

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université 20 Août 1955 de Skikda
Faculté des Sciences
Département des Sciences de la Nature et de la Vie « SNV »**



**Support de Cours pour la Filière Ecologie et Environnement
« 2^{ème} Année »**

Pédologie

Préparé Par : Dr. FEKRACHE Fadila

Année universitaire : 2022/2023

Contenu de la matière

1. Introduction : Définition du sol et pédogénèse.....	1
2. Les éléments constitutifs du sol.....	6
- Les constituants minéraux.....	6
- Les constituants organiques.....	20
- Les complexes colloïdaux.....	22
3. L'organisation morphologique des sols.....	31
- Les organisations élémentaires.....	31
- La couverture pédologique.....	33
- L'horizon pédologique - Les profils pédologiques.....	34
- Le sol et l'eau.....	38
- L'atmosphère du sol.....	39
- La température du sol.....	39
- La couleur du sol.....	42
4. Les propriétés chimiques et biologiques du sol.....	43
- Les phénomènes d'échanges des ions.....	43
- Les propriétés électroniques du sol.....	46
- Les transformations d'origine microbienne.....	48
- Les organismes du sol.....	55
5. Classification des sols.....	105
- La classification des sols.....	105
- Les différentes classifications (Russe, Américaine, Française).....	105
- Les sols d'Algérie et leur relation avec le climat et la géomorphologie.....	112

Introduction

La pédologie étudie la genèse, les propriétés et la classification des sols. Elle trouve de nombreuses applications notamment dans le domaine agronomique (pédologie agricole ou forestière, conservation des sols...).

Qu'est-ce que le sol ? Le sol est le matériel plus ou moins friable où les plantes, au moyen de leurs racines, trouvent leur nourriture et leurs autres conditions de croissance. Le sol est la partie superficielle meuble de l'écorce terrestre, considérée habituellement sur une épaisseur maximale de 1.25 m. Le sol est la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques. Le sol est un milieu dynamique qui évolue au cours du temps.

L'étude des sols peut être abordée de diverses manières :

- Une approche agronomique : le sol est envisagé comme le milieu naturel au sein duquel croissent les plantes cultivées. C'est donc la gestion correcte de ce "capital sol" qui intéressera l'agronome par l'amélioration de son niveau de fertilité ou par les mesures conservatoires qu'il peut lui apporter.
- L'approche écologique vise plutôt à replacer le sol dans un contexte écosystémique. Un des objectifs majeurs sera dès lors l'étude causale des relations réciproques sol – couverture végétale – facteurs climatiques.

Formation d'un sol (Processus de pédogenèse)

La pédogénèse est un ensemble de processus progressifs qui passe par plusieurs étapes. Ces étapes au nombre de trois sont les suivantes:

- 1^{ère} étape : Désagrégation et altération d'une roche.
- 2^{ème} étape : Enrichissement en matière organique.
- 3^{ème} étape : Déplacements verticaux ou migration de substances donnant au sol son profil.

