz existent, soit à l'état libre au sein de l'atmosphère des sols, soit dissous dans les solutions du sol. Des échanges ont lieu constamment entre l'atmosphère terrestre, l'atmosphère du sol et les solutions du sol.

D'autres gaz sont présents dans le sol. La composition de l'air du sol et celle de l'atmosphère extérieure est présentée dans le tableau 5 :

Tableau 5 : Composition de l'air du sol et de l'atmosphère.

Constituants	Air du sol (%)	Atmosphère extérieure
Oxygène	18 à 20,5 en sol bien aéré 10 après une pluie 2 en structure compacte 0 dans les horizons réduits	21
Azote	78,5 à 80	78
Gaz carbonique	0,2 à 3,5 5 à 10 dans la rhizosphère	0,03
Vapeur d'eau	Généralement saturé	Variable
Gaz divers	Traces de H_2 , N_2O , Ar, NH_3 , H_2S , CH_4	Surtout Ar, autres en traces

II.7. La température du sol

Le soleil est une source de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est une forme d'énergie qui se propage sous forme d'ondes (ondes électromagnétiques) et elle est composée de particules (sans masse) que l'on appelle les photons. Le sol (ou tout autre objet) peut absorber une partie, en transmettre une autre, et en réfléchir une autre (Fig. 22), ce qui est déterminant sur ses propriétés thermiques.

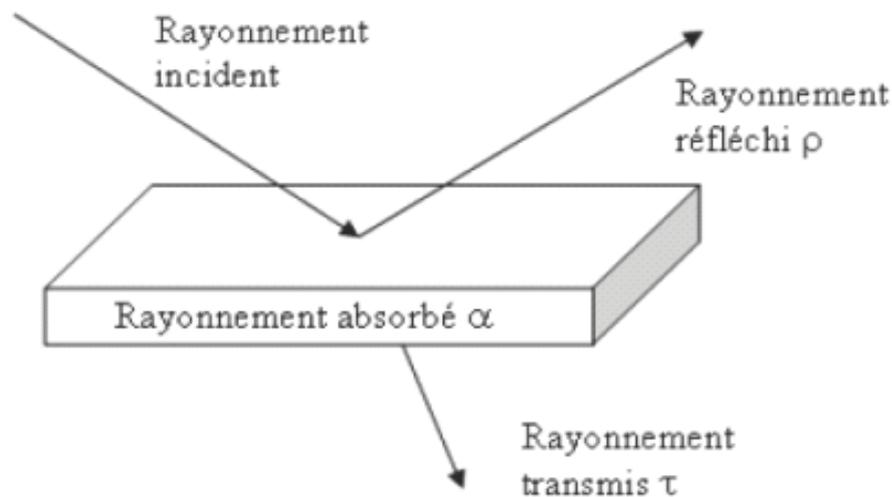


Figure 22: Absorption, réflexion et transmission du rayonnement par le sol.

+ Importance

- Les propriétés thermiques des sols agissent directement sur les activités biologiques. En fonction de la température du sol, telle ou telle espèce microbienne voit son activité dominer ou au contraire être dominée par celle des autres.
- Avec l'humidité, la température influence également le développement de la faune du sol et particulièrement sur la germination et la croissance des plantes. La croissance des racines, l'intensité de l'absorption des éléments fertilisants, les besoins en oxygène, les conditions d'asphyxie sont également fonction de la température.

- Enfin, les phénomènes chimiques et physiques sont également sous la dépendance de la température, tels que la solubilité des sels ou le gel du sol qui agit sur la structure.

I.8. La couleur du sol

La couleur des sols est le caractère morphologique le plus accessible à l'œil nu. Elle constitue un indice important dans la connaissance de l'appartenance du sol, de sa fertilité et de son évolution. C'est la raison pour laquelle beaucoup de sols ont reçu leur nom d'après leur couleur : les sols rouges, la terre blanche...

En général les couleurs vives notamment les rouges et orangés indiquent une bonne aération et un bon drainage du sol. Les couleurs ternes et grises indiquent la perte d'aération, tendance à s'appauvrir en oxygène et l'engorgement (saturation en eau). Les couleurs foncés traduisent la richesse en matière organique.

- **Facteurs influençant la couleur du sol**

La couleur du sol est influencée par les processus qui s'y déroulent. Par conséquent, la description de la couleur nous permet de tirer certaines conclusions quant à ces processus. Cela dit, de nombreux autres facteurs influencent aussi la couleur du sol :

- Présence de matière organique : les horizons du sol contenant plus de matière organique paraissent plus foncés que ceux qui en contiennent peu ou pas.
- Coloration des minéraux : la chaux dans le sol apparaît blanchâtre ; le quartz, par ex., est blanc pur ; les minéraux ferreux rendent l'horizon jaunâtre, brunâtre ou rougeâtre (ou bleuâtre/verdâtre si le sol contient peu ou pas d'oxygène).
- Humidité du sol : plus le sol est humide, plus il apparaît sombre et plus la couleur est intense.
- Taille des grains : certains minéraux changent de couleur en fonction de la granulométrie.

-

- **Comment indiquer la couleur d'un sol ?**

La couleur des sols peut être très variable au sein d'une même zone. Il arrive souvent qu'on rencontre, sur une faible étendue plusieurs couleurs.

Pour indiquer la couleur d'un sol :

- Prendre un morceau de sol de l'horizon à décrire. Le casser pour rafraichir une face.
- Si le sol est sec, humidifier la face avec de l'eau goutte par goutte.
- Attendre que l'eau s'infilte dans le sol
- Nommer la couleur (par exemple rouge, marron, gris, noir, blanc
- Si disponible comparez le sol une planche témoin tel que le *Munsell Soil Color* (Fig. 23). Noter la gamme ou la couleur (*hue*), valeur ou degré de luminosité (*value*) et intensité (*chroma*)

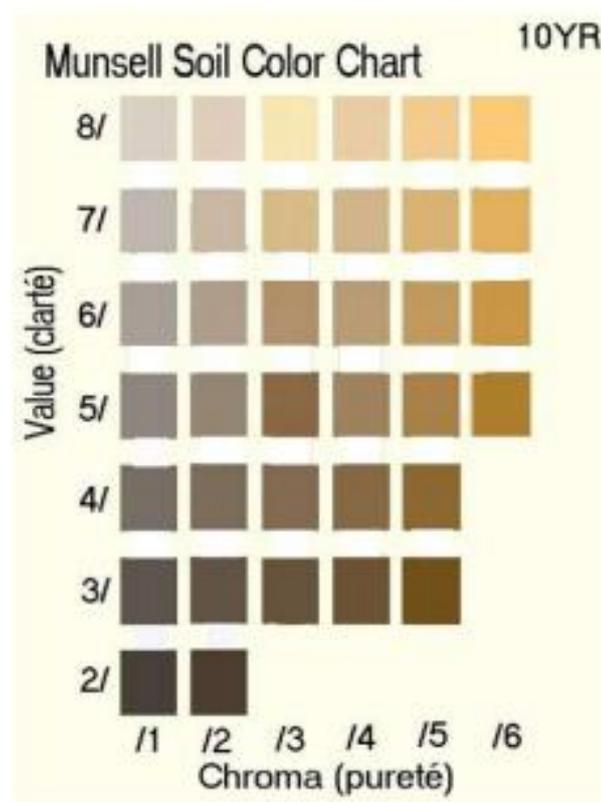


Figure 23 : Planche *Munsell Soil Color* 10YR.

Chapitre III

Les propriétés chimiques du sol

Les propriétés chimiques du sol jouent un rôle prépondérant dans la production agricole, la protection de la sécurité alimentaire et la biodiversité. En effet, à partir de ses propriétés chimiques, il devient possible d'évaluer dans quelle mesure un sol peut subvenir non seulement aux besoins des plantes, mais aussi à tous les autres organismes.

III.1. Les phénomènes d'échanges des ions

III.1.1. Complexe d'échange (complexe adsorbant des sols)

Le complexe d'échange c'est l'ensemble des colloïdes dotés de charges négatives susceptibles de retenir les cations sous la forme dite échangeable, c'est-à-dire pouvant être remplacés par d'autres cations, dans certaines conditions précises.

La fraction colloïdale du sol comprend la fraction du sol constituée des petites particules inorganiques et organiques (<0,002 mm) (Brady et Weil, 2010). La plupart de ces particules sont dotées d'une grande surface spécifique (par rapport à leur taille) et sont porteuses d'une charge négative. Ces deux caractéristiques confèrent au sol d'importantes capacités, telles que celle de gonfler, de retenir l'eau et de la faire circuler, d'adsorber des cations et des anions et d'échanger des ions.

III.1.2. Définition de la solution du sol

On appelle communément « solution de sol » l'eau et les solutés dissous qu'un sol contient. La solution de sol en est l'élément moteur. En effet, la solution de sol sert à la fois de milieu où se produisent les réactions chimiques des diverses substances présentes dans le sol et de voie de circulation de ces substances. Quelques exemples de réactions chimiques comptent les réactions de précipitation/dissolution des minéraux, les échanges d'ions, les réactions d'oxydoréduction, l'absorption des éléments nutritifs par les plantes, etc.

L'importance de la présence d'eau dans le sol est telle que s'il n'y en avait pas, le peu de réactions chimiques et biologiques qui s'y produiraient serait insuffisant pour assurer la vie sur terre.

III.1.3. Echange entre le complexe adsorbant et la solution du sol

Les ions échangeables du complexe argilo-humique 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 dans la 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.

Exemple d'un phénomène d'échange :

Apport d'un engrais potassique dans un sol à complexe saturé d'ions Ca^{2+} :



K remplace Ca dans le complexe, alors que Ca passe en solution (2 atomes de K remplacent un atome de Ca ce qui signifie que l'échange se fait entre équivalents).

III.1.3.1. Echange des cations

Il existe dans le complexe adsorbant deux catégories d'ions retenus :

- **Les générateurs d'acidité** : H^+ et Al^{3+}
- **Les ions dits « basiques » (bases échangeables)** : Ce sont les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ (et accessoirement NH_4^+) qui élèvent le pH du sol. Lorsque le l'ensemble du complexe adsorbant est « saturé » par ces ions, le milieu est neutre ou même légèrement alcalin.

A/ Les valeurs caractéristiques du complexe adsorbant

- **Capacité d'échange des cations T ou CEC**

La capacité d'échange en cations d'un sol correspond à la quantité totale de cations que le sol est capable de stocker et de restituer dans des conditions de pH bien définies. La CEC résulte des charges électriques négatives situées à la surface des argiles et des matières organiques.

C'est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber pour 100g de matière sèche.

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

- *Remarque : la valence est le nombre de charges électriques positives ou négatives qui sont produites par la dissolution du composé*

Exemple : 1eq de Ca^{++} = $40/2=20\text{g}$

$$1\text{meq de } \text{Ca}^{++} = \text{eq}/1000 = 20/1000 = 0,02\text{g}$$

Donc : Un sol qui a une CEC de 20 meq pourrait retenir: en Ca^{++} : $20 \times \text{meq de } \text{Ca}^{++} = 20 \times 0,02 = 0,4 \text{ g}/100\text{g du sol} = 400 \text{ mg}/100\text{g du sol}$

- **Somme des bases échangeables (S)**: somme des quantités de cations basiques échangeables, fixés sur le complexe à un moment donné. Il s'agit de la somme des quantités de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ (l'ion NH_4^+ peut être présent aussi, mais étant minoritaire, il n'est pas pris en compte. T-S représente l'acidité totale ou « potentielle » : Al^{3+} et H^+).

Donc : **$\text{CEC} = \text{S} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$**

- **Taux de saturation en « bases »**

C'est le rapport **$V = \text{S}/\text{T}\%$ ($\text{S}/\text{CEC}\%$)**. On dit d'un sol que son complexe adsorbant est saturé quand $V=100\%$. Ceci signifie qu'il ne contient aucun ion acide (H^+ et Al^{3+}) et donc le pH est basique (cas des sols à fortes réserves calciques). Dans la pratique, on admet qu'un sol se comporte en sol saturé lorsque S/T ne descend pas de 85 à 90%.

Le taux de saturation du complexe absorbant 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...

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
- La fréquence et de l'importance des apports de cations (surtout Ca lors des amendements calcaires...).
- 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 %

B/Principaux facteurs réglant l'intensité des phénomènes d'échange des cations

- **La nature des colloïdes**

Exemples : la capacité de sorption de quelques colloïdes négatifs à pH 7

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

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.

- **La nature des ions**

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

1. les ions H^+
2. les cations métalliques, parmi lesquels :

certains sont fixés en quantité importante : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+

d'autres en quantité généralement plus limitée :

l'ion ammonium NH_4^+

les oligo-éléments : Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , ...

le fer Fe^{2+} ou Fe^{3+}

l'aluminium Al^{3+}

L'intensité avec laquelle ces ions sont retenus est en général comme suit :

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

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

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

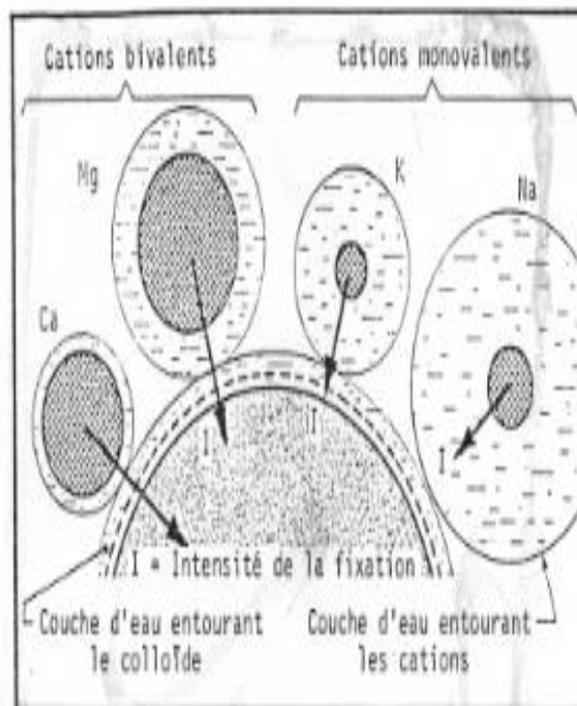
Mais cet ordre de préférence (cation à égale concentration dans la solution du sol) est différent pour chaque type d'argile et pour l'humus.

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	$Na < K < Mg < Ca < Ba$

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 (Fig. 24)

- **La valence des cations** : Les ions bivalents Ca^{2+} et Mg^{2+} sont plus énergiquement retenus que les ions monovalents K^+ , Na^+ ,...
- **L'hydratation des ions** : A valence égale, les ions faiblement hydratés (Mg^{2+} et surtout Ca^{2+}), c'est à dire entourés d'une faible couche d'eau sont mieux fixés que les ions fortement hydratés (K^+ et Na^+) (Fig. 24).



L'INTENSITÉ DE FIXATION DES CATIONS dépend de leur valence et de leur hydratation.

- Les ions bivalents, Ca et Mg, sont plus énergiquement fixés que les monovalents.
- Plus les cations sont entourés d'une couche d'eau importante, moins ils peuvent s'approcher des colloïdes. Pour cette raison, le sodium, bien qu'étant un ion flocculant, assure la flocculation la moins stable.

Figure 24 : La fixation des cations : valence et degré d'hydratation.

- **L'équilibre solution du sol-complexe adsorbant**

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.

Toute intervention sur la solution du sol se répercute au niveau du complexe adsorbant et inversement :

- La pluie dilue la solution du sol, le complexe adsorbant s'appauvrit en cations.
- Les plantes prélèvent du calcium Ca^{2+} et du magnésium Mg^{2+} : selon la quantité de ces prélèvements, il y'a désorption de ces cations.
- L'altération des roches libère des cations qui enrichissent la solution du sol puis le complexe adsorbant.

III.1.3.2. Echange des anions

Dans les eaux de drainage, on trouve beaucoup d'anions NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} ,...