Introduction

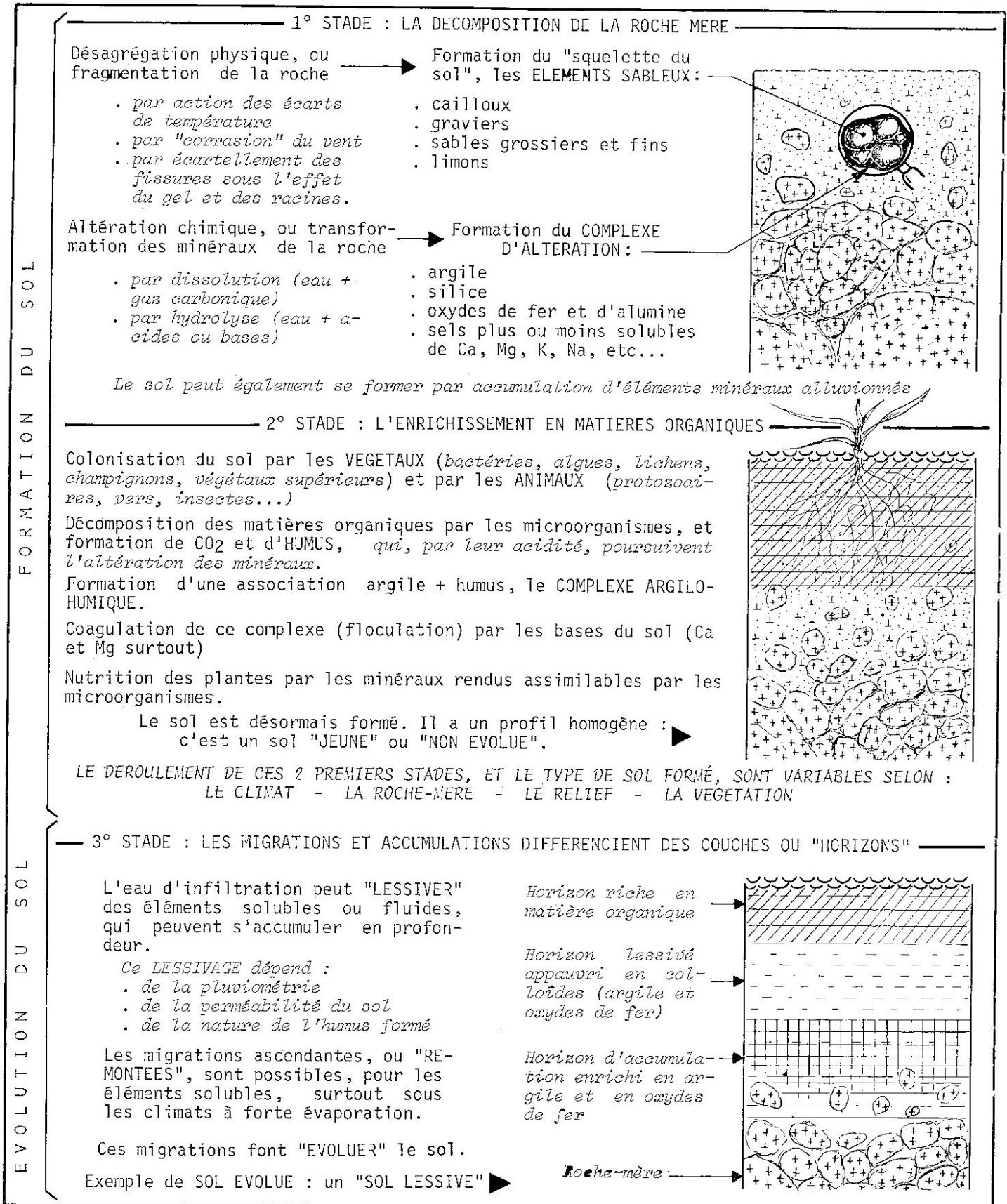


Figure 1 : Formation d'un sol (Processus de pédogenèse)

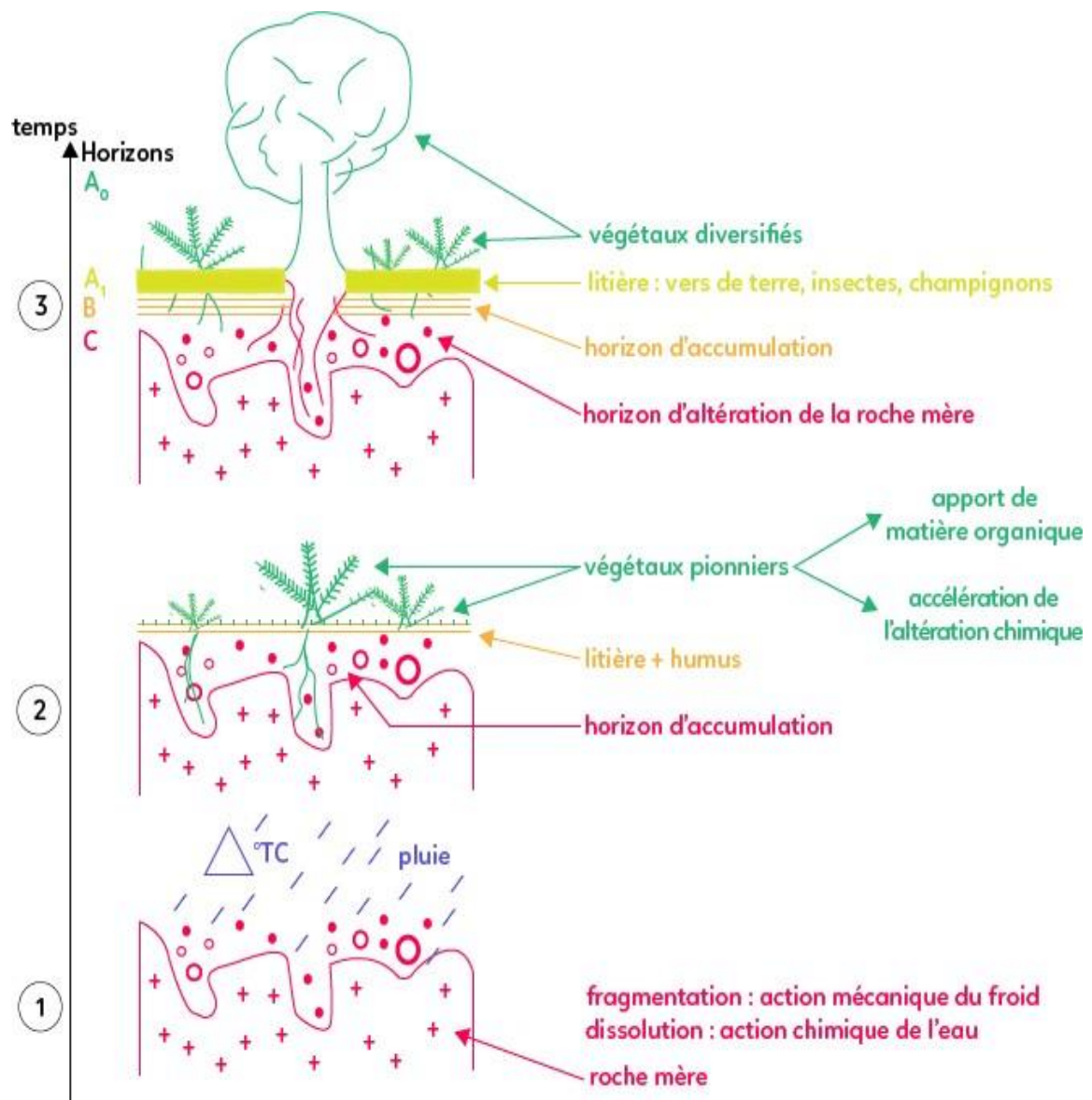


Figure 2 : Les étapes de la formation d'un sol

Étape 1 : la roche mère originelle (désagrégation et altération d'une roche)

Tout commence au niveau d'une **roche mère**, comme une roche mère continentale, du granit par exemple. Par le biais d'**altérations mécaniques et chimiques**, cette roche mère **se fracture**, se dégrade et s'altère. Le gel et le dégel engendrent des craquements et des craquelures au sein de la roche, des fractures. La **pluie** induit une altération chimique : une dissolution des minéraux présents dans la roche. Au temps 1, il y a donc une fragmentation de cette roche mère par l'action mécanique du **froid**, du **gel** et du **dégel** ou encore du **vent**, et une dissolution par le biais de l'**eau de pluie** plus ou moins **acide**.

En générale un sol provient de la décomposition d'une roche que l'on appelle pour cette raison

Introduction

« roche mère » remarquons qu'il peut s'agir aussi bien d'une roche dure (granite, schiste, grés), que d'une roche tendre (craie, marne, argile..) ou d'une roche meuble (sable, éboulis, loess...). L'intensité de la désagrégation (phénomène physique) et de l'altération (phénomène chimique) dépend du climat véritable moteur de la formation des sols, le résultat de ces deux phénomènes est d'abord un mélange :

- Des matériaux plus ou moins désagrégés mais non altérés comme (les blocs, pierre, gravier, grains de sable poudre de limon, ..)
- Des matériaux sous forme de pate (complexe d'altération) provenant de l'altération chimiques des minéraux comme (pate d'argile, composée par des oxydes de fer, sels de calcium de magnésium de sodium sous des formes plus ou moins solubles.

Étape 2 : la mise en place du sol

Le temps passe, et apparait un début de colonisation de cette roche par des végétaux pionniers, qui sont peu exigeants d'un point de vue écologique. (Lichens, mousses fougères.). Ces végétaux pionniers apportent de la matière organique. Par le processus de la photosynthèse, on voit changer au niveau du sol du carbone minéral en carbone organique ces végétaux par leurs racines principalement, accélèrent le processus d'altération de la roche. Les racines exercent une action mécanique et altèrent la roche en poussant. Elles exercent également une action chimique puisque l'absorption racinaire produit des sorties d'ions, notamment des ions H^+ très acides qui altèrent la roche chimiquement. Il Ya alors la création d'une litière, un ensemble de débris végétaux, associés en dessous à l'humus, un mélange de matière organique en processus de décomposition par des microorganismes décomposeurs et matière minérale. Enfin un horizon d'accumulation commence à se créer : des éléments lessivés par l'eau s'accumulent. C'est le début de la mise en place au sens strict du sol avec un ensemble se strates parallèles avec du mélange organique du mélange minérale. En d'autre terme le sol ne prend naissance que lorsque à ces minéraux s'ajoutent des constituants organiques c'est-à-dire provenant d'organismes végétaux et animaux, à partir de ce moment, les débris organiques (surtout végétaux) aboutissent à la formation des substances noires, plus ou moins pâteuses, réunies sous le nom d'humus

Étape 3 : les migrations des substances font évoluer le sol

Enfin, le temps passe, et si le climat est propice à l'installation de la végétation, se développent des végétaux très diversifiés comme des arbres, des arbustes et des herbes. Ces végétaux sont accompagnés d'une faune importante. Au niveau de la faune, des organismes indispensables à l'aération du sol sont les vers de terre, aussi appelés lombrics. Autres

Introduction

organismes, les insectes, les champignons et les bactéries qui jouent un rôle important dans la décomposition de l'humus. La litière s'épaissit en dessous l'horizon d'accumulation est toujours présent. En dessous l'horizon d'altération de la roche mère continue de se creuser. En d'autres termes, dans ce sol encore jeune et qui continue à s'approfondir, les mouvements de l'eau vers le bas et vers le haut vont faire subir aux éléments solubles et colloïdaux (sels de calcium, oxydes de fer, argiles, humus) des déplacements appelés « migration »

Introduction

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

1. Les constituants fondamentaux du sol

Comme l'illustre le tableau ci-dessous, le sol est constitué de trois fractions :

- **Une fraction solide** : composée de constituants minéraux (sables, argile.....) et de constituants organiques.
- **Une fraction liquide (encore appelée solution du sol)** : composée d'eau dans laquelle sont dissoutes des substances solides provenant à la fois de l'altération des roches, de la minéralisation des matières organiques et des apports par l'homme (apports d'engrais solubles par exemple).
- **Une fraction gazeuse ou atmosphère du sol** : composée des mêmes gaz que l'air, avec en plus des gaz provenant de la décomposition des matières organiques.

Tableau 1 : Les éléments constitutifs du sol

CONSTITUANTS SOLIDES		CONSTITUANTS LIQUIDES	CONSTITUANTS GAZEUX
Constituants minéraux	Constituants organiques	Solution du sol	Air du sol
<u>Terre fine du sol</u> : Argiles, limons fins, limons grossiers, sable fins, sable grossiers.	<u>Matières organiques fraîche</u> : Constituants des tissus végétaux cellulose. Déjections animales et animaux morts.	<u>Eau du sol</u> <u>Éléments solubles dissous</u> : Substances organiques (acides organiques, sucres,...) Ions dans l'eau du sol : Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , PO_4^{-3} ...	<u>Constituants de l'air</u> : O_2 , N_2 , CO_2 . <u>Gaz issus de l'activité des animaux du sols et des processus de décomposition</u> : CO_2 , H_2 , CH_4
<u>Éléments grossiers</u> : Graviers, Cailloux, Pierre, Blocs.	<u>Matières humiques</u> : Matière organiques transformées.		

1.1. Les constituants minéraux du sol

L'analyse granulométrique du sol consiste à classer les éléments minéraux du sol d'après leur grosseur, et à déterminer le pourcentage de chaque fraction. Les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre :

Tableau 2 : Les constituants minéraux du sol

TERRE FINE	Argile	Particules de moins de 2µm
	Limons fins	2 à 20 µm
	Limons grossiers	20 à 50 µm
	Sables fins	50 à 200 µm
	Sables grossiers	200 à 2 mm
ELEMENTS GROSSIERS	Graviers	2 à 20 mm
	Cailloux	2 à 7.5 cm
	Pierres	7.5 à 20 cm
	Blocs	> 20 cm

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

L'ensemble formé par les argiles, les limons et les sables forme la **terre fine** du sol, tandis que cailloux et graviers constituent les **éléments grossiers**. La classification granulométrique sert à définir la **texture** du sol.