Apparemment donc, ces ions ne sont pas retenus par le pouvoir adsorbant du sol. Cependant, les anions PO_4^{3-} sont très bien retenus et même d'autres anions peuvent être fixés, et leur énergie de fixation serait la suivante, par ordre décroissant : PO_4^{3-} (phosphate) SO_4^{2-} (sulphate) NO_3^- (nitrates) Cl^- (chlorure)

Plusieurs mécanismes expliquent cette fixation (Fig. 25) :

- Fixation sur les hydroxydes de fer et d'aluminium, colloïdes positifs liés à l'argile, en échange contre des ions OH^-
- Fixation sur quelques valences positives des argiles, en échange contre des ions OH^- , ou sur des liaisons de bordure (Al^{+++}).
- Fixation sur l'argile ou l'humus par l'intermédiaire d'ions Ca^{++} (ponts calciques).

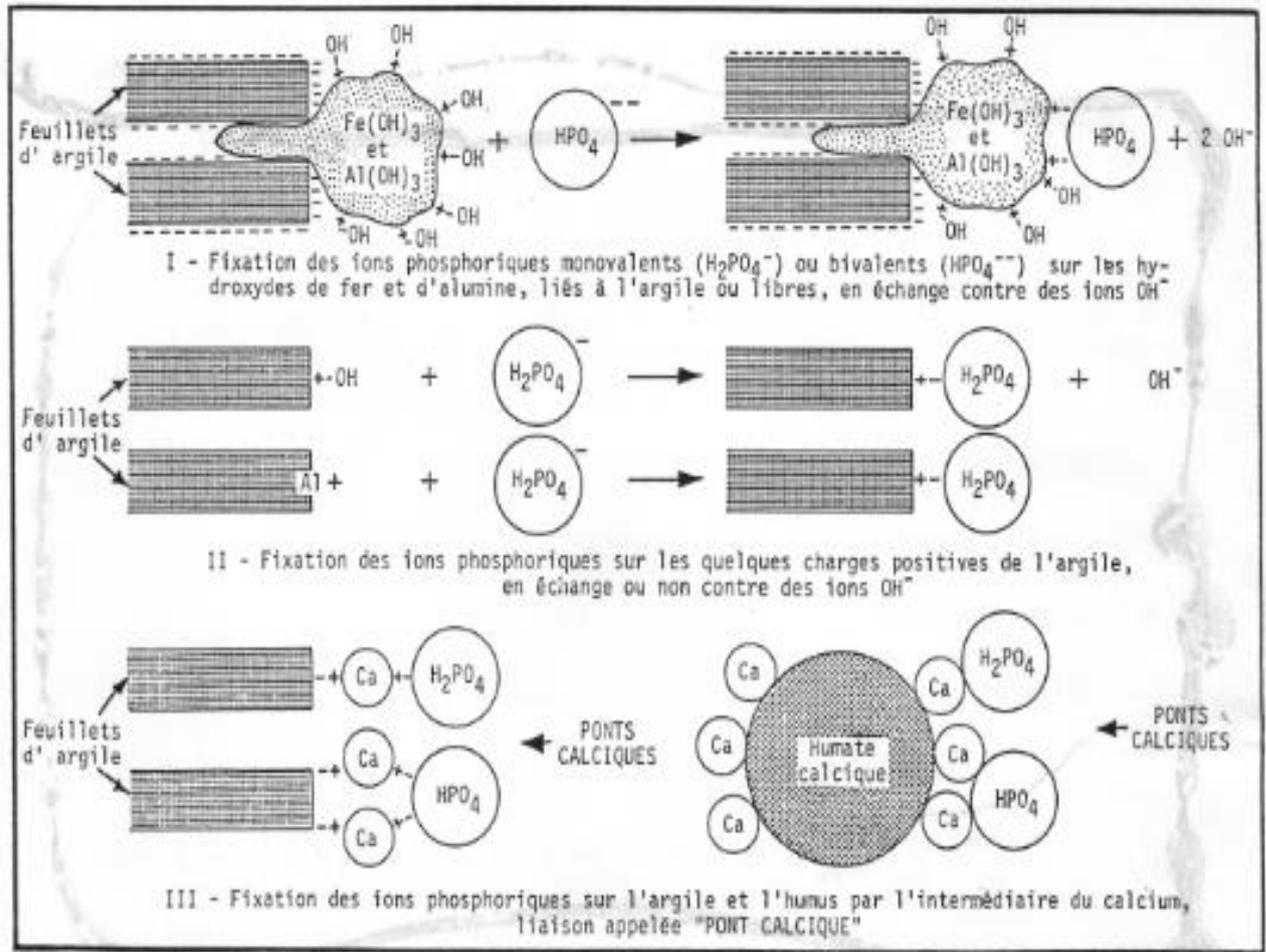


Figure25 : Les modes de fixation des anions.

III.1.4. Importance du complexe adsorbant du sol

Le complexe adsorbant, par son pouvoir adsorbant, met en réserve les éléments nutritifs qui, sans lui, seraient perdus par lessivage, libère ces éléments pour les racines, en les échangeant notamment contre les ions H^+ Formés continuellement par l'activité biologique (microbes et racines) élaborant de l'acide carbonique (H_2CO_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 Al^{+++} et en H^+ , ions responsables de l'acidité des sols.

III.2. L'acidité du sol et le pH du sol

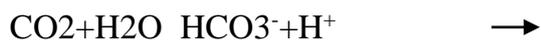
III.2.1. Définition

L'acidité du sol est définie par la concentration en ions H^+ considérés en un moment donné, sur un sol déterminé, les ions H^+ se répartissent en deux catégories :

- a) les ions H^+ présents dans la solution du sol
- b) les ions H^+ fixés sur les colloïdes à l'état échangeable

III.2.2. Les sources de production d'ions H^+

- a) les atomes d'hydrogènes appartenant à des acides organiques et pouvant être libérés.
- b) ions H^+ issus de la réaction entre CO_2 produit par la faune du sol, la respiration des racines, la décomposition des matières organiques, avec les molécules d'eau :



- c) les ions H^+ résultant de la fixation de molécules d'eau sur certains ions comme Al^{+++}

III.2.3. Les différentes expressions de l'acidité

On distingue :

- a) **L'acidité actuelle (=acidité active)** : Cette valeur est un reflet approximatif de la quantité d'ions H^+ libres se trouvant dans la solution du sol
- b) **L'acidité potentielle** : Cette valeur exprime la somme des ions H^+ fixés sur le complexe adsorbant (beaucoup plus abondants que les H^+ libres dans la solution du sol), qui constituent une « Réserve » actuellement non disponible L'acidité totale du sol est composée de l'acidité potentielle et de l'acidité actuelle.

Le pH exprime l'acidité actuelle : C'est le cologarithme de la concentration en ions H^+ de la solution du sol :

$$pH = 1/\text{Log} [H^+]$$

III.2.4. Le pouvoir tampon des sols et les variations de leurs pH

✓ **Les variations de pH dépendent :**

- des variations saisonnières (en général pH augmente en hiver par rapport à l'été)
- de l'état hydrique du sol
- de la température du sol
- de la présence ou non d'une culture
- des amendements apportés au sol (apport d'engrais calciques diminuent l'acidité d'un sol).
- de l'activité biologique (les microorganismes et racines) production d'acides organiques et de CO₂ lors de la respiration ou de l'humification.
- du pouvoir tampon de sol
- **Le pouvoir tampon : aptitude des sols à s'opposer aux variations de pH**

Lorsque l'on ajoute à de l'eau pure des quantités croissantes d'un acide ou d'une base, on constate que le pH varie brusquement, passant par exemple, pour une seule goutte d'acide, de pH 7 à pH 3, ou pour une seule goutte de base, de pH 7 à pH 11. La même expérience réalisée avec un échantillon de terre montre que les variations sont beaucoup plus progressives, et d'autant plus qu'il est argileux et humifère. On dit que le sol a un pouvoir tampon, qui le rend apte à résister aux variations de pH. Ce pouvoir est lié à la présence des colloïdes.

Il peut s'expliquer comme suit:

- Si la quantité d'ions H⁺ augmente dans la solution, une partie de ces ions se fixe sur le complexe, en échange par exemple de Ca⁺⁺. L'acidité active et l'acidité potentielle ont d'autant moins varié que le complexe est important, donc que le sol est plus argileux ou humifère.
- Si les ions H⁺ en solution diminuent, neutralisés par les ions OH⁻ apportés par exemple par la chaux, ils sont remplacés par des ions H⁺ du complexe dont la place est prise par les Ca⁺⁺ de la chaux : l'acidité active, comme l'acidité potentielle, ont baissé, mais d'autant moins que le sol est plus argileux ou humifère

Le pouvoir tampon d'un sol c'est à dire sa résistance aux variations brutales du pH dépendent étroitement de l'importance de son complexe adsorbant. Un sol argileux riche en montmorillonite est très tamponné. Son pH n'évolue que très lentement, au contraire, un sol sableux, dont la capacité d'échange est très faible, est peu tamponné. Son pH varie très vite en fonction des facteurs externes.

III.2.5. Caractérisation du pH du sol

On présente les valeurs de pH sur une échelle standard qui varie de 0 à 14. Le pH 7 exprime la concentration des ions d'hydrogène d'une solution neutre, donc ni acide ni basique.

- Le pH de l'eau pure est de 7.
- Les valeurs de pH inférieures à 7 correspondent à l'acidité, qui vont croissantes jusqu'à la valeur maximale de 0.
- Les valeurs de pH supérieures à 7 correspondent à l'alcalinité qui vont croissantes jusqu'à la valeur maximale de 14.

L'échelle de valeurs du pH est logarithmique, ce qui signifie, par exemple, qu'un sol de pH 4 à 10 fois plus d'ions hydrogène en solution qu'un sol de pH 5 et 100 fois plus qu'un sol de pH 6 et ainsi de suite. Par exemple, un sol à pH 6 a dix fois plus d'ions hydrogène en solution qu'un sol à pH 7, et un sol à pH 8 a dix fois moins d'ions hydrogène qu'un sol à pH 7.

La Figure 26 présente l'échelle standard du pH ainsi que quelques exemples de pH de sols et de produits communs.

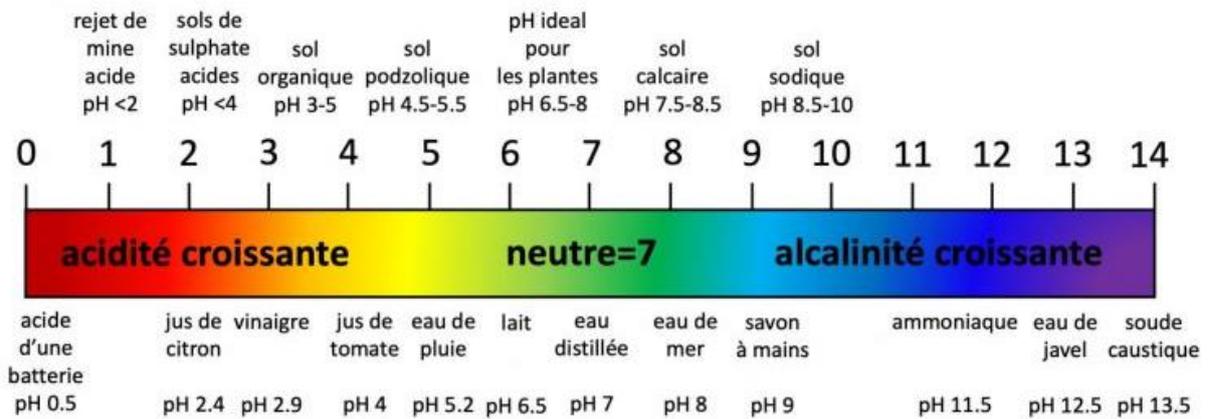


Figure 26 : Échelle standard de pH accompagnée de valeurs de pH de sols et de produits communs. Adapté de Brady et Weil (2010). Adapté par Lewis Fausak et sous licence [CC BY \(Attribution\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Chapitre IV

Les propriétés biologiques

IV.1. Diversité des êtres vivants du sol

Les êtres vivants dans le sol sont des bactéries, des champignons, des algues, les parties souterraines des plantes ainsi que des animaux très variés, des protozoaires aux mammifères (Fig. 27). Tous participent d'une manière ou d'une autre à la formation et à l'évolution du sol en particulier de sa fraction organique. Leur nombre et leur biomasse dans le sol sont très importants.

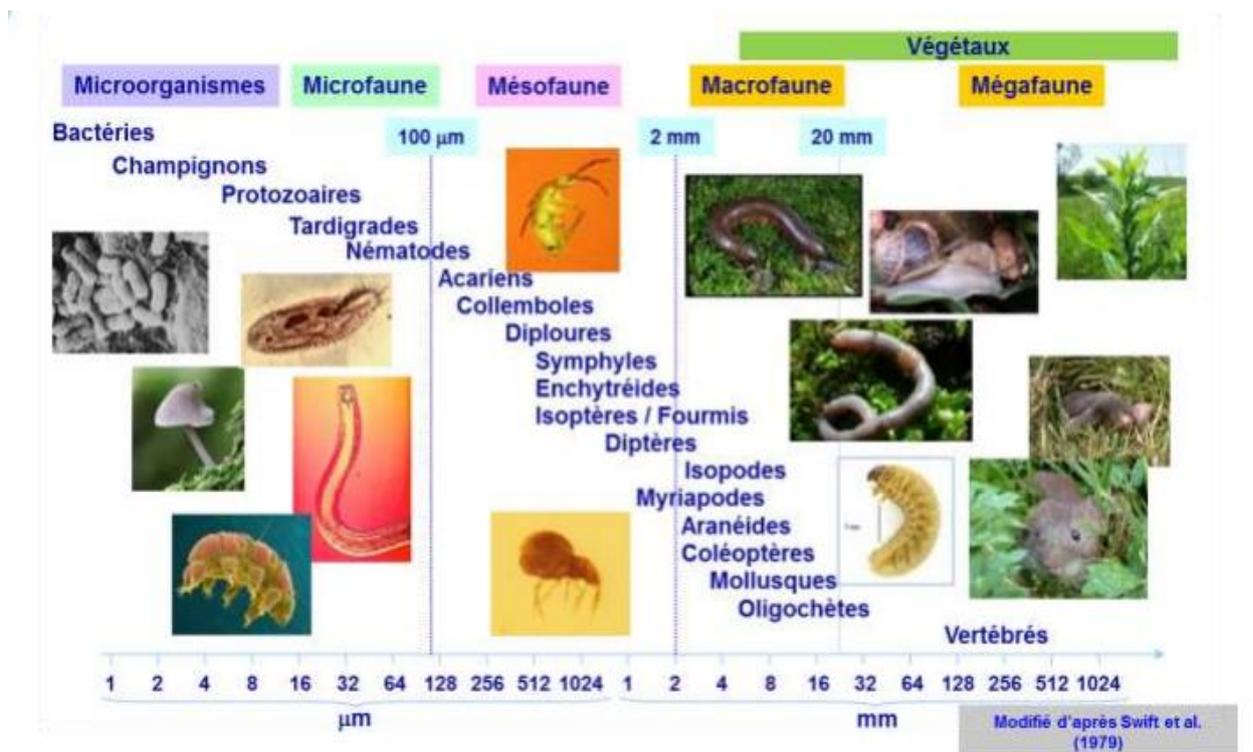


Figure 27 : Diversité des êtres vivants du sol.

IV.2. La flore

IV.2.1. La microflore

Trois groupes ont été reconnus dans le sol : les **bactéries**, les **champignons**, les **algues** microscopiques.

IV.2.1.1. Les algues du sol

Les algues microscopiques, unicellulaires ou en colonies filamenteuses, sont souvent abondantes dans le sol, mais restent localisées à sa surface ou dans de larges fissures.

Trois groupes taxonomiques sont représentés :

- **Les algues vertes (Chlorophycées):** *Chlamydomonas*, *Chlorella* et *Pleurococcus*.
- **Les algues jaunes-vertes (Xanthophycées):** *Heterococcus*, *Vaucheria*.
- **Les Diatomées (Bacillariophycées) :** *Achnanthes*, *Navicula*, *Pinnularia*.

La figure 28 présente quelques genres d'algues vertes identifiés dans un échantillon du sol.