1.2. 1. Les caractéristiques granulométriques du sol

Pour déterminer les caractéristiques granulométriques d'un sol on utilise au laboratoire une technique qu'on appelle : l'analyse granulométrique (compositions granulométriques)

Cette technique permet de classer les éléments minéraux d'après leur taille ou leur grosseur et de déterminer le pourcentage des différentes fractions.

Le sol ramené au laboratoire est séché puis broyé et tamisé sur un tamis de 2 mm. Ce tamisage permet de séparer le sol en deux parties :

- ✓ **La terre fine** : dont les particules ont une taille inférieure < 2mm.
- ✓ **Les éléments grossiers** : constitués des particules dont la taille est > 2mm.

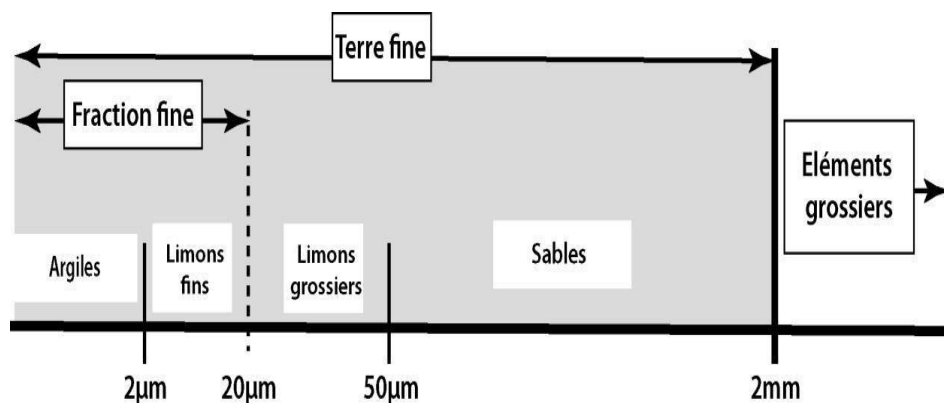


Figure 3 : Les constituants minéraux du sol

Les propriétés physiques des sols sont liées à deux notions fondamentales : la **texture**, composition élémentaire, lorsque tous les agrégats ont été détruits et la **structure**, manière dont ces éléments sont groupés en agrégats. C'est de ces deux facteurs que dépendent les comportements de l'air et de l'eau dans le sol. Il est possible de regrouper les textures en quatre classes fondamentales, qui permettent de définir les principales propriétés du sol.

La texture du sol :

La texture est définie par les proportions relatives (%) de particules argileuses, limoneuses et sableuses qui constituent la terre fine du sol. Elle peut être appréciée au toucher sur terrain ou déterminée au laboratoire (analyse granulométrique) où l'échantillon de sol subit divers traitements :

- Tamisage afin d'éliminer le squelette (fractions > 2 mm),

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

- Destruction de la matière organique,
- Destruction du calcaire,
- Dispersion et agitation afin de démonter les agrégats,
- Sédimentation différentielle et séparation des différentes fractions,
- Dessiccation, tamisage et pesée des différentes fractions.

Les classes de texture peuvent être délimitées graphiquement dans un triangle dont chaque côté soutient une échelle graduée (argile, limon ou sable).

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

Tableau 3 : Les quatre classes fondamentales de la texture du sol

Texture	Les principales propriétés
Texture sableuse	<p>Sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les sables grossiers 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.
Texture limoneuse	<p>L'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et calcium.</p> <p>Les limons rendent le sol « battant » : le sol a tendance à se tasser en surface sous l'effet des pluies et à former des coutes (glaçage en surface).</p> <p>Ils ont tendance à retenir l'eau en s'opposant à son infiltration en profondeur : le sol est imperméable en surface, asphyxiant pour les plantes.</p>
Texture argileuse	<p>Sol chimiquement riche, mais à piètres propriétés physiques; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines ; travail du sol difficile, en raison de la forte plasticité (état humide), ou de la compacité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en partie ces propriétés défavorables.</p>
Texture équilibrée	<p>Elle correspond à l'optimum, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.</p> <p>Exemple de granulométrie favorable à la culture : 20 à 25 % d'argile, 30 à 35 % de limons, 40 à 50 % de sables.</p>

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

1.2.2. Les éléments grossiers

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 peut appeler des sols squelettiques (certains sols de montagne par exemple). Leurs rôles peuvent être résumés de la façon suivante :

- Ils constituent la réserve minérale du sol : leur altération chimique libère des éléments minéraux qui contribuent à l'alimentation des plantes (signalons cependant que les grains de quartz sont cependant quasi inaltérables chimiquement, et ne peuvent participer à l'alimentation des plantes).
- Ils augmentent la perméabilité du sol à l'eau et à l'air.
- Ils diminuent le volume de sol prospectable pour les plantes (par diminution de la proportion de la terre fine à la disposition des racines).
- Ils peuvent avoir une action sur la chaleur du sol, en tant que réservoir de chaleur (terrains calcaires par exemple).
- Ils peuvent participer à constituer une réserve d'eau : certaines roches poreuses (calcaires par exemple) peuvent retenir un peu d'eau.

1.2.3. Les argiles

Définition

Les argiles sont des roches silicatées en feuillets (phyllosilicates), riches en alumine et plus ou moins hydratées. Elles présentent comme des particules extrêmement fines (de l'ordre 2 micromètres de diamètre), ayant dans l'eau ou la solution des sols des propriétés colloïdales (dispersion, floculation, adsorption), de fortes affinités avec l'eau ce qui leur confère une bonne plasticité, des propriétés importantes de compaction par expulsion d'eau. Les argiles confèrent aux sols dans lesquels elles sont présentes, des propriétés particulières qui sont dues à leur très petite taille, à leur structure en feuillets et à la charge négative qu'elles portent (colloïdes électronégatifs). Une argile peut être définie en fonction de critères :

- Granulométriques
- Minéralogiques

Au point de vue **granulométrique**,

En pédologie et mécanique des sols, une argile (ou fraction argileuse d'un sol) est définie comme étant la fraction inférieure à 2 microns.

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

Au point de vue **minéralogique**,

Les minéraux argileux appartiennent à la famille des phyllosilicates (ou silicates à structure foliaire). Leurs structures sont bâties sur deux types de "briques" élémentaires :

- Tétraèdres
- Octaèdres

Organisés en couches tétraédriques et couches octaédriques distinctes.

Propriétés physico-chimiques des argiles

L'argile est hydrophile, c'est-à-dire l'aptitude de fixer l'eau, cette aptitude entraîne trois autres propriétés de l'argile :

- La plasticité, aptitude à être modelée
- L'adhésivité, faculté de coller
- Le gonflement et le retrait, aptitude de l'argile à changer de volume selon l'humidité.

L'argile, en tant que colloïde négatif, intervient dans la fertilité chimique du sol en fixant les cations tels que K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} ,.....Signalons en outre, que l'argile peut également fixer des ions négatifs par l'intermédiaire des hydroxydes d'Al ou de Fer ou par l'intermédiaire des charges positives qu'elle porte. L'argile peut être à l'état dispersé ou flocculé :

- **A l'état dispersé** : l'argile perd son aptitude à souder solidement les agrégats car elle cherche à reformer avec l'eau un mélange homogène : sous l'effet des pluies, il y a dégradation de la structure qui devient compacte et asphyxiant pour les racines.
- **A l'état flocculé** : l'argile forme des agrégats en soudant les différents éléments du sol. La structure de surface résiste à la dégradation par la pluie : le sol reste perméable à l'eau et à l'air, meuble, entretenant et de microflore du sol.

Comme tous ces éléments sont à l'état ionique, le matériau doit rester globalement neutre. S'il y a équilibre entre les charges, comme c'est le cas dans les exemples précédents, le feuillet est neutre.

Cependant la structure des argiles est généralement compliquée par des substitutions partielles : Si^{+4} substitué par Al^{+3} dans la couche T Al^{+3} par Mg^{+2} ou Fe^{+2} dans la couche O.

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

Ces substitutions entraînent un déficit de charges positives. Dans ce cas, la neutralité électrique des feuillets n'est plus réalisée. La neutralité globale est obtenue par l'adsorption de cations dans l'espace interfoliaire, qui se garnit de cations K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , eux-mêmes secs ou hydratés. Selon leur nature et celle de l'argile, ces ions adsorbés sont plus ou moins liés et échangeables. Certaines argiles ont donc la capacité de fixer et d'échanger des ions (principalement des cations) (Cation Exchange Capacity CEC). La classification des argiles dépend alors en grande partie de l'importance du déficit de charge, de la position des substitutions (dans les couches T ou O) et des capacités d'échange des cations. Un feuillet et son espace interfoliaire constituent l'unité structurale (« unit structure »), qui aura donc différentes épaisseurs typiques, de 7 à 31 Å (Angström) selon les argiles et l'environnement.

Propriétés colloïdales

Les argiles possèdent sur leur surface des charges négatives : ce sont des colloïdes négatifs. Ces particules, toutes chargées négativement peuvent alors se repousser mutuellement: c'est ce qui se passe dans l'eau distillée.

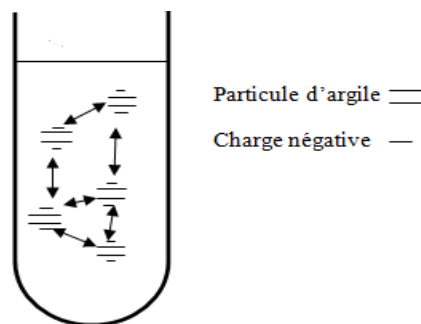


Figure 4 : Les propriétés colloïdales de l'argile

Les particules restent longtemps en suspension dans l'eau à cause des charges négatives qu'elles portent et qui provoquent des phénomènes de répulsion entre particules. Par contre, si l'on introduit dans le liquide un acide, qui libère des ions, ou un sel de calcium qui libère des cations Ca^{+2} , ces ions positifs vont induire la neutralisation des charges négatives des micelles, qui peuvent alors s'agglutiner et se déposer : ce phénomène s'appelle la floculation (précipitation). En fait, les ions positifs supplémentaires vont refouler vers les micelles d'argile les ions positifs qui les entouraient déjà. Ces ions venant s'y accoler, neutralisent les charges négatives des micelles.

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

Floculation et dispersion des argiles en conditions de laboratoire

✓ Action des acides et des bases

Les acides, libèrent des ions H^+ , provoquent la floculation des argiles. Les bases au contraire libèrent des ions OH^- et provoquent la dispersion des argiles. En effet, ces ions négatifs éloignent les cations des argiles, qui de nouveau se repoussent mutuellement.

On peut résumer tout ceci par l'équation :



✓ Influence de la nature des ions sur la floculation

K^+ , H^+ , Na^+ , n'ont qu'un faible pouvoir floculant.