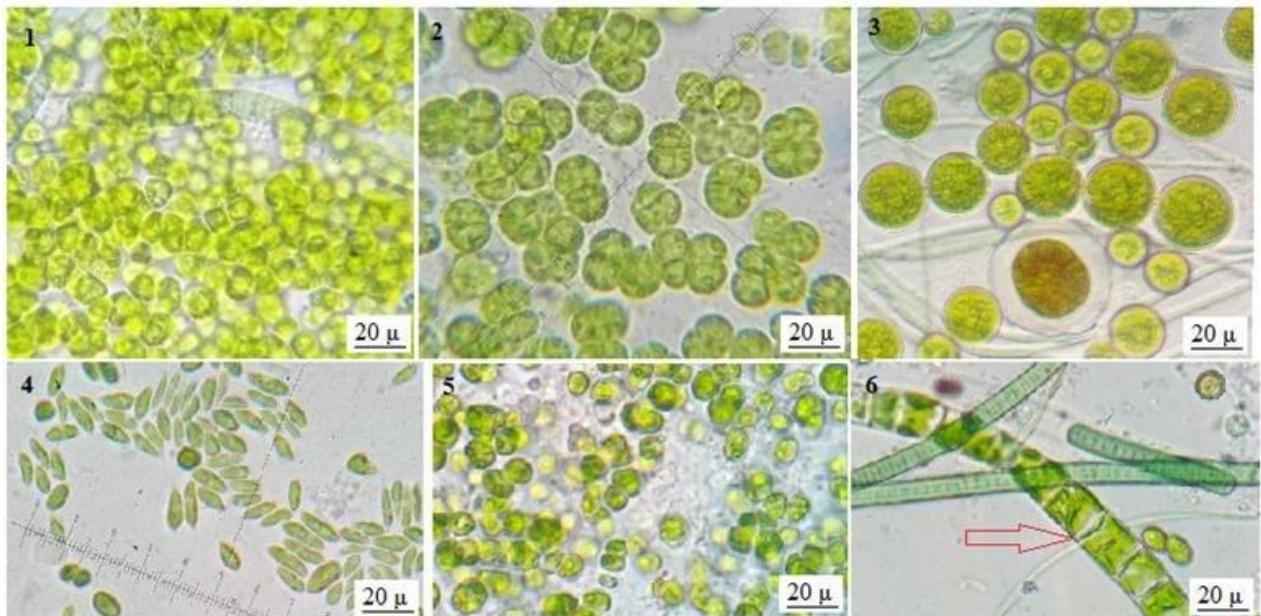


Figure 28 : Algues vertes.

➤ **Abondance des algues dans le sol**

- Selon les sols, la biomasse algale est comprise entre 10 et 1000 kg/ha.
- On a compté 100 à 10⁹ individus/ g de terre.

➤ **Rôle des algues dans le sol**

Les algues jouent un rôle crucial dans le sol. Leur capacité à fixer l'azote, améliorer la structure du sol et contribuer au cycle des nutriments...etc, fait d'elles des éléments essentiels pour la fertilité des sols :

- Grâce à leur activité photosynthétique, les algues colonisent rapidement les surfaces minérales brutes, dont elles accélèrent l'altération par des substances dissolvantes. Donc, elles contribuent à la formation du gravier et de sable.
- Elles produisent des polysaccharides extracellulaires qui agrègent (associent) les particules solides et renforcent la cohésion donc, elles contribuent à l'amélioration de la structure du sol.
- Les algues fixent le sol, freinent l'érosion.
- Les algues pourraient prélever les aliments au dépend des végétaux mais il semblerait que leur effet est bénéfique dans ce sens puisqu'elles limitent le lessivage des éléments solubles ; c'est le cas par exemple du phosphore qui est ensuite facilement libéré à la mort des algues.
- Les algues contribuent au recyclage des nutriments dans le sol, en particulier du carbone et de l'azote, ce qui est bénéfique à la santé du sol et des plantes.
- Les algues contribuent à la fixation de l'azote : Les cyanobactéries et certaines algues bleues sont capables de fixer l'azote atmosphérique, enrichissant le sol en azote.
- Les algues modifient le régime hydrique du sol en réduisant l'évaporation et favorisant le ruissellement.

IV.2.1.2 Les champignons du sol

La plupart des champignons du sol ont un appareil végétatif formé de filaments ramifiés (hyphes), le mycélium. L'extension du mycélium d'un individu fongique est souvent considérable, jusqu'à plusieurs mètres. Dans 1m² du sol fertile, le réseau

mycélien peut atteindre 10 000 km de longueur totale. La biomasse moyenne des champignons dans un sol peut atteindre 3500 kg par hectare.

Les champignons sont tous hétérotrophes, c'est-à-dire qu'ils utilisent des aliments organiques comme source de carbone.

➤ **Exemples de champignons du sol**

Les champignons du sol peuvent être des champignons supérieurs (basidiomycètes et ascomycètes), des levures ou des champignons inférieurs, souvent regroupés sous le vocable de moisissures (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Mucor*, etc.).

➤ **Fonctions dans le sol**

- Grace à leur mycélium (Fig. 29), ils peuvent transporter des quantités élevées d'eau et de substances nutritives d'un endroit à l'autre du sol, sur une distance de plusieurs mètres. La translocation (déplacement actif : des aliments organiques sert à formation des fructifications).



Figure 29 : Mycélium de champignon dans le sol.

- Etablissent des relations symbiotiques avec des racines de plantes supérieures (mycorhizes) qui ont un rôle complexe dans les échanges nutritifs entre la plante et le milieu. Tandis que la plante fournit au champignon les sucres élaborés lors de la photosynthèse, ce dernier lui offre en échange des éléments nutritifs, comme l'azote (N) et le phosphore (P), qu'il a prélevés dans de minuscules espaces poreux du sol, à l'aide de ses hyphes fins (Fig. 30, 31 et 32).



Figure 30 : Racine mycorhizée.

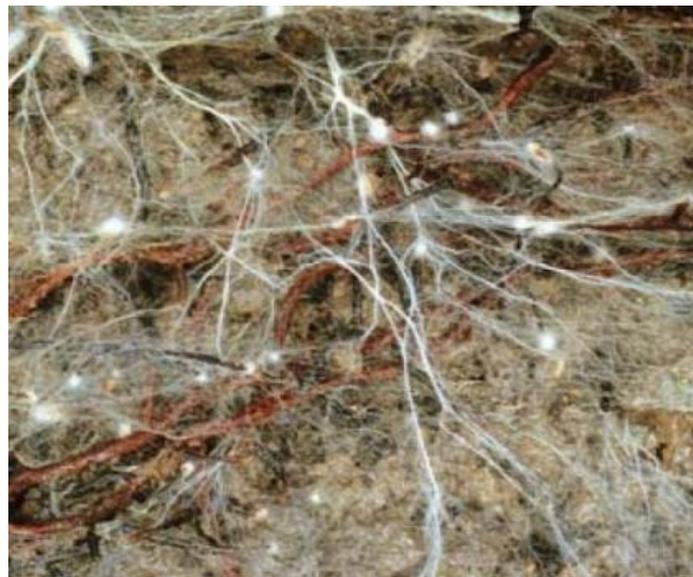


Figure 31 : Les hyphes d'un champignon mycorhizien dans le sol.

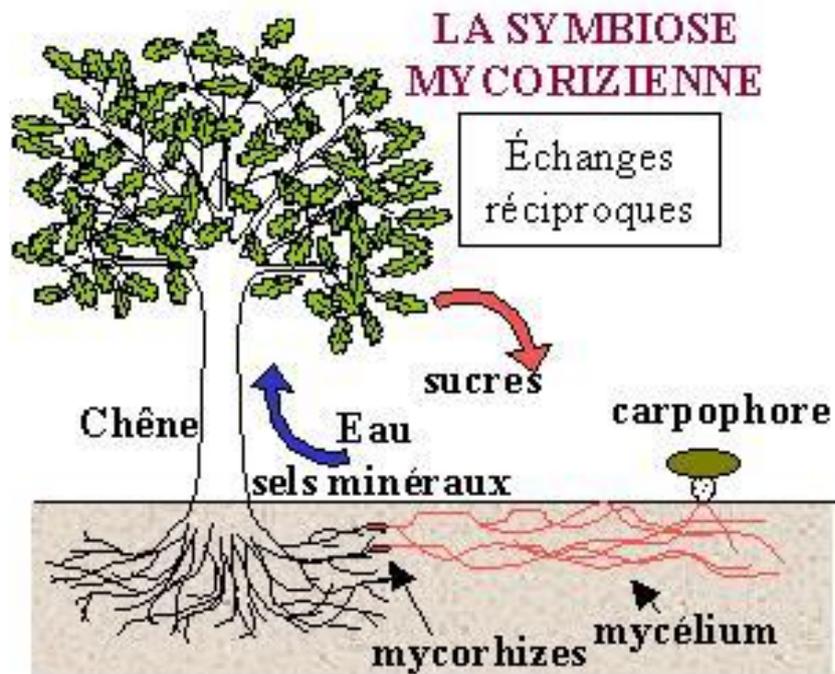


Figure 32 : Symbiose des champignons avec des racines de plantes supérieures

- Par leur structure ramifiée, les mycéliums augmentent la cohésion des particules dans des couches superficielles du sol (Fig.33)

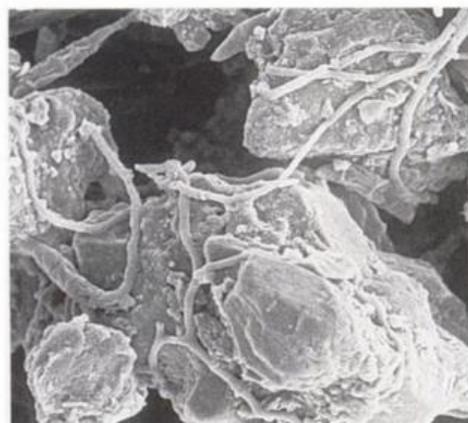


Figure 33 : Réseau de filaments mycéliens réunissant des particules minérales et organiques.

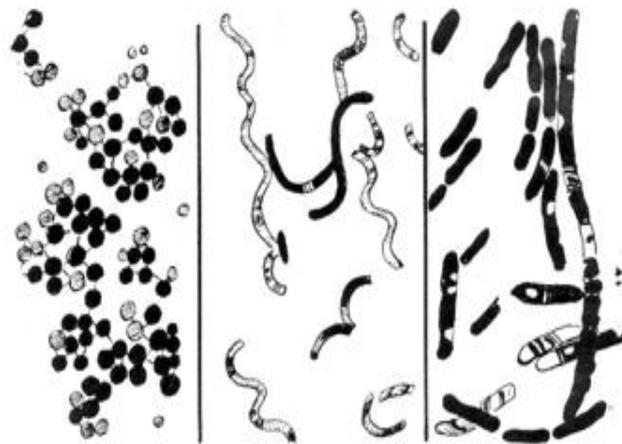
- Les champignons participent à la dégradation de la litière et à sa transformation progressive en humus. Ils exercent surtout dans la phase de décomposition de la M.O.F., qui précède l'humification : la plupart sont aptes à décomposer la cellulose, certains sont capables de décomposer des composés phénoliques plus résistants tels que la lignine et les tannins.

IV.2.1.3. Les bactéries du sol

- **Morphologie :** Le terme bactérie regroupe les organismes unicellulaires à organisation de type procaryote. Leur taille est proche de micromètre, plus petite que celle d'eucaryote.

Les bactéries ont des formes différentes (Fig. 34)

- La plupart ont la forme de bâtonnets ou de petites sphères, certaines sont incurvées ou spiralées.
- Certaines bactéries se déplacent au moyen de flagelles. D'autres, les Mycobactéries, fréquentes dans les sols et dans la litière, se meuvent en rampant à la surface des corps solides.
- Les bactéries ont un comportement « social », se déplacent en « essaim » à la recherche de la nourriture (d'autres bactéries ou des champignons).



*Les bactéries peuvent présenter différentes formes:
1 - des formes sphériques (coques),
2 - des formes plus ou moins spiralées,
3 - des formes allongées ou en bâtonnets (bacilles).*

Figure 34: Les différentes formes de bactéries

La figure 35 montre des bactéries du sol.

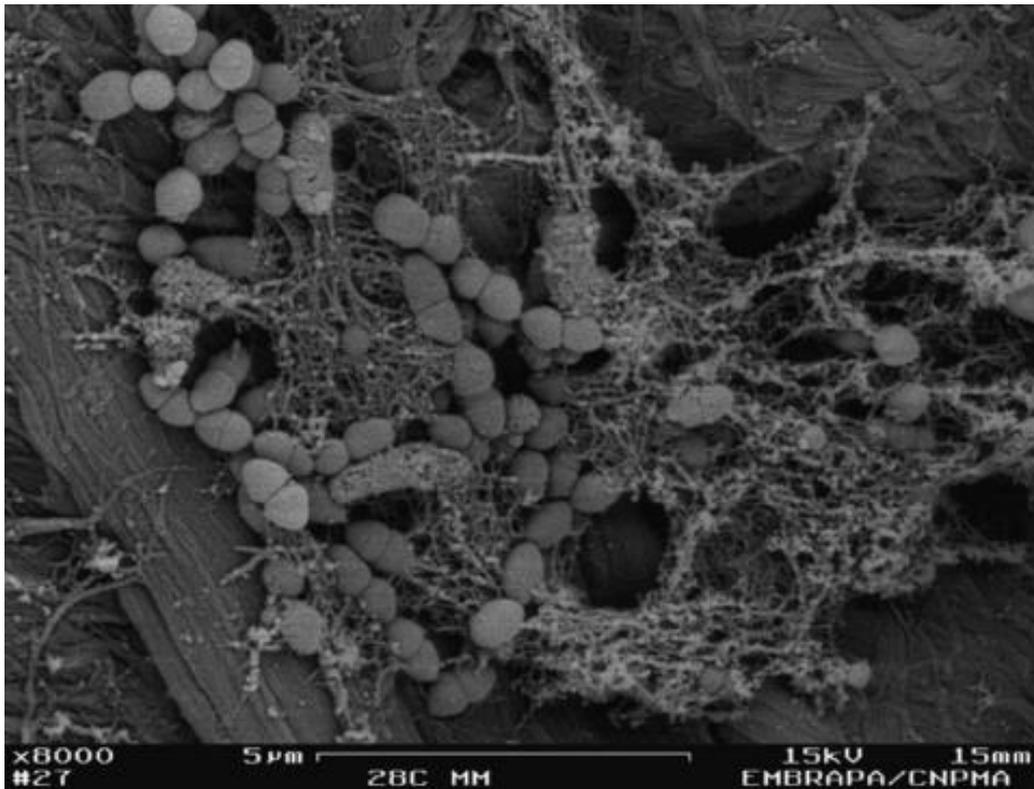


Figure 35 : Bactéries du sol vues sous microscopie électronique à balayage.

➤ **Rôle des bactéries dans le sol**

Bactéries et structure du sol :

Les bactéries synthétisent des composants, particulièrement des polysaccharides très résistants à la dégradation enzymatique. Ces derniers constituent une fraction importante de la matière organique humifiée, l'humine microbienne, participant à la formation des microagrégats.

Fonctions bactériennes et ambiance physico-chimique du sol :

- Les bactéries sont des régulatrices essentielles des équilibres gazeux du sol. Par exemple, l'activité respiratoire aérobie qui consomme l'oxygène, peut mener à l'anoxie.
- Les bactéries agissent directement ou indirectement sur l'ensemble de la biocénose. Par exemple, par la synthèse de facteurs de croissance (vitamines) et d'antibiotiques, certaines bactéries exercent un contrôle, positif ou négatif, sur d'autres organismes.

- Par leurs fonctions biogéochimiques (minéralisation, oxydation, transformation de certains composés organiques en humine, fixation de l'azote atmosphérique) les bactéries jouent un rôle important dans la formation et l'évolution du sol.
- Rôles des bactéries dans les cycles biogéochimiques (cycle d'azote, cycle de carbone...)
- **Les différents types de bactéries qui existent dans le sol**

Les bactéries sont les représentants les plus importants quantitativement de la microflore de sol. On peut y retrouver tous les types de bactéries, des autotrophes, des hétérotrophes, des aérobies, des anaérobies, des mésophiles, des psychrophiles, des thermophiles.