Ca^{+2} , Mg^{+2} et Al^{+3} floculent bien les argiles.

Le pouvoir floculant du sodium s'exerce par exemple lors la sédimentation des boues transportées par les fleuves et rivières, au contact des eaux des mers ou océans. Le sodium de l'eau de mer va provoquer la floculation des argiles de ces boues, qui vont alors sédimenter.

Pouvoir floculant ou dispersant de certains cations sur le terrain

Le calcium Ca^{+2} : c'est l'ion floculant par excellence.

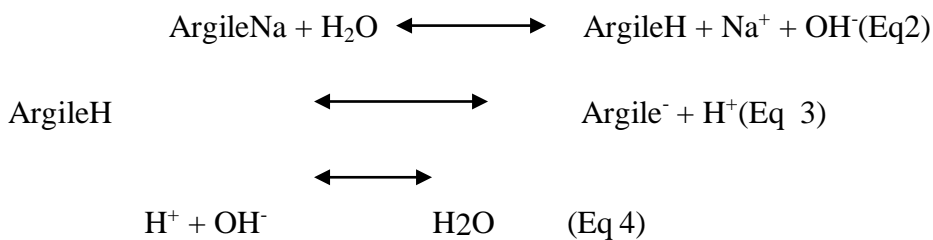
Le magnésium Mg^{+2} : souvent associés au calcium, il aura une action analogue, bien que moins énergétique.

L'ion Al^{+3} : alors que Ca^{+2} et Mg^{+2} sont les principaux ions floculant en milieu neutre ou faiblement basique (pH=7 à 8), les ions Al^{+3} (ou sous forme d'hydroxydes) exerce de façon prépondérante leur action floculante en milieu acide (pH inférieur à 5.5).

- **Les ions Ca^{+2} , Mg^{+2} et Al^{+3}** jouant un rôle important en ce qui concerne la stabilité de la structure du sol (stabilité et solidité des agrégats), on remarquera que la gamme de pH comprise entre 5.5 et 6.5 est périlleuse pour la stabilité structurale du sol, car il n'y a plus d' Al^{+3} et pas encore assez de Ca^{+2} : le risque de destruction et de compaction est très fort. Cependant, concernant les milieux acides, il est important d'apporter la nuance suivante : lorsque le sol est très acide, caractérisé par des moder ou des mor, la matière organique se biodégradable lentement et produit des substances organiques de faible valeur ou défavorables pour la structure du sol, ce qui contrarie l'action floculant des ions Al^{+3} . Il se produit alors dans ces conditions, une dégradation de la structure du sol.

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

- **L'on H⁺** : en laboratoire, les ions H⁺ flocculent assez bien l'argile. Mais en sols acides (riches en H⁺), l'humification est ralentie et mauvaise, et faute d'humus de qualité, la floculation de l'argile est insuffisante pour assurer la stabilité des agrégats.
- **Le sodium Na⁺** : en présence d'eau salée, l'argile floccule. Mais en présence d'eau douce (pluie), l'argile sodique est fortement dissociée (Na⁺ tend à s'écarter des micelles). Le sodium va alors agir sur l'eau pour former avec les ions OH⁻, une base forte NaOH. Le pH du sol va alors augmenter (jusqu'à 8-9). NaOH étant une base forte, la dissolution en ions Na⁺ et OH⁻ est complète (Eq 1). Les OH⁻ auront tendance à se recombinaer aux H⁺ pour former des molécules d'eau (Eq 3). Afin de faire face à la diminution d'H⁺ dans la solution du sol, les argiles vont perdre progressivement ceux qui sont situés sur leur surface l'argile se disperse alors (Eq 2). La réaction décrite peut s'écrire comme suit :



Nous retiendrons donc que le sodium a une action dispersante sur l'argile. Il est donc important d'éviter l'emploi d'engrais sodiques (sylvine, nitrate de soude) en sols argileux.

- **Le potassium K⁺** : cet ion a un pouvoir flocculant aussi faible que celui du sodium. Son abondance dans un sol, lorsque les teneurs en calcium diminuent, disperse même l'argile (par remplacement d'un ion très flocculant par un autre ion au pouvoir flocculant plus faible).

Les principaux types d'argile

La structure des argiles correspond à la surexposition de couche tétraédrique et octaédrique et entre les deux couches on rencontre généralement un espace qu'on appelle espace **inter-foliaire**.

Il y a trois possibilités de combinaison des couches tétraédriques et des couches octaédriques :

1^{ère} possibilité:

1 couche tétra+ 1 couche octa \rightleftharpoons

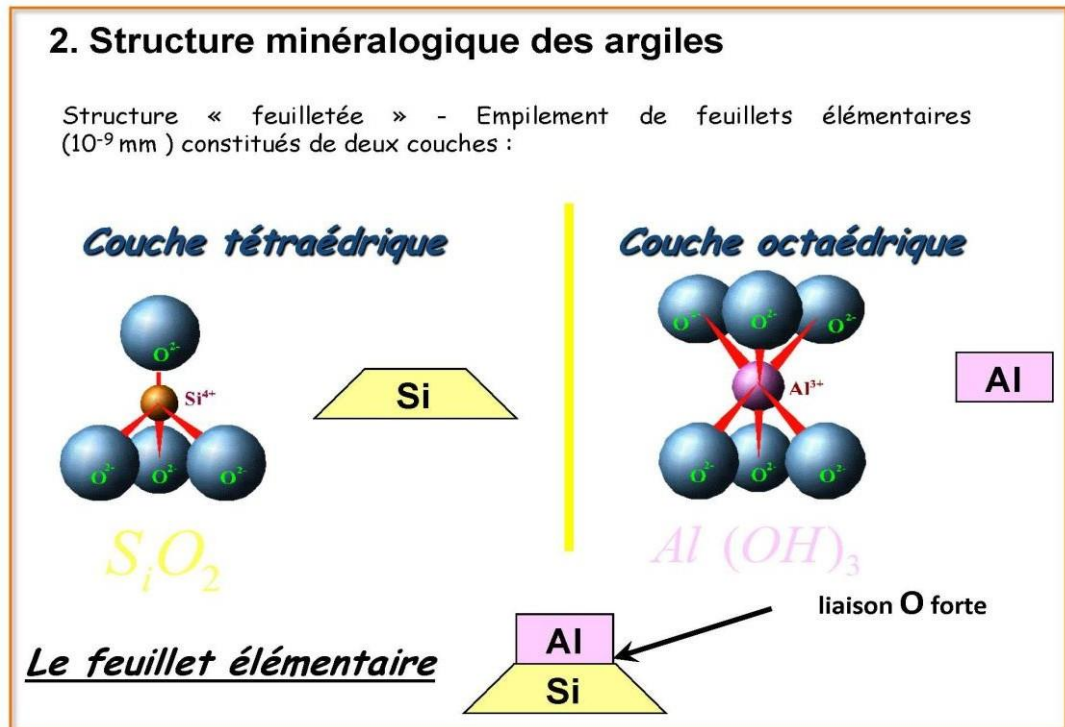
Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

argile 1/1 Ex : Kaolinite.

2^{ème} possibilité:

1 couche tétra + 1 couche octa + 1 couche tétra \implies

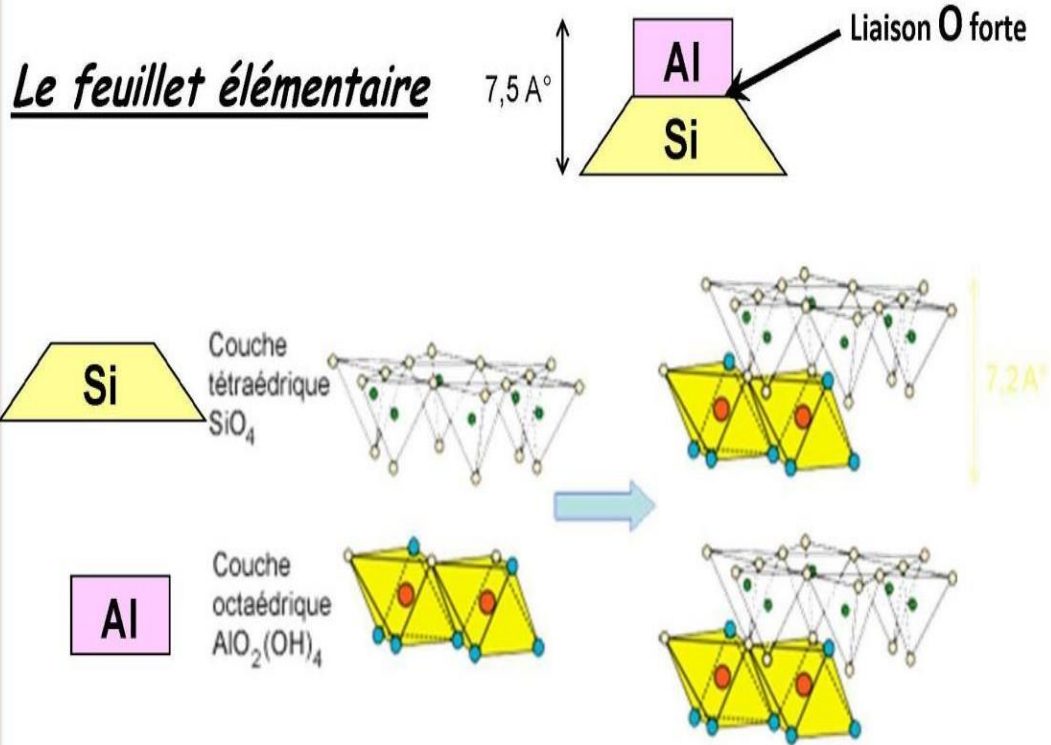
argile 2/1 Ex : Illite



6

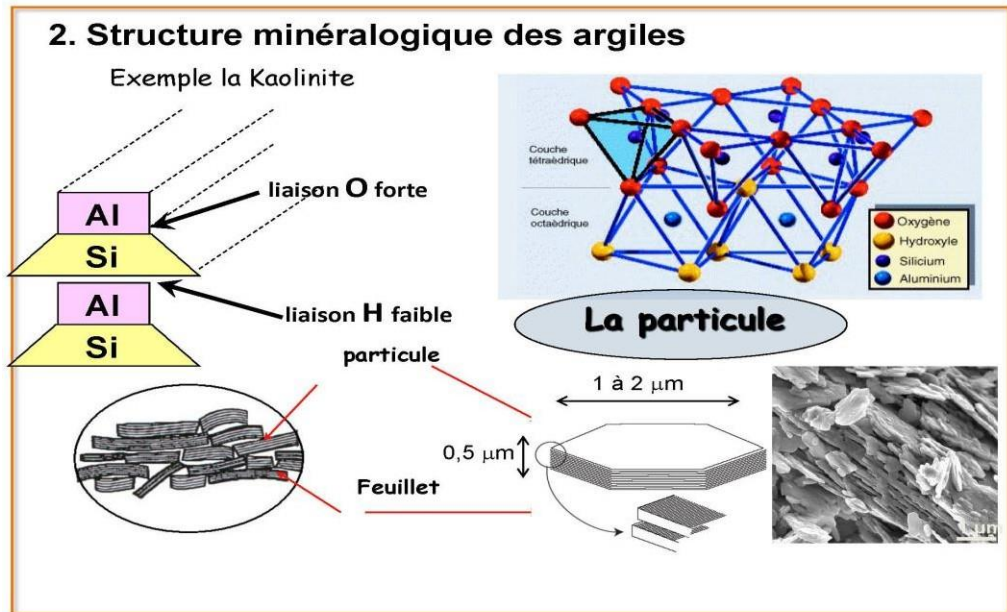
Figure 5 : structure tétraèdre et octaèdre des argiles