IV.2.2. La biomasse végétale

Le système racinaire des plantes est un constituant important des organismes vivants dans le sol. Il comprend plusieurs parties caractérisées le diamètre et le niveau de ramification. Ce sont les racines les plus petites, ou les radicelles, qui permettent la nutrition des plantes. Elles absorbent l'eau et les éléments minéraux, elles secrètent des substances organiques plus aux moins complexes.

La radicelle et son environnement de sol immédiat sont un lieu privilégié d'échanges appelé la **rhizosphère** (zone de sol très riche en microorganismes)

IV.3. La faune du sol

IV.3.1. Diversité taxonomique de la pédofaune

A l'exception des Spongiaires, Cnidaires et Echinodermes, tous les grands embranchements sont représentés dans la faune du sol.

- Protozoaires (amibes, flagellés, Ciliés)
- Plathelminthes : classe des Turbellariés (ex. planaires)
- Nématodes
- Rotifères
- Annélides : classe des Chlitéllates, sous classe Oligochètes (ex. Lombrics)

- Mollusques : classe des Gasteropodes (ex. escargots, limaces)
- Arthropodes : classe des Arachnides (ex. araignées, acariens), des Crustacés (ex. cloportes), des Insectes, des Myriapodes.
- Cordés (Sous embranchement des Vertébrés, classe des Mammifères)

IV.3.2. Diversité de taille de la pédofaune

Elle est divisée selon la taille des organismes en micro, méso, macro et mégafaune :

- **Microfaune** : constituée d'animaux d'une longueur $< 0,2$ mm (diamètre $< 0,1$ mm) et regroupe les protozoaires (amibes, flagellés, ciliés), Rotifères et nématodes (Fig. 36).

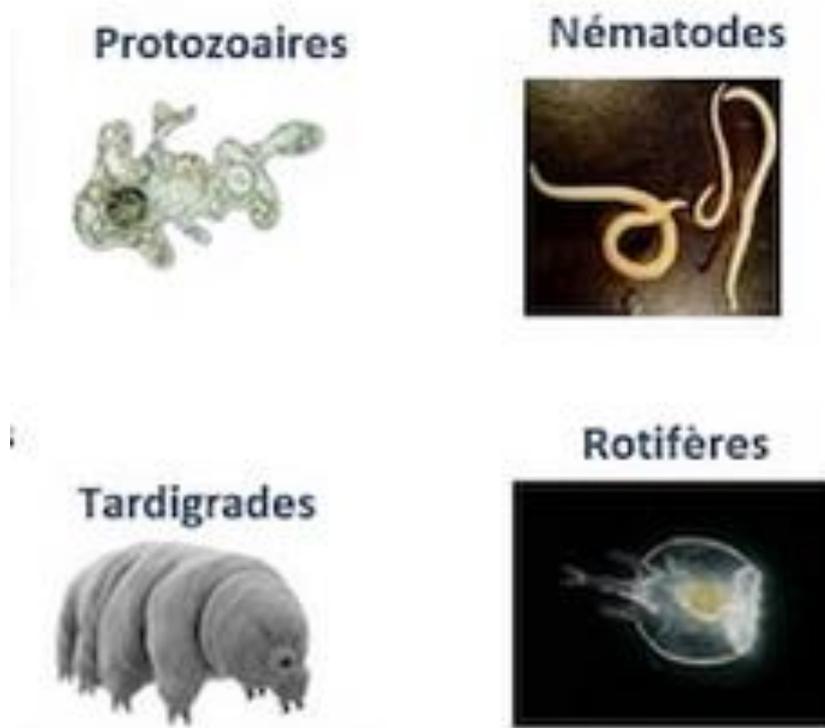


Figure 36 : Microfaune du sol

- **Mésafaune** : La longueur varie entre 0,2 et 4 mm (diamètre de 0,1 à 2 mm), comprend des nématodes, des acariens et des insectes aptérygotes (Collemboles, Diploures, Protoures). Les Arthropodes appartenant à la mésafaune sont nommés microarthropodes (Fig.37).



Figure 37 : Quelques animaux de la mésofaune du sol.

- **Macrofaune** : animaux d'une longueur de 4 à 80 mm environ (diamètre de 2 à 20 mm). Ses représentants principaux sont :
 - Des Annélides (lombrics).
 - Des Mollusques Gastéropodes (limaces, escargots)
 - Des Arthropodes (autres que les insectes) : Crustacés Isopodes (cloportes), Myriapodes, Arachnides (Pseudoscorpions, araignées...).
 - Des Insectes : Isoptères (termites), Orthoptères (courtilières), Coléoptères (carabes, staphylins), Diptères (tipules), Hyménoptères (fourmis).
- Les Arthropodes de la macrofaune sont les macroarthropodes (Fig. 38).



Figure 38 : Quelques animaux de la macrofaune du sol.

- **Mégafaune** : dépassent 80 mm de longueur, comprend des vertébrés, qui agissent sur le sol par leurs galeries : reptiles, mammifères fouisseurs tel que les campagnols et les taupes (Fig. 39).



Figure 39 : Animaux appartenant à la mégafaune du sol.

A : campagnol, B : taupe

IV.3.3. Abondance de la pédofaune

Les estimations d'abondance trouvées dans la littérature varient considérablement selon les sols étudiés (Tableau 6) :

Tableau 6 : Abondance des différents groupes de la pédofaune dans le sol

Groupe	Nombre (Individus /m ²)	Biomasse (g/m ²)
Protozoaires	10 ⁹ à 10 ¹¹	6 à > 30
Nématodes	1 à 30 millions	1 à 30
Vers de terres	50 à 400	20 à 400
Acariens	20 000 à 400 000	0,2 à 4
Collemboles	20 000 à 400 000	0,2 à 4
Larves d'insectes	Jusqu'à 500	4.5
Myriapodes		
• Diploures	20 à 700	0.5 à 12.5
• Chilopodes	100 à 400	1 à 10
Crustacés Isopodes	Jusqu'à 1800	Jusqu'à 4

IV.3.4. Rôles essentiels de la pédofaune

La pédofaune comprend de très nombreuses espèces. En s'y déplaçant, en s'y nourrissant, en y excréant et en y mourant, les animaux du sol ont un impact direct ou indirect sur leur habitat.

Trois formes d'action, mécanique, chimique et biologiques caractérisent les animaux du sol

IV.3.4.1. Rôles mécaniques

- **Le macrobrassage** : quelques animaux (ex : fourmis, vers de terre, rongeurs...) mélangent de grandes quantités de terre, ramenant en surface les horizons riches en matières minérales et enfouissant les horizons organiques superficiels, les litières et le fumier (Fig. 40).



Figure 40: Terre ramenées en surface par les fourmis.

- **Le microbrassage :** Quelques animaux du sol organismes (acariens, collemboles, larves de Diptères...) ont faible capacité de pénétration donc ils remontent peu de matière minérale. Cependant, ils incorporent la matière organique au sol en fabriquant de quantités énormes de petites crottes qui par lessivages, sont entraînées vers le bas.
- **La formation de galeries :** les galeries (Fig. 41) creusées par la pédofaune sont importantes pour l'aération du sol et son régime hydrique



Figure 41: Galeries formées par les vers de terre dans le sol.

- **La fragmentation :** La fragmentation de la litière par la pédofaune (vers de terre, myriapodes, acariens...) a pour effet d'augmenter considérablement la surface d'attaque des matières organiques par les bactéries et les champignons du sol (Fig. 42).

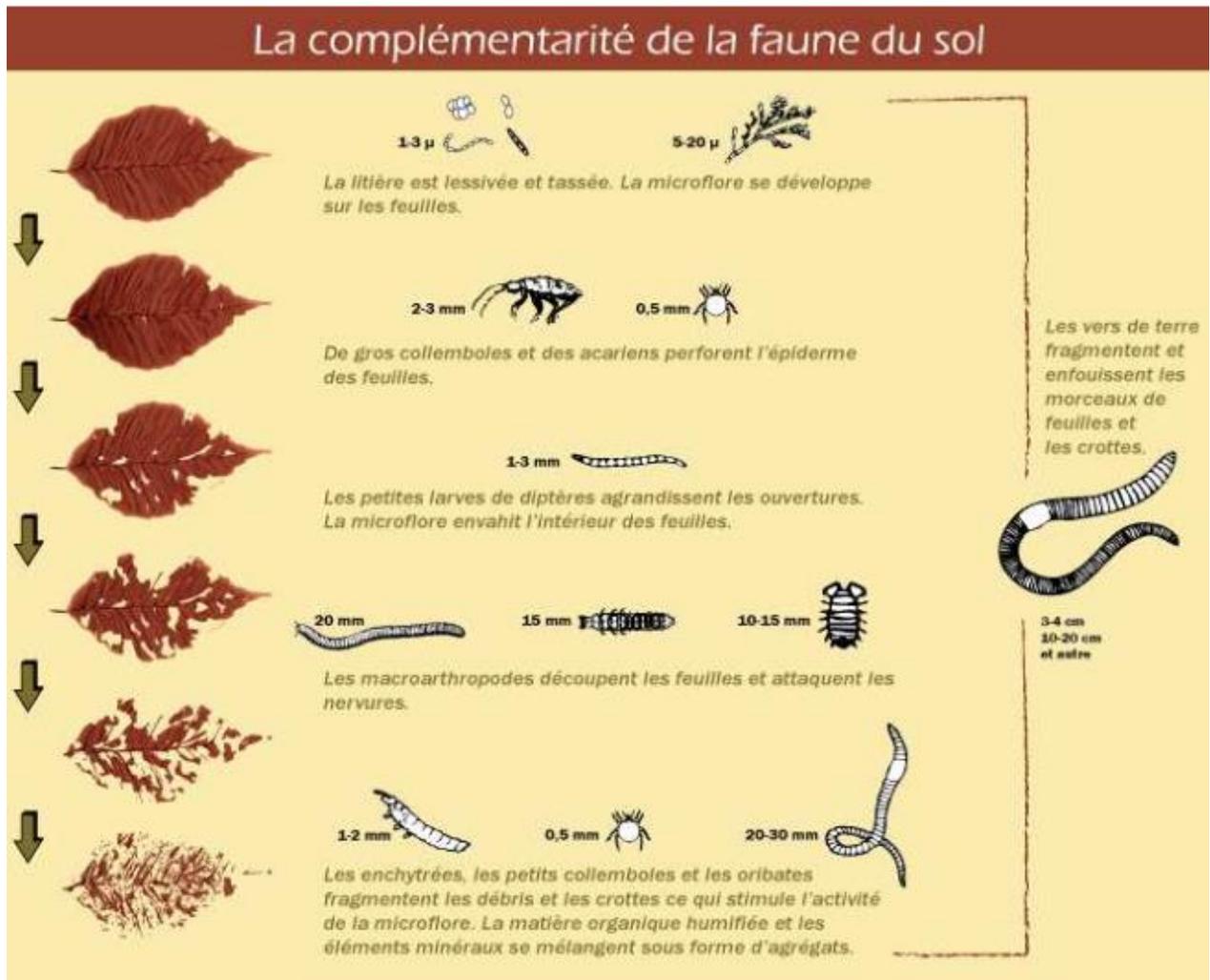


Figure 42 : Animaux contribuant à la fragmentation de la litière.

- **La formation d'agrégates** : Les vers de terre et les Macroarthropodes qui ingèrent les particules de terre avec leur nourriture contribuent à la formation des agrégats en mélangeant matière organique et matière minérale.

IV.3.4.2. Les effets chimiques directs et indirects

- **Effets chimiques directs**
- Modification de la qualité de la nourriture durant son passage à travers la chaîne alimentaire: en particulier minéralisation des matières organiques et libération des ions nutritifs.
- La décomposition des cadavres restitue au sol les bioéléments stockés durant la vie des animaux.

- La faune agit sur la composition chimique du sol également par ses excreta (Fig. 43).



Figure 43 : Excreta d'animaux dans le sol.

- **Effets chimiques indirects**

Exemple : Les Protozoaires consomment les bactéries en quantité considérable. En détruisant les bactéries, ils stimulent leur développement, maintiennent jeunes leurs populations et favorisent ainsi indirectement les processus biochimiques qui en dépendent tel que le cycle d'azote....

✓ **Effets biologiques**

- **Prédation** : les effets de prédation sur les populations de proies sont importants car elle met plus au moins rapidement ces dernières en équilibre avec les ressources disponibles (la nourriture, les abris, etc.

Exemples de couples prédateurs- proies fréquents dans les sols :

Protozoaires- bactéries, nématodes-bactéries, nématodes- champignons, champignons- nématodes, collemboles et acariens-champignons, carabides-larves de Diptères, taupes-vers de terre, etc.

- **Compétition** : Mécanisme biologique de régulation des populations, qui tend à maintenir les effectifs en équilibre avec les capacités du milieu (nourriture, abris, etc.).

IV.4. Synthèse des fonctions des êtres vivants du sol

Le tableau 7 synthétise les fonctions assurées par les êtres vivants du sol.

Tableau 7 : Synthèse des fonctions essentielles assurées par les êtres vivants du sol

Fonctions	Organismes impliqués
Décomposition de la matière organique	Invertébrés détritivores Champignons, bactéries, actinomycètes
Recyclage des nutriments	Principalement microorganismes et racines, quelques invertébrés du sol et de litière
Echanges gazeux et séquestration du carbone	Principalement microorganismes et racines, Carbone protégé dans les agrégats créés par la méso et la macrofaune
Maintenance de la structure du sol	Invertébrés fousseurs Racines, mycorhizes, Autres microorganismes
Régulation des processus biologiques du sol	Invertébrés fousseurs Racines
Relations symbiotiques et asymbiotiques avec les plantes et leurs racines	Rhizobium, mycorhizes, actinomycètes, autres microorganismes de la rhizosphère, Fourmis
Détoxification du sol	Principalement microorganismes
Suppression des nuisibles, des parasites et des maladies	Plantes, mycorhizes, champignons, bactéries, nématodes, collemboles, vers de terre, prédateurs
Sources d'aliments et de médicaments	Racines, insectes, vers de terre, vertébrés et leur sou-produits

Chapitre V

Classification des sols (Notions)

V.1. Le but de la classification

La systématique des sols doit résoudre un double problème :

- Classer les unités supérieures, grouper les grands types de sols mondiaux, en fonction de leur genèse, de leurs propriétés fondamentales.
- Donner aux cartographes un outil commode, pour dresser des cartes à grande échelle, utilisables à des fins pratiques (agronomie, foresterie, aménagement, ...).

Il faut alors classer les sols, souvent d'après des caractères de détail ; il faut aussi les définir et les désigner.

Le but final est d'aboutir à une classification unique hiérarchisée, comprenant toutes les catégories d'unités ; elle doit se présenter sous forme d'une pyramide : les unités supérieures peu nombreuses forment le sommet, les unités inférieures, de plus en plus subdivisées et nombreuses, en formant la base.

V.2. Critères de la classification des sols

Les critères fondamentaux utilisés pour la classification des sols sont:

- **Le développement du profil :**

profil (A)C : sols minéraux bruts

profil AC : sols peu évolués contenant de la matière organique

profil A(B)C : sols évolués par altération : horizon (B) d'altération

profil ABC : sols évolués par altération et offrant en outre un processus d'entraînement, générateur d'un horizon B d'accumulation.

- **Le mode d'altération des minéraux** en liaison avec le type de climat : défini par la nature des sesquioxydes libérés et qui se maintiennent individualisés ou

constituent des complexes caractéristiques et par l'importance relative de cette libération, ainsi que par la dominance de certains types d'argile.

- **Le type de matière organique et son influence sur l'évolution du sol des sols :** et la différenciation des horizons du profil : concentration organique dans les horizons supérieurs, ou répartition plus ou moins régulière dans tout le profil ; humus évolué calcique ; humus évolué de type mull, apte à favoriser la migration des colloïdes argileux ; humus grossier à dominante du type mor, capable de dégrader le complexe minéral des sols.
- **L'hydromorphie :** Il s'agit du mode de développement du profil qui est « conditionné » par une saturation complète des pores par l'eau : cette saturation peut être temporaire ou permanente, complète (affectant l'ensemble du profil) ou partielle (affectant les horizons supérieurs ou inférieurs seulement).

V.3. Les différentes classifications

V.3.1 La classification française

La classification des pédologues français a été proposée pour la première fois en 1938. Par la suite, cette classification fut amplifiée par G. AUBERT et Ph. DUCHAUFOR et présentée par ses auteurs au Congrès de la Science du Sol de Paris en 1956. Cette classification fut sans cesse perfectionnée par l'un ou l'autre de ses auteurs et diverses mises au point furent présentées soit à l'occasion de réunions internationales ou de congrès.

A partir de 1964, fut institué en France un Comité de pédologie et de cartographie des sols (CPCS) qui a entrepris, en vue d'une cartographie des sols de France, d'établir une classification systématique des sols qui tienne compte des acquisitions des pédologues travaillant en métropole et celles de ceux travaillant dans les zones intertropicales.

- **Classification CPC de 1967 :** C'est une classification hiérarchique et génétique. L'aspect hiérarchique est lié à la division en unités majeurs : Classes, Sous-Classes, Groupes et enfin sous-groupes. L'aspect génétique est lié surtout à la

prise en compte de du climat considéré d'abord au niveau de la classe. Il existe 12 classes (présentées dans le tableau8).

Tableau 8: Les classes du sol d'après le CPCS (1967).

N°	Classe	Mécanisme dominant	Climats caractéristiques
1	Sols minéraux bruts	Aucun (roches affleurantes)	Différencié au niveau de la sous classe
2	Sols peu évolués	Pas net (sol jeunes)	Différencié au niveau de la sous classe
3	Vertisols	Evolution orientée, voire bloquée par la présence d'une forte teneur en argile de type 2/1, c'est la vertisolisation.	Méditerranéens et subtropicaux
4	Andosols	Evolution liée à la présence d'une roche volcanique fournissant des produits mal cristallisés (allophanes) ; cela correspond à <i>l'andosolisation</i> et parfois à la brunification	Humide avec une différenciation au niveau de la sous classe
5	Sols calcimagnésiques	Evolution liée à la présence liée à la présence de calcium en quantité variable ; on prend en compte la <i>décarbonatation</i> et la décalcification	Indifférents
6	Sols isohumiques	Evolution liée à la présence liée à la présence simultanée d'une forte activité biologique et d'une matière organique humifiée stable	Continentaux avec une différenciation au niveau de la sous classe

7	Sols brunifiés	Evolution liée à la présence puis à l'éventuelle dégradation du complexe « argile/humus/fer », on prend en compte la <i>brunification</i> , la dégradation, la <i>plonosolisation</i> .	Tempérés avec une différenciation au niveau de la sous-classe.
8	Sols podzolisés	Evolution matérialisée par une acidification détruisant les minéraux silicatés, éliminant les bases et la silice issues des silicates, redistribuant issues des silicates, redistribuant légèrement fer et aluminium, c'est la <i>podzolisation</i> .	Estimés tempérés ou froids (à l'époque de la CPCS) et différenciés au niveau de la sous-classe.
9	Sols à sesquioxydes de fer et manganèse.	Evolution parallèle à celle des sols brunifiés mais en présence de fortes quantités de fer (sols ferrugineux tropicaux et sols fersiallitiques), on étudie la <i>rubéfaction</i> et la <i>dérubéfaction</i> .	Subtropicaux et méditerranéens
10	Sols ferrallitiques	Sols liés à la dissolution totale des minéraux primaires, à l'exportation des bases de la silice (y compris quartz), à la concentration relative de fer et de l'aluminium ; c'est la <i>ferrallitisation</i> .	Chauds
11	Sols hydromorphes	Sols liés à un excès d'eau, c'est <i>l'hydromorphie</i>	Indifférents
12	Sols sodiques	Sols évoluant dans des milieux riches en sels solubles ; on examine <i>salinisation</i> et <i>sodisation</i> .	Indifférents

V.3.2. La classification américaine

La première classification américaine est l'œuvre de MARBUT en 1921.

Dès 1938, la classification prenait une forme plus classique avec les trois ordres « **zonal, intrazonal et azonal** » et des sous-ordres fondés sur des caractéristiques pédoclimatiques.

En 1960, au moment du Congrès international de Science du sol de Madison, Wisconsin, les pédologues américains présentent une nouvelle classification qui se fonde sur les caractères mesurables (physico-chimiques et morphologiques) et rassemble les sols d'après leur parenté génétique qui traduit l'influence du milieu.

L'idée la plus nouvelle de cette classification est d'avoir défini classification : les *horizons de diagnostic* qui permettent de caractériser et de classer le profil ; ces horizons sont décrits et définis minutieusement, quant à leurs diverses propriétés, morphologiques, physico-chimiques, et même leur « microstructure », cette dernière présentant généralement une grande importance.

Ces horizons de diagnostic sont énumérés ci-dessous en donnant leurs équivalents les plus probables dans la terminologie française.

Epipédons

Mollique : mull calcique noir

Umbrique : mor, moder, anmoor épais

Histique : hydromor ou tourbe

Ochrique : mull ou moder peu épais ; paraît convenir aux horizons Al des sols ferrallitiques

Horizons de profondeur

Plaggen : horizon organique artificiel, créé par l'activité humaine

Argillique : l'horizon B texturai s'en rapproche le plus

Agrique : pas d'équivalent (horizon créé par la culture et les activités humaines)

Natrique : horizon d'argile sodique

Spodique : horizon B des podzols (accumulation de produits organiques et minéraux)

Cambique : horizon altéré (B)

Oxique : horizon riche en sesquioxydes des sols ferrallitiques

Dix **ordres** ont été distingués qui s'appuient sur la présence ou l'absence de différents horizons de diagnostic. Leur nom est parfois inventé de toutes pièces mais s'appuie le plus souvent sur des termes latins ou grecs. Pour obtenir les **sous-ordres**, à la syllabe correspondant à l'ordre, on en ajoute une autre relative au climat du sol ; les **groupes** s'obtiennent en ajoutant une troisième syllabe relative à un horizon de diagnostic ou au climat.

- ✚ Entisols :sols minéraux bruts
- ✚ Vertisols : vertisols
- ✚ Inceptisols : sols peu évolués, certains sols bruns
- ✚ Aridisols : sierozems bruns, sierozems, solontchaks, solonets
- ✚ Mollisols : sols calcomagnésimorphes
- ✚ Sols :isohumiques
- ✚ Spodosols : sols podzoliques, podzols
- ✚ Alfisols : sols à mull
- ✚ Ultisols : différents sols fersiallitiques et ferrallitiques
- ✚ Oxisols : sols : ferrallitiques
- ✚ Histosols : sols hydromorphes organiques

V.3.3. La classification russe

La première classification des sols a été présentée par DOKUCHAEV en 1886. Il distinguait des sols « normaux », « transitionnels » et « anormaux ». Les subdivisions suivantes s'appuyaient sur l'origine des sols, les zones climatiques et la matière organique. Différentes classifications furent présentées successivement par SIBIRTSEV (1895) ; par GLINKA (1908); KOSSOVICH (1911). En, NEUSTRUEV (1925). D'autres classifications furent établies par POLYNOV puis GERASIMOV; ZAVALISHIN et IVANOVA (1934)etc

Une classification récente est celle de **IVANOVA et ROZOV (1956)** présentée par la suite au Congrès de Science du Sol de Madison. Cette classification prévoit d'abord des « **groupes globaux** » qui ont essentiellement une valeur géographique et par conséquent climatique qui oriente de manière précise la pédogénèse. Les « **groupes globaux** » suivants ont été reconnus: Polaire, boréal, sub-boréal, sub-tropical, tropical.

A l'intérieur de ces « **groupes globaux** », apparaissent des **classes** liées encore au climat et à la végétation. Par exemple, dans le groupe tropical, trois classes sont distingués d'après le climat et la végétation: sols des déserts tropicaux, sol des régions tropicales à savanes et forêts sèches, sols des régions tropicales à savanes et forêts humides (Tableau 9).

A l'intérieur de chaque « **classe** », apparaissent des sous-classes fondées sur la végétation ou un grand processus pédogénétique. A l'intérieur de chaque « **sous-classe** » sont distinguées des « **types** » où les sols sont automorphes, semi-hydromorphes et hydromorphes. C'est à ce niveau qu'apparaissent les « **groupes** » de la classification française et américaine.

Tableau 9: Groupe global de classes de formation de sols tropicaux

Classes	Sous classes	Types		
		Automorphe	Semi- hydromorphe	Hydromorphe
10. Sols des déserts tropicaux	Désert tropical	Sols des déserts tropicaux		
11. Sols des forêts et des savanes sèches	Solontchak	Sols brun-rouge de savanes désertifiées	Sols brun-rouge de prairie	Solontchak tropicaux
	1. Sols rouges tropicaux	Sols brun-rouge des savanes	Sols brun-rouge des savanes (humides des prairies)	
12. Sols de forêts et savanes humides	2. Sols sous herbes basses (Sod)	Sols brun-rouge	id	Sols tropicaux de prairies
	3. Sols tropicaux de prairies	Sols noirs de savane (Vertisola)		
	4. Solonels tropicaux Latérite	Sols rouges des savanes humides Sols latéritiques	Solonels tropicaux Sols rouges à gley	
	Sols de maris tropical			Sols tropicaux de marais

V.4. Aperçu sur les sols d'Algérie (d'après J.-H. Durand).

V.4.1. 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 un « reg ». 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.

Le mot « reg » signifie simplement en arabe : une région plate. La déformation du sens vient de ce qu'au Sahara, ces régions plates sont presque toujours caillouteuses.

- **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.

V.4.2. Les sols des régions semi-arides.

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 (ou plus exactement à l'équilibre : action du vent- résistance de la végétation) 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.
- **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.

V.4.3. Les sols des régions telliennes humides

L'humidité et végétation deviennent les principaux facteurs de formation des sols zonaux.

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.
- 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.

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.
- 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).

c. Groupe des terres rouges méditerranéennes : il s'agit des sols fortement rubéfiés qui se rencontrent fréquemment en Algérie.

V.4.4. 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. les sols locaux particulièrement importants en Algérie sont les **solssalins** 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.
- **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 solontchak 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.

Partie II : L'eau

Chapitre VI

L'eau dans le sol

VI.1. Définition de l'eau

Selon le dictionnaire, l'eau est définie en ces termes : *Eau est une molécule chimique composée d'hydrogène et d'oxygène ; liquide inodore, insipide et transparent, l'eau gèle à 4°C (glace) et bout à 100°C (vapeur). Sa plus grosse densité se situe à 4°C. Importance physiologique capitale pour la vie sur terre et le climat. A l'état naturel, l'eau contient beaucoup de sels dissous. Sur le plan chimique, une eau pure correspond à une eau distillée.*

La structure de la molécule d'eau est présentée dans la figure 44.

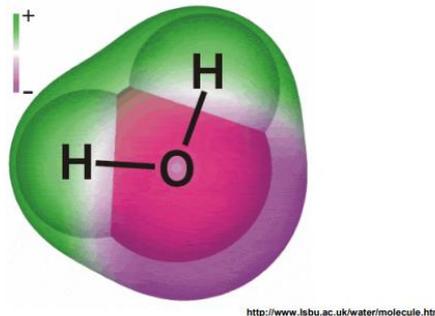


Figure 44: Structure la molécule d'eau.

VI.2. Caractéristiques de la molécule d'eau

L'arrangement asymétrique des atomes de la molécule et la différence d'électronégativité génèrent une polarisation de la molécule. Ceci explique en particulier :

- sa capacité à être adsorbé sur la surface des solides
- sa faculté d'hydratation des ions et des colloïdes
- sa chaleur latente de vaporisation et son point d'ébullition élevés.
- sa constante électrique très élevée (env.80).

- ses remarquables propriétés de solvant.

VI.3. Rôles de l'eau du sol

L'eau est une substance indispensable à la vie dont les principaux rôles au niveau de la plante et au niveau du sol sont :

✓ **Au niveau de la plante**

- Permet de maintenir la vie de la plante par turgescence
- Intervient dans les chaînes du métabolisme
- Permet la dissolution des produits fertilisants
- Véhicule les éléments nutritifs

✓ **Au niveau du sol**

- L'eau est le siège de toutes les transformations biochimiques et physicochimiques conférant ainsi au sol un caractère de dynamisme et d'évolution.
- L'eau est donc le principal agent de fluctuation des rendements des différentes cultures.

VI.4. Sources de l'eau dans le sol

L'eau couvre les trois quarts de la surface de notre planète. Elle constitue les rivières, les eaux souterraines, les lacs, les mers, les océans. Elle est présente dans les sols et constitue les êtres vivants. Sous toutes ses formes, l'eau participe au cycle de l'eau. Les fluides jouent un rôle fondamental dans la plupart des processus physicochimiques qui affectent la croûte terrestre ; avec les rivières, les aquifères souterrains occupent une fonction centrale dans ce système.

• **Précipitations**

Les précipitations (pluie, neige, rosée, etc.) jouent un rôle clé dans le renouvellement des ressources en eau et dans les conditions climatiques et la biodiversité locales. En fonction des conditions locales, les précipitations peuvent alimenter les rivières et les lacs, reconstituer les nappes phréatiques ou retourner dans l'atmosphère par évaporation.

- **Nappes phréatiques** : Eau retenue par les profondeurs du sol, elle peut jouer un rôle pour compenser l'eau perdue par évaporation. Les nappes d'eau souterraine sont de l'eau contenue dans les pores ou les fissures des roches saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées.

VI.5. Les différents états de l'eau dans le sol

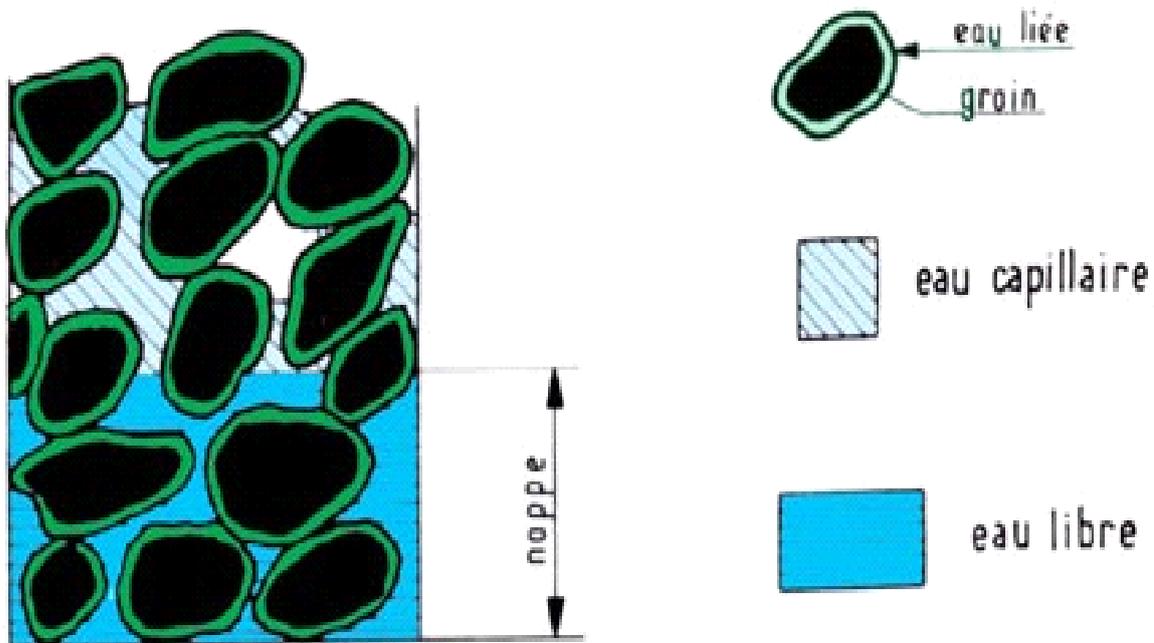
L'eau est présente dans le sol sous différentes formes (Fig. 45):

- **L'eau de ruissèlement** : superficielle, elle circule au sein des horizons supérieurs, parallèlement à la surface. C'est un agent d'appauvrissement (entraînement des particules les plus fines, limons et argiles. Le ruissèlement affecte les surfaces en pente (même faibles) soumises à des pluies violentes.
- **L'eau gravitaire ou eau libre**, qui circule librement dans la macroporosité du sol, se déplace essentiellement vers le bas sous l'effet de la gravité, jusqu'à rencontrer un niveau imperméable ou déjà saturé. Elle est nuisible si elle n'est pas perdue vers les profondeurs car elle va occuper les macropores et gêner les échanges gazeux donc il faut l'éliminer artificiellement par drainage.
- **L'eau de constitution** qui entre dans la composition chimique/minéralogique de certains minéraux (essentiellement les argiles)
- **L'eau retenue**

L'eau retenue par le sol au cours de l'infiltration des pluies occupe les pores fins et très fins (inférieurs à 10 μm environs) : les forces capillaires et d'adsorptions sont suffisamment élevées pour s'opposer aux forces de gravité. L'eau retenue se subdivise en deux parties :

- **L'eau capillaire (ou pendulaire)** : absorbable par les racines des plantes, elle occupe les pores fins et forme des « ménisques » entre les particules solides
- **L'eau liée** : est celle qui ne peut pas être extraite du sol par la succion racinaire, elle est composée de :
 - **L'eau hygroscopique** ; elle est retenue à la surface des particules de sol par des forces électriques.

- **L'eau pelliculaire** entoure les particules de sol et leur eau hygroscopique ; elle ne peut pas davantage se déplacer par gravité. Elle ne peut être extraite que par centrifugation ou chauffage.



États de l'eau dans les sols

Figure 45 : Les états de l'eau dans le sol.

VI.6. Les forces de rétention de l'eau par le sol

Les forces de rétention de l'eau par le sol peuvent se classer en trois groupes :

- **Les forces de rétention capillaire**, en relation avec la porosité du sol (Les forces de rétention capillaire résultent de la tension de surface entre l'air et l'eau du sol).
- **Les forces liées à l'adsorption de l'eau par les particules de sol** : l'eau peut être adsorbée à la surface des particules de sol par des forces essentiellement électriques, c'est-à-dire ; par lesquelles les molécules d'eau polarisées sont attirées par les charges non équilibrées de sa surface des solides (Fig. 46).

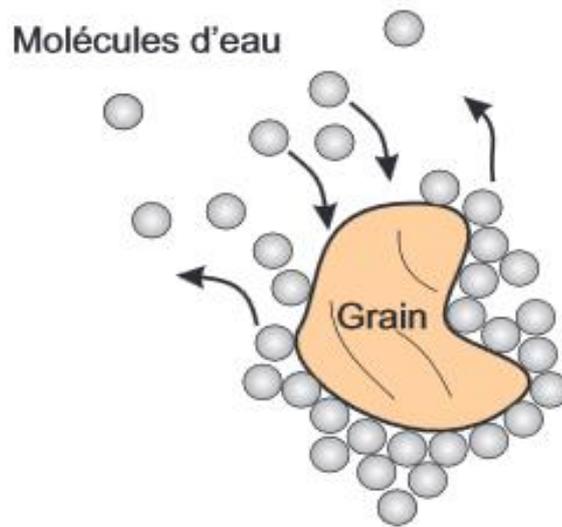


Figure 46 : Adsorption des molécules par les particules du sol.

- **Les forces osmotiques**, qui dépendent de la concentration des solutés du sol. Cette force intervient lorsque les concentrations sont très différentes de part et d'autre d'une membrane perméable, qui peut être celle des racines par exemple ; elle tend au rééquilibrage des solutés de part et d'autre en provoquant leur transfert au travers de cette membrane.

VI.7. Potentiel de l'eau dans le sol (potentiel hydrique)

La grandeur, qui permet de décrire et prévoir les transferts d'eau dans le, est le « potentiel de l'eau », quantité d'énergie contenue dans une quantité unitaire d'eau.

L'état énergétique de l'eau dans le sol est défini par le potentiel hydrique ψ , qui est lui-même la résultante de trois niveaux d'énergie d'origines différentes : le potentiel gravitaire (ψ_g) qui préside à l'infiltration des eaux de pluie par gravité, le potentiel matriciel (ψ_m) qui définit la force de rétention de l'eau par le sol, et enfin, le potentiel osmotique (ψ_o) : ce dernier n'intervient que dans les sols salins.

Donc, dans la majorité des sols : $\psi = \psi_g + \psi_m$. Ces deux forces sont antagonistes : pour cette raison ψ_g est en général affecté du signe + et ψ_m du signe -. ψ_g ne joue un rôle important que lorsque les pores sont saturés d'eau. Lorsque le sol est plus au moins complètement ressuyé, c'est le potentiel matriciel qui intervient, il détermine la force de

succion pour l'eau qui a une grande importance pratique : elle est en relation avec la surface des particules solides qui est d'autant plus élevée que ces particules sont plus fines. Ainsi pour une teneur en eau déterminée, la force de succion est d'autant plus grande que la granulométrie est plus fine.

La force de succion du sol pour l'eau s'exprime par, soit en bars, soit en kilopascals (kPa), soit par son logarithme. Elle s'exprime par le symbole **pF**

1bar=100 kPa : 1000 cm (10^3) cm d'eau : pF3

1/10 bar: 10 kPa: 100 (10^2) cm: pF2

VI.8. Valeurs caractéristiques : Notion d'eau utile

- **Saturation (Sat)** : teneur en eau à saturation du sol en condition de champ. En réalité, le sol n'atteint jamais une saturation complète car une certaine quantité d'air y reste toujours emprisonnée.
- **Capacité au champ (CC)** : correspond à l'eau retenue (capillaire +liée) par le sol après une période de pluie et un ressuyage de deux ou trois jours. Elle correspond aussi à la borne supérieure de la réserve en eau utile RU d'un sol. Le plus souvent, la capacité au champ est mesurée au laboratoire par application d'une pression correspondant à un pF déterminé qui varie selon la granulométrie. Elle oscille entre pF 1,8-3. La valeur moyenne adoptée est $p_f=2,5$.
- **Point de flétrissement (PF)**: correspond à la valeur limite de l'eau liée, donc non absorbable par les racines donc au seuil où l'humidité du sol ne permet plus à la plante de prélever l'eau dont elle a besoin, car la réserve utile en eau du sol a été entièrement consommée. La plante flétrit alors puis meurt si ce taux d'humidité perdure.
- **Point critique (PC)** : la teneur en eau du sol lorsque la plante commence à souffrir d'un manque d'eau et que sa croissance en est affectée. Cette teneur en eau est utilisée en gestion de l'irrigation. Il est aussi appelé point de flétrissement temporaire par certains. Cette valeur se situe entre le tiers et les deux tiers de la différence entre le point de flétrissement et la capacité au champ.

- **L'eau utile (RU) :** La réserve utile en eau d'un sol est la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante. La RU est autrement dit la différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement. **RU= CC-PF**

La RU est composée pour 2/3 de RFU (Réserve Facilement Utilisable) et pour 1/3 de RDU (Réserve Difficilement Utilisable ou réserve de survie).

- **Réserve facilement utilisable (RFU) :** quantité d'eau contenu dans le sol que les plantes peuvent utiliser facilement pour leur croissance et sans subir de stress dommageable.
- **La réserve difficilement utilisable (RDU) :** Elle représente la partie difficilement utilisable. Elle est définie comme étant la différence entre la réserve utile maximum et la réserve facilement utilisable.

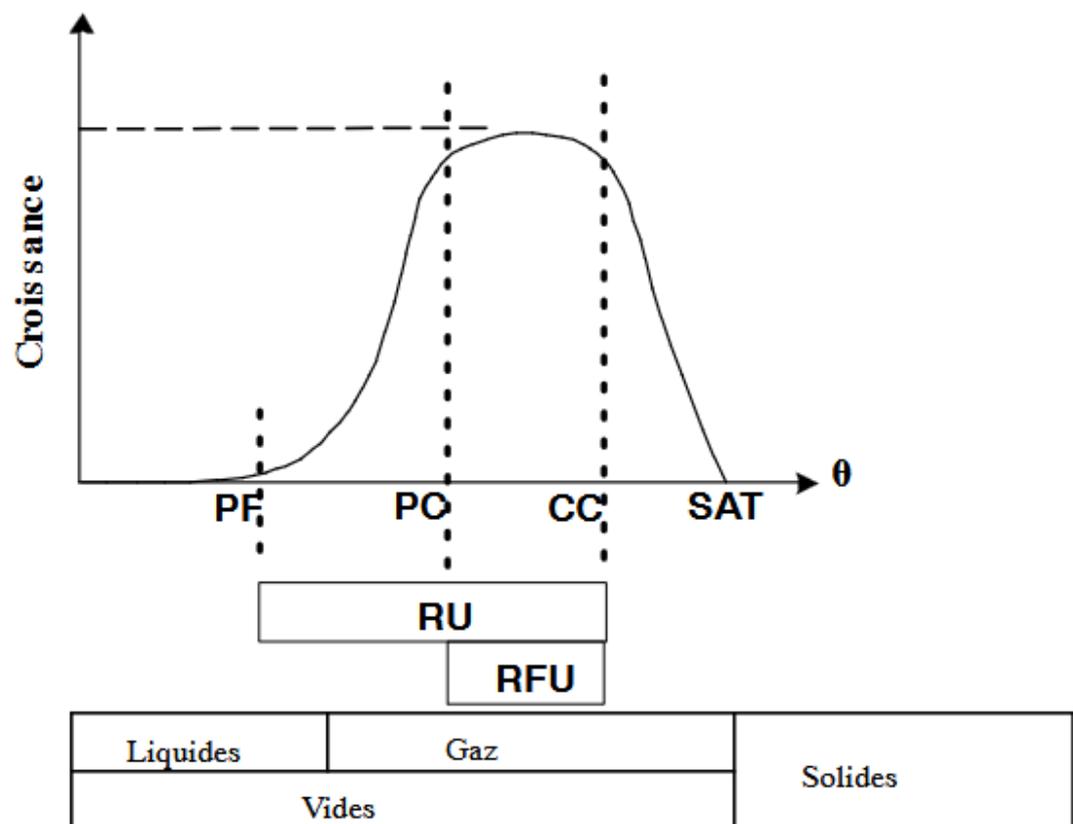


Figure 47 : Teneurs en eau caractéristiques des sols et croissance des plantes.

VI.9. Assèchement du sol

Le sol s'assèche plus rapidement dans les horizons de surface du fait de l'évaporation naturelle au sol et de la forte densité de racines. La succion des racines et les différences d'humidité entre la surface et les horizons plus profonds occasionnent des remontées d'eau par capillarité. Ces remontées diffèrent selon la texture du sol et sa porosité :

- en sols sableux, les remontées sont plus rapides mais elles n'interviennent que sur de faibles profondeurs (20 à 30 cm de sol).
- en sols argileux et/ou compacts, les remontées sont bien plus lentes, mais elles interviennent sur des profondeurs plus importantes (80 à 100 cm).
- Deux techniques culturales permettent de limiter l'évaporation au sol et ainsi préserver les réserves en eau pour l'alimentation hydrique de l'olivier :
 - le binage qui permet à la fois d'éliminer les adventices et de rompre la continuité du film d'eau jusqu'à la surface.
 - le mulching (ou paillage du sol). Cette pratique est rendue difficile par la dispersion de la paille par le vent et par la progression des incendies au niveau du sol.

VI.10. Les mouvements de l'eau dans le sol

Les mouvements de l'eau dans le sol révèlent de deux processus opposés :

- Les mouvements descendants de l'eau de gravité, qui s'infiltrer après les pluies et qui sont liés à la perméabilité du profil.
- Les mouvements ascendants beaucoup plus limités, qui interviennent en saisons sèches et compensent (d'une manière imparfaite) les pertes par évaporation (ou évapotranspiration si le sol est occupé par une végétation continue).

VI.10.1. Mouvements descendants de l'eau de gravité

La perméabilité d'un sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité en cm par seconde (ou par heure si la vitesse est lente : **coefficient k**

La perméabilité k d'un sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau; k est mesuré par la loi de **Darcy**:

$$Q = k \frac{H + H'}{H} s$$

Q : débit cm^3/heure

s : section de la colonne en cm^2

$H+H'$: hauteur de la colonne d'eau en cm

H : hauteur de la colonne du sol

Le figure 48 montre le dispositif de mesure de la perméabilité.

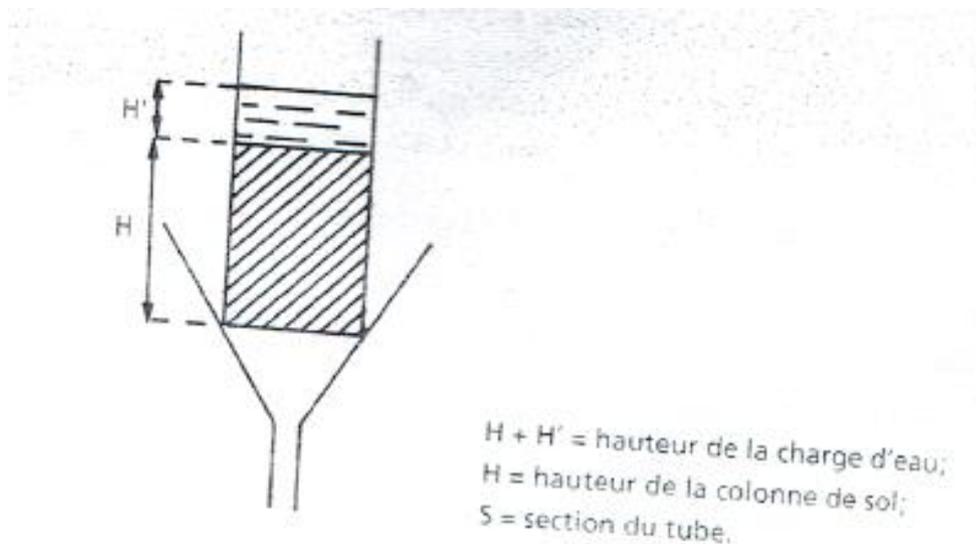


Figure 48 ; Dispositif de mesure de la perméabilité.

Vitesse d'infiltration	Valeur de k (cm/heure)
Très lente	0,1
Lente	0,1-0,5
Assez lente	0,5-2
Moyenne	2-6,5
Assez rapide	6,5-12,5
Rapide	12,5- 25
Très rapide	> 25

VI.10.2. Mouvements ascendants

En saison sèche et chaude, de fortes évaporations (évapotranspiration), la teneur en eau du sol descend en dessous de la capacité au champ. Mais la dessiccation du sol en profondeur est plus rapide qu'en surface. Le Pf s'élève en surface alors qu'il reste plus bas en profondeur. Un courant d'eau capillaire tend à s'établir des Pf bas (profondeurs) vers les Pf les plus élevés (surface). Il provoque un mouvement ascendant de l'eau c-à-d. orienté vers la surface.

L'importance et l'efficacité de cette ascension capillaire diffère considérablement selon qu'elle se produit en milieu drainé ou dans un horizon se trouvant au-dessus d'une nappe d'eau libre.

Dans des milieux drainés l'ascension capillaire est très lente et ne compense pas le dessèchement, elle ne fait que le ralentir. Mais en présence d'une nappe d'eau libre, le phénomène de remontée d'eau capillaire est important et efficace. Il s'agit d'un apport essentiel dans l'alimentation d'eau des plantes en saison sèche.

VI.11. Bilan de l'eau dans le sol

Qu'est-ce que c'est le bilan d'eau ? Le bilan d'eau, c'est l'ensemble de tous les processus qui contribuent à la variation du stock d'eau dans le sol. Quels sont les processus qui interviennent pendant une saison des pluies, donc pendant un cycle végétatif ? Les premières pluies humidifient la couche superficielle du sol. Souvent une partie des pluies se perd par ruissellement ; l'autre partie infiltrée, dans le sol continue à se redistribuer dans des couches profondes sèches. Quand l'humidité du sol diminue, la tension de l'eau augmente et la redistribution s'arrête quand la tension arrive à la valeur qui correspond à la capacité au champ.

- **Le sol et le cycle de l'eau**

Le sol joue un rôle fondamental dans le cycle de l'eau, d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Sur le plan quantitatif, les caractéristiques du sol déterminent en grande partie la part des eaux de pluie qui ruisselle à la surface du sol et rejoint les eaux de surface, et la part qui s'infiltré dans le sol. Cette dernière est stockée dans le sol et

alimente en eau les plantes et l'ensemble des êtres vivants présents dans le sol, l'atmosphère via l'évaporation et la transpiration, et les nappes d'eau souterraine via le phénomène de recharge. Sur le plan qualitatif, la qualité de l'eau qui alimente les eaux superficielles et les eaux souterraines est largement déterminée par les caractéristiques du sol. Le sol peut avoir un effet protecteur sur la qualité des eaux, en contribuant à la rétention et à la dégradation de substances polluantes, par exemple les produits phytosanitaires. Il peut également avoir un effet "source de substances polluantes". C'est le cas notamment du transport particulaire dû au ruissellement et à l'érosion du sol.

Les composantes du cycle de l'eau sont les suivantes :

- **Précipitations**

Eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide (bruine, pluie) et sous forme solide (neige, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, givre...).

Les précipitations se mesure comme telles : **Intensité (mm/h) ; lame d'eau précipité (mm) [1mm d'eau11/m²]**

- **Evaporation**

Passage de la phase liquide à la phase vapeur (Sublimation: passage direct de l'eau sous forme solide en vapeur). L'évaporation est une composante fondamentale du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région.

- **Infiltration/Percolation**

Mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression.

La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique.

Le figure 49 est une représentation schématique du cycle de l'eau.

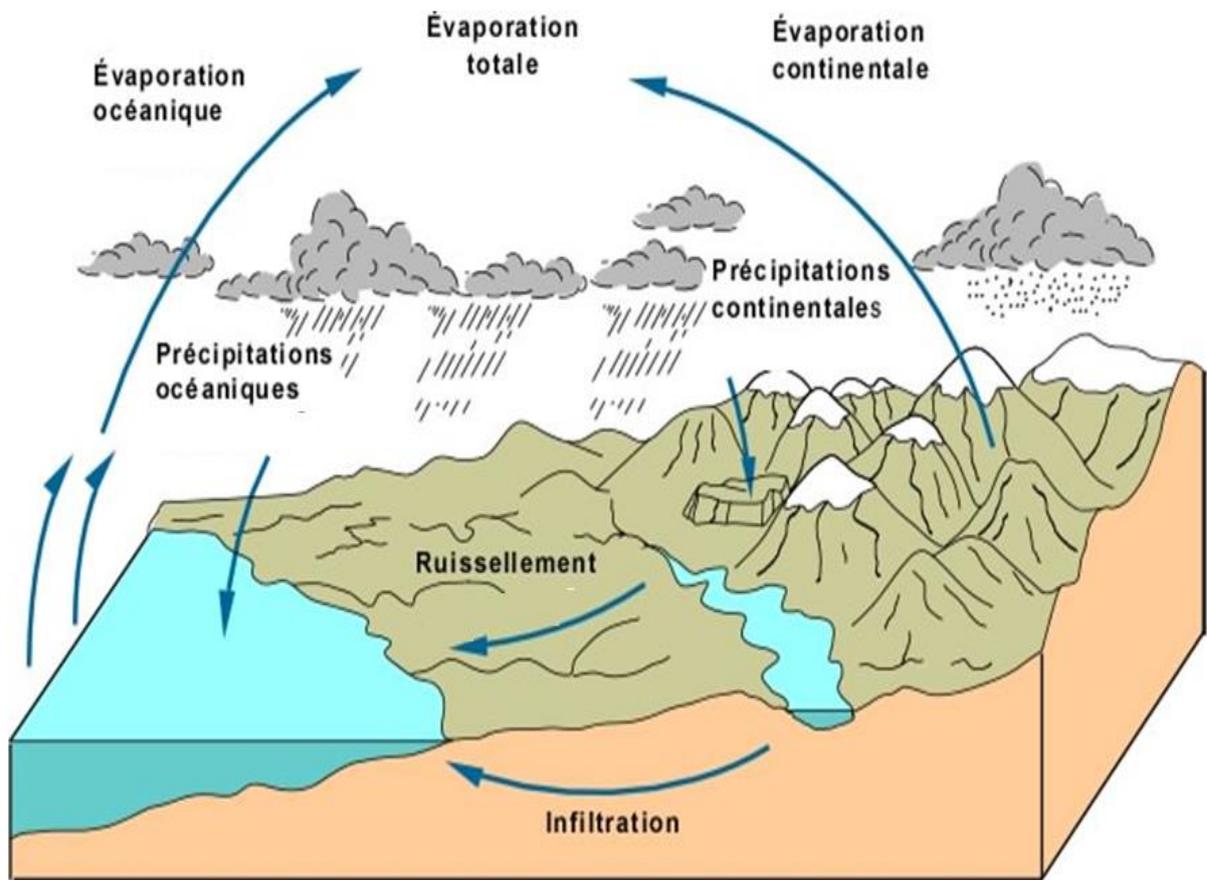


Figure 49 : Cycle de l'eau.

- **Le bilan hydrologique**

Le calcul du bilan hydrique estime l'écoulement et l'évaporation sur un pas de temps décadaire ou mensuelle en fonction du sol et de la météorologie.

Pour une station parfaitement horizontale et un sol très perméable, il n'ya pratiquement pas de ruissèlement : la formule est égale à la suivante :

$$P = ETP + D + \Delta r$$

P : précipitations en mm

ETP : évapotranspiration potentielle

D : drainage climatique (Écoulement)

Δr : variations dans les réserves de rétention

Pour un mois situé en saison humide, Les réserves étant maximales, Δr s'annule ; le drainage climatique est égal à : **$P - ETP$**

En période sèche, P devient inférieur à ETP , cette valeur elle-même s'abaisse et elle est remplacée par l'ETR (évapotranspiration réelle), il n'y a aucun drainage.

A la fin de la saison sèche, il y a reconstitution des réserves d'eau, le sol prélève alors une fraction des précipitations, estimée en moyenne à 100 mm (valeur très approximative).

Pour l'ensemble de l'année, le drainage climatique (écoulement) est donné par la formule suivante :

$D = \sum (P - ETP) - 100$ (seules prises en compte les valeurs mensuelles positives : $P - ETP$)

VI. 12. Déficit en eau

Le déficit en eau est la comparaison entre les besoins mensuelle des plantes avec la Quantité d'eau disponible par le sol au cours de la période de végétation

VI.12.1. Déficit pluviométrique (climatique)

Déficit pluviométrique ou climatique est la différence entre l'ETP et le module pluviométrique correspondant : $dp = ETP - P$

P correspond à la pluviométrie, exprimée en millimètres.

- ETP est l'évapotranspiration potentielle en millimètres
- Il est important de noter que les excédents de précipitation sont perdus par infiltration et Ruissellement et ne viennent pas de compenser les déficits des autres mois, et on résulte que le déficit pluviométrique annuelle évaluée mois par mois

VI.12.2. Déficit agricole

Il n'est pas nécessaire de fournir au sol chaque mois la totalité de déficit pluviométrique si le sol peut mettre a la disposition de la plante une certain quantité d'eau prise par sa réserve utilisable $da = ETP - P - Kc$.

$$RFU_{da} = dp - Kc \cdot RU$$

RFU est la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire la réserve d'eau dans le sol disponible pour les plantes, exprimée en millimètres. Elle vaut $2/3$ de la RU qui est égale au taux d'humidité multiplié par la profondeur atteinte par les racines. Kc coefficient culturale [0,1]

VI.13. Besoin en eau des végétaux

L'eau pluviale est stockée dans le sol sous la forme de réserve d'eau utile (RU), qui est progressivement absorbé par les plantes. En climat tempéré et en année normale, cette RU s'épuise progressivement pendant la saison de végétation et se reconstitue en hiver.

- **Pourquoi déterminer les besoins en eau des cultures ?**

Connaître la valeur des besoins en eau des cultures est à la base de : - Conception des réseaux d'irrigation (calcul du débit de dimensionnement des Ouvrages), - Gestion des réseaux d'irrigation : prévision à court terme (programmation des Apports d'eau), - Planification de l'utilisation des ressources hydrauliques : volume d'eau Nécessaire pour l'irrigation, surfaces irrigables au vu des ressources, etc

VI.13.1. Mode de l'utilisation de la RU par les plantes

Comment les racines utilisent-elles la RU ? Pour répondre à cette question, il convient de prendre en considération deux éléments :

1° la disponibilité de la RU, 2° l'espace racinaire effectif

1° **Disponibilité de la RU** : L'eau utile devient de plus en plus difficile à absorber à mesure qu'elle s'épuise dans le sol.

2° **L'espace racinaire** : Les différentes espèces végétales n'ont pas le même comportement vis-à-vis de la RU, la distribution des racines abondantes ont un grand rôle

VI.13.2. Facteurs de l'alimentation en eau

Trois facteurs importants jouent un rôle important dans modalités de l'alimentation en eau : la saison, les conditions de géomorphologie locales, et enfin l'aptitude de la végétation à utiliser l'eau du sol.

- **Rôle de la saison**

Les données climatiques liées à la zone de culture (précipitations, insolation, vent...) jouent un rôle important dans l'alimentation des plantes.

Les besoins en eau sont faibles au printemps qu'en été, ils diminuent fortement en automne.

- **Conditions de géomorphologie**

L'apparition d'un ruissèlement latéral influence l'alimentation en eau des plantes, (hauts des pentes appauvris au profit des sols situés en bas.

S'il existe une nappe phréatique située à une profondeur optimale (en été), elle fournit un appoint par ascension. Donc il faut tenir compte.

- **Aptitude de la végétation à utiliser l'eau du sol**

La nature des plantes cultivées (espèce, variété) mais également leur stade de végétation influence leurs besoins et leur aptitude à utiliser l'eau du sol

CHAPITRE VII

Relations entre les trois phases du sol

VII.1. Les trois phases du sol

Le sol est un système complexe constitué de 3 phases = solide, liquide et gazeuse.

- La phase solide, c'est la matrice du sol, elle est constituée d'ensembles de particules de taille, de forme et d'orientation variables.
- Les phases liquides et gazeuses occupent le volume des vides inter-particulaires.

Dans la réalité, il est bien sûr impossible de séparer les 3 phases, mais pour exprimer quantitativement leurs proportions, nous les considérerons d'une manière arbitraire et schématique comme des constituants indépendants (voir figure 50).

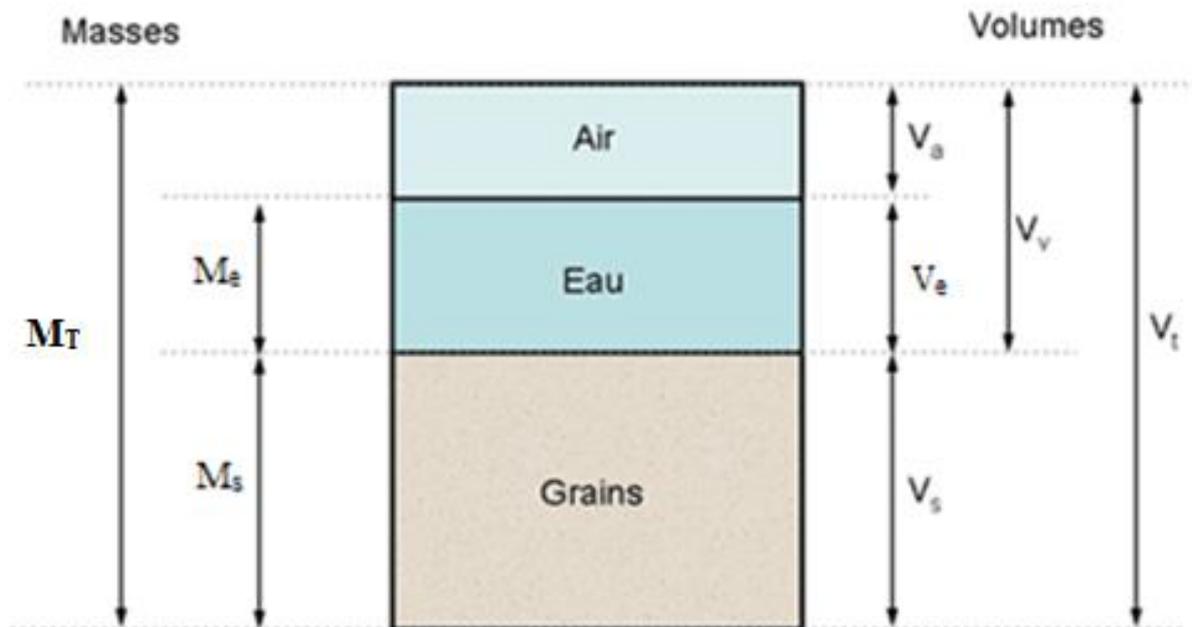


Figure 50 : Représentation schématique des constituants du sol

M_T : masse totale

M_e : masse de l'eau

M_s : masse des solides

$M_T = M_e + M_s$ car la masse de l'air est négligeable

V_T : volume total

V_s : volume de solide

V_e : volume d'eau

V_a : volume d'air

V_v : volume de vides ($= V_a + V_e$)

Les relations entre les différents volumes sont représentées par les équations suivantes :

$$V_T = V_s + V_v = V_s + V_a + V_e$$

VII.2. Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol

Les paramètres fondamentaux sur lesquels repose la description générale d'un sol relèvent des relations de masse et de volume caractérisant sa constitution.

VII.2.1. La porosité p

La porosité totale est égale à la proportion de volumes de vides dans le volume total du sol. Si on multiplie la fraction $v = V_v/V_T$ par 100, on obtient un résultat en pourcentage. Sinon, ce rapport est compris entre 0 et 1.

$$p = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_e + V_a}{V_T} = \frac{V_T - V_s}{V_T} = 1 - \frac{V_s}{V_T}$$

D'après la taille des vides, on distingue deux types de porosités

- **La macroporosité** : pouvant être remplis de l'eau de gravité rapidement drainée et souvent colonisés par les racines.
- **La microporosité ou porosité capillaire** : l'eau y circule par capillarité. C'est dans la microporosité qu'est retenue l'essentiel d'eau que les plantes consomment au fur et à mesure de leurs besoins. Quand la microporosité est trop faible (exemple : sols sableux), les sols s'assèchent très vite et les plantes flétrissent.

+ Valeurs indicatives de la porosité totale pour les sols meubles

- Sols argileux silteux : 40-60%
- Sables fins : 40-50%
- Sables moyens : 35-40%
- Sables grossiers : 25-35%
- Gravier : 20-30%
- Sols tourbeux : 80-85%

+ Evaluation de la porosité totale des sols

Katchinski (1983) propose une échelle pour étudier l'évaluation de la porosité totale résumée dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Evaluation de la porosité totale des sols (Katchinski in Kaouritchev, 1983)

Porosité totale	Appréciation qualitative
> 70	Sol gonflé excessivement poreux
55 – 65	Sol excellent, couche arable cultivable
50 – 55	Satisfaisant pour la couche arable
< 55	Insatisfaisant pour la couche arable
40 – 25	Porosité trop basse, caractéristique des horizons illuviaux tassés

VII.2.2. Stock d'eau

Pour un sol d'épaisseur d (mm), l'emmagasinement en eau maximum, exprimé en hauteur équivalente d'eau est :

$$S_{\max} = p \cdot d \text{ (mm)}$$

VII.2.3. La teneur en eau

La quantité de liquide ou d'eau contenue dans le sol est variable dans le temps et dans l'espace. Sa caractérisation est importante et elle est définie par la teneur en eau volumique et la teneur en eau pondérale.

A/ Teneur en eau massique (θ_m)

C'est le rapport entre la masse d'eau contenue dans le sol et la masse de solide (masse du sol sec). Elle s'exprime en %

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

$$\theta_m = \frac{M_e}{M_s} \times 100$$

Cette valeur varie entre 0 et p.

B/ Teneur en eau volumique (θ_v)

C'est le rapport entre le volume d'eau du sol et le volume total (volume des trois phases) du sol ou volume apparent.

$$\theta_v = \frac{V_e}{V_T}$$

Pour un sol d'épaisseur d (mm), la teneur en eau volumique, exprimée en hauteur d'eau équivalente est:

$$S_e = \theta_v \cdot d \text{ (mm)}$$

VII.2.4. Indice(ou degré) de saturation

C'est le rapport entre le volume d'eau et le volume des vides : $S = V_e/V_v$.

Si $S=1$, le sol est complètement saturé

Si $S=0$, le sol est sec

1) Masse volumique (spécifique) des solides (Densité réelle)

La masse volumique d'un solide correspond à sa masse moyenne par unité de volume

$$D = \frac{M_s}{V_s} \text{ (kg/m}^3 \text{ ou g/cm}^3\text{)}$$

2) Masse volumique (spécifique) du sol sec (Densité apparente)

$$D' = \frac{M_s}{V_T} \text{ [Conventionnellement sans unité]}$$

3) Relation entre la porosité et les densités réelle et apparente du sol

$$\frac{D'}{D} = \frac{V_s}{V_T} = \frac{V_T - V_v}{V_T} = 1 - p$$

$$p = \frac{(D - D')}{D}$$

$$P(\%) = \frac{(D - D')}{D} \times 100$$

4) Indice des vides

C'est le rapport entre le volume des vides et le volume de la matière solide :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

5) Relation entre la porosité et l'indice des vides

Il existe une relation entre la porosité et l'indice des vides :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{p \cdot V_T}{V_T - V_v}$$

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{p} - \frac{V_v}{p \cdot V_T} = \frac{1}{p} - 1$$

Donc :

$$e = \frac{p}{1-p} \text{ et } p = \frac{e}{1+e}$$

Références bibliographiques

- Allison, F.E. (1973).** *Soil Organic Matter and Its Role in Crop Production*; Elsevier : Amsterdam, The Netherlands.
- Aubert, G. (1962).** *La classification des sols : la classification pédologique française*. Stiboka.
- Aubert, G. (1963).** *La classification des sols*, Cahiers ORSTOM, sér. Pédol. Paris, no 3, p. 1-7.
- Aubert, G. & Boulaine J. (1967).** *La pédologie*. Presses universitaires de France, Paris, 126 p.
- Aubert, G. & Boulaine, J. (1980).** *La Pédologie*. Presses Universitaires de France, coll. Que Sais-je ? Paris.
- Bachelier, G. (1973).** Faune des sols et termites. In : Les sols ferrallitiques, T. IV. Initiations et Documents Techniques, n° 21, O.R.S.T.O.M. Paris, 107-142
- Bachelier, G. (1978).** *La faune des sols, son écologie et son action*, IDT N°38. ORSTOM., 391p.
- Bachelier, G., & Bachelier, G. (1963).** *La vie animale dans les sols* (Vol. 3). Paris, France : Orstom.
- Baize, D. (2000).** *Guide des analyses en pédologie 2eme édition revue et augmentée*. Edition INRA.s., 391 pp.
- Baize, D., Jamagne, M., & Aubert, G. (2004).** *Pédologie. Encyclopédia universalis. Edition sur CD-ROM. Paris.*
- Baize, D., Duval, O. & Richard, G., (2013).** Les sols et leurs structures Observations à différentes échelles. Éditions Quæ, France, 20p.
- Berner, A., Böhm, H., Brandhuber, R., Braun, J., Brede, U, Roesgen, J LCV, Demmel, M, Dierauer H., Ewald B., Fließbach A., Fuchs J., Gattinger A., Heß J., Hülsbergen K.J., Köchli, M., Kolbe, H., Koller, M., Mäder, P., Müller, A., Patzel, N., Pfiffner, L., Schmidt, H., Weller, S., Wild, M (2013).** Les principes de la fertilité du sol, Bio Suisse. 32 pp.
- Bispo, A., & Ranjard, L. (2016).** Biologie du sol: comment la diagnostiquer et la piloter en agriculture. In *Rencontre Agroécologie, Salon International de l'Agriculture SIA 2016* (p. np).

- Blagodatsky, S., & Smith, P. (2012).** Soil physics meets soil biology : towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 47, 78-92.
- Boiffin, J., & Marin-Lafleche, A. (1990).** La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur, Laon (France), 9 janvier 1990.
- Bohn, H.L., Myer, R.A., & O'Connor, G. A. (2002).** *Soil chemistry*. John Wiley & Sons.
- Bouché, M.B. (1972).** Lombriciens de France. Ecologie et Systématique. I.N.R.A. (Ann. Zool.-écol. anim. Numérohors-série 72/2), Paris, 671p.
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2010).** The Nature and Properties of Soils 13th Ed. Pearson Education.
- Brewer, R., & Sleeman, J. R. (1988).** *Soil structure and fabric*. CSIRO PUBLISHING.
- Brown G. G., Barois I. & Lavelle P. (2000).** "Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains." *European Journal of Soil Biology*, 36(3), 177-198.
- Brown G.G., Pashanasi B., Gilot-Villenave C. et al. (1999).** Effects of earthworms on plant growth. In : Lavelle P., Brussaard L. et Hendrix P. (Eds) Earthworm management in tropical agroecosystems, CAB INTERNATIONAL, WALLINGFORD, pp. 87-148.
- Brown, G. G., Pashanasi, B., Gilot-Villenave, C., Patron, J. C., Senapati, B. K., Giri, S., ... & Boyer, J. (1999).** Effects of earthworms on plant production in the tropics. In : Earthworm Management in Tropical Agroecosystems (eds P. Lavelle, L. Brussaard & P. Hendrix), pp. 87-148. CAB International, Wallingford.
- Burges,A. & Raw, F. (1967).** Soil Biology. Academic Press, New York.
- Calvet, R. (2003).** Le sol : propriétés et fonctions. Éditions France Agricole - Dunod, Paris, France.
- Capot-Rey, R. (1955).** Les sols d'Algérie d'après Mr JH DURAND. In *Annales de Géographie* (Vol. 64, No. 341, pp. 56-58). Armand Colin.
- Cayuela, M. L., Clause, J., Frouz, J., & Baveye, P. C. (2020).** Interactive feedbacks between soil fauna and soil processes. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 14.

- Chaussod, R., Breuil, M. C., Echairi, A., Nouaïm, R., Nowak, V., & Ranjard, L. (1996).** La qualité biologique des sols. *Évaluation et implications, Étude et gestion des sols*, 3, 261-278.
- Chen, Y., & Avnimelech, Y. (1986).** *The role of organic matter in modern agriculture* (Vol. 25). Springer Science & Business Media.
- Clarholm, M. (1985).** Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen, *Soil Biol. and Biochem.* 17 : 181-187.
- Dabin, B., & Ségalen, P. (1970).** Le sol, sa définition, ses constituants. *Techniques rurales en Afrique: Pédologie et développement*, 10, 29-42.
- Davet, P. (1996).** *Vie microbienne du sol et production végétale*. Editions Quae. 383 p.
- Deprince, A. (2003).** La faune du sol. Diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 49(49), 123-138.
- Dindal, D.L. (1990).** *Soil Biology Guide*. Wiley et Sons, NY. 1349 pp.
- Dommergues, Y. & Mangenot, F. (1972).** *Ecologie Microbienne du Sol*. Masson & Cie, Paris.
- Dosso, M., & Ruellan, A. (1993).** La couverture pédologique : histoire de sa découverte ; actualité de son exploration (Soil cover: an history of its discovery, present aspects of its exploration). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 70(2), 77-85.
- Drouet, T. (2010).** *Pédologie*. Eds, Book Pédologie. BING-F-302. Ed. Lagev, 140p.
- Duchaufour, P. (1961).** Données nouvelles sur la classification des sols. In *Annales de l'école nationale des eaux et forêts et de la station de recherches et expériences*. ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA).
- Duchaufour, P. (2001).** Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement. Ed. Dunod, Paris 331 p.
- Duchaufour, P. (1982).** *Pedology: Pedogenesis and Classification*. Translated by T. R. Paton. London : George Allen & Unwin.
- Duché, J. (1962).** *La biologie des sols*. Paris : PUF.
- Edwards, C.A. & Lofty, J.R. (1977).** *Biology of earthworms*. Second edition. Chapman and Hall,
- Edwards, C.A. & Bohlen, P.J. (1996).** *Biology and Ecology of earthworm* (3rd edition). Chapman and Hall, London.

- Frouz, J. (2018).** Effects of soil macro-and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 332, 161-172.
- Fortin, J.A., Plenchette, C. & Piché, Y. (2016).** Les mycorhizes : l'essor de la nouvelle révolution verte. Eds Quae.
- Garbaye, J. (2013).** La symbiose mycorhizienne : une association entre les plantes et les champignons. Editions Quae
- Geisen, S., Mitchell, E. A., Adl, S., Bonkowski, M., Dunthorn, M., Ekelund, F., ... & Lara, E. (2018).** Soil protists : a fertile frontier in soil biology research. *FEMS Microbiology Reviews*, 42(3), 293-323.
- Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010).** *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols* (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.
- Green, L. H., & Goldman, E. (2021).** *Practical handbook of microbiology*. CRC press.
- Gregory, P. J., & Nortcliff, S. (2013).** *Soil conditions and plant growth* (Vol. 472). New York : Wiley-Blackwell
- Huber, G., & Schaub, C. (2011).** La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. *Agriculture et terroir, chambre d'agriculture Bas Rhin*.
- Jabiol, B., Brêthes, A., Brun, J. J., Ponge, J. F., & Toutain, F. (1994).** Une classification morphologique et fonctionnelle des formes d'humus: propositions du Référentiel Pédologique 1992. *Revue forestière française*, 46(2), 152-166.
- Janssen, P.H. (2006).** Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genes. *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 1719–1728.
- Jouquet P., Dauber J., Lagerlöf J., Lavelle P. & Lepage M. (2006).** "Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops." *Applied SoilEcology*, 32: 153-164.
- Kononova, M. (2013).** Soil organic matter: Its nature, its role in soil formation and in soil fertility. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Kumada, K. (1988).** *Chemistry of soil organic matter*. Elsevier. Tokyo.
- Lee K.E. (1985).** Earthworms : their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press, Sydney. Sturny W.G., 1998 - Le semis direct, élément d'un nouvel itinéraire cultural *Agrarforschung* 5(05) : 233-236
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015).** The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68.

- Lehman, R. M., Acosta-Martinez, V., Buyer, J. S., Cambardella, C. A., Collins, H. P., Ducey, T. F., ... & Stott, D. E. (2015).** Soil biology for resilient, healthy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(1), 12A-18A.
- Magdoff, F., & Weil, R. R. (2004).** *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC press.
- Mathieu, C., & Lozet, J. (2011).** *Dictionnaire encyclopédique de science du sol (5e ed.)*. Lavoisier.
- Mathieu, C., Pieltain, F., & Jeanroy, E. (2003).** *Analyse chimique des sols: Méthodes choisies*. Tec & doc.
- Mathieu, C., Pieltain, F., ASSELINE JEAN (COLLAB.), Chossat, J.C. (collab.), VALENTIN CHRISTIAN (COLLAB.)(1998).** *Analyse physique des sols : méthodes choisies*. Paris : Lavoisier, 275 p. ISBN 2-7430-0283-2.
- Muller, J. P., & Gavaud, M. (1979).** Les sols. *Atlas de la République unie du Cameroun*, 25-27.
- Musy, A., et Soutter, M. (1991).** *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 335p
- Neina, D. (2019).** The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and environmental soil science*, 2019, 1-9.
- Paul, E.A., (2015).** Soil microbiology, ecology and biochemistry: an exciting present and great future built on basic knowledge and unifying concepts. In: Paul, E.A. (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*, fourth ed. Academic Press San Diego, pp. 1-14.
- Pinton, R., Varanini, Z., & Nannipieri, P. (2007).** *The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*. CRC press.
- Pomel, S. (2008).** *La mémoire des sols*. Presses Univ de Bordeaux, 343 p.
- Pétard, J. (1993).** Les méthodes d'analyse. *Analyse de sols*.
- Potapov, A. M., Beaulieu, F., Birkhofer, K., Bluhm, S. L., Degtyarev, M. I., Devetter, M., ... & Scheu, S. (2022).** Feeding habits and multifunctional classification of soil-associated consumers from protists to vertebrates. *Biological Reviews*, 97(3), 1057-1117.
- Rengel, Z. (2003).** *Handbook of soil acidity (Vol. 94)*. CRC press.

- Rees, R. M., Ball, B. C., Campbell, C. D., & Watson, C. A. (2001).** *Sustainable management of soil organic matter*. CABI publishing.
- Robert, M. (1996).** *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Masson, Paris, p.241
- Roger, P., Garcia, J. L., & de Marseille, A. I. (2001).** Introduction à la microbiologie du sol. Polycopié de cours: Université de Provence, Université de la Méditerranée Ecole Supérieure d'Ingenieurs de Luminy, France. 191p.
- Ruellan, A. (2010).** *Des sols et des hommes : un lien menacé*. IRD éditions, Paris.106 p.
- Ruiz, N., Lavelle, P., & Jiménez, J. (2008).** *Soil macrofauna field manual*. Technical level.
- Ruiz-Camacho, N. (2011).** Indice Biologique de la Qualité des Sols (IBQS) : Bio-indicateur de la qualité des sols basés sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre France-Nord.
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/indice-biologique-qualitésols-ibqs-2011.pdf>.
- Santos, S. N., Kavamura, V. N., da Silva, J. L., de Melo, I. S., & Andreote, F. D. (2011).** Plant growth promoter rhizobacteria in plants inhabiting harsh tropical environments and its role in agricultural improvements. *Plant growth and health promoting bacteria*, 251-272.
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., & Margesin, R. (2012).** *Methods in soil biology*. Springer Science & business media.
- Schnebelen N. (2005).** Le sol et le cycle de l'eau. Lettre du Gis Sol, 7, pp.1. hal-02670343
- Schnitzer, M. & Khan, S.U. (1998).** Soil organic matter. Elsevier science publishing company INC, New York.
- Segalen, P. (1977).** Les classifications des sols. *Revue critique. Service Scientifique Centre de l'URSUM. Chapitre, 2*, 1-64.
- Sendra, A., Jiménez-Valverde, A., Selfa, J., & Reboleira, A. S. P. (2021).** Diversity, ecology, distribution and biogeography of Diplura. *Insect Conservation and Diversity*, 14(4), 415-425.

- Soltner, D. (1996).** Les bases de la production végétale, Tome I: le sol et son amélioration. 21^e édit., Collection Science et Techniques Agricoles, ISBN: 2-907710-16-8, 464 p.
- Stengel, P., Gelin, S. (1998).** *Sol: interface fragile*. INRA Editions Quae, 222 p.
- Stroosnijder, L., & Koné, D. (1982).** Le bilan d'eau du sol. In *La productivité des paturages Sahéliens* (No. 918, pp. 133-165). Pudoc.
- Stewart, B. A., & Hartge, K. H. (1995).** *Soil structure: its development and function* (Vol. 7). CRC Press.
- Tan, K.H. (1998).** Principles of Soil Chemistry, 521 p. Marcel Dekker, New York.
- Ulrich, B., & Sumner, M. E. (Eds.). (2012).** *Soil acidity*. Springer Science & Business Media
- Van der Drift, J. (1974).** La vie dans les sols- aspects nouveaux, études expérimentales. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 17(1), 126-127.
- Vaughan, D., & Malcolm, R. E. (2012).** *Soil organic matter and biological activity* (Vol. 16). Springer Science & Business Media.
- Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais-Hesse, A. & Schwartz, C. (2015).** Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahiers Demeter*, 15, pp.53-68.
- Wouters, J. (1991).** Gestion de la matière organique dans les sols tropicaux. *Tropicultura*, 9(2), 81-85.
- Wood, T. G. & Sands, W. A. (1978).** The role of termites in ecosystems. *Production Ecology of Ants and Termites* 13, 245–292.
- Wood, M., & Wood, M. (1989).** *Soil biology* (pp. 154-pp). Springer New York, NY

<http://jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO5.pdf>

<https://agronomie.info/fr/mesure-de-la-porosite-totale-du-sol/>