2. Structure minéralogique des argiles



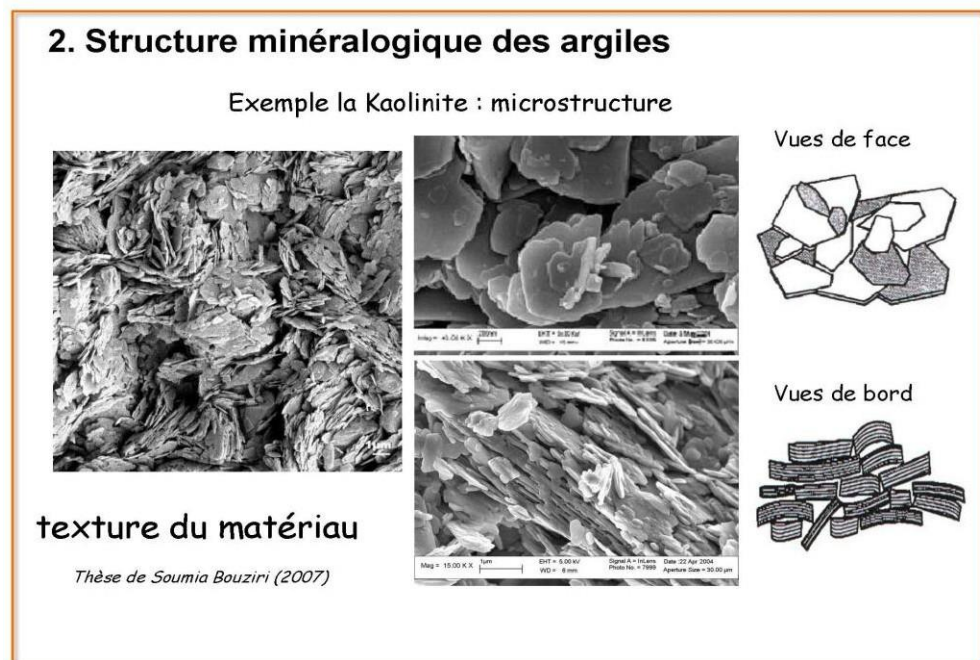
7

Figure 6 : l'unité structurale des argiles



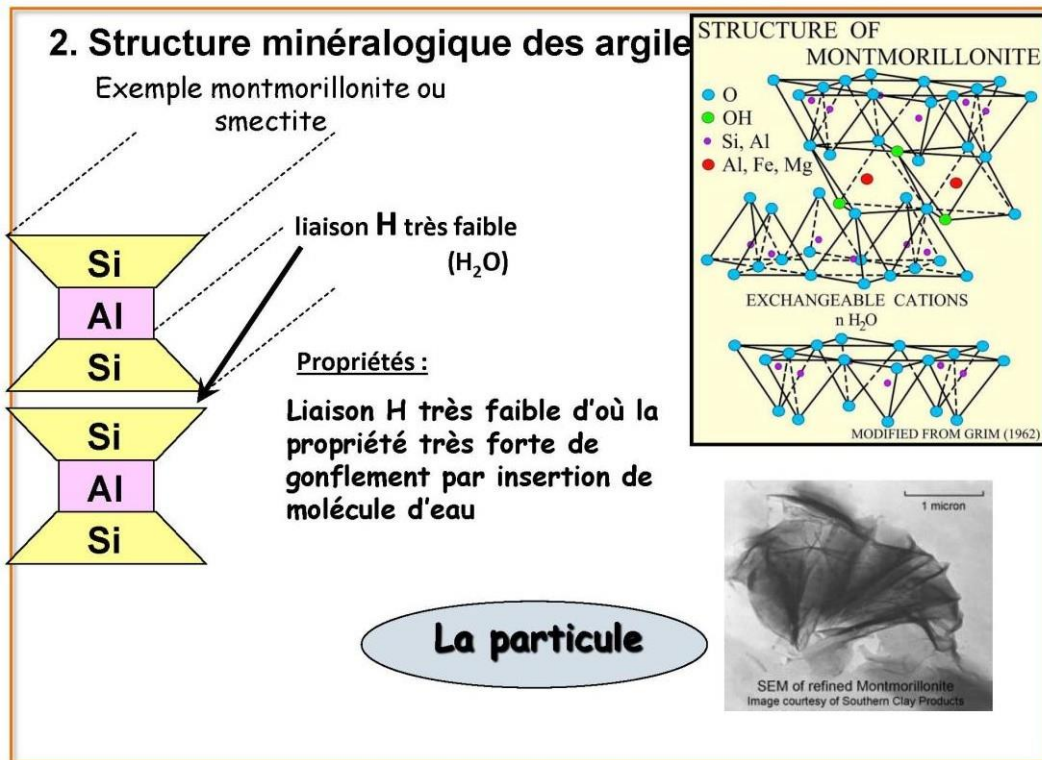
8

Figure 7 : structure d'une argile de type (Te-Oc)



9

Figure 8 : structure minéralogique des argiles



10

Figure 9 : structure d'une argile de type (Te-Oc-Te)

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

3^{ème} possibilité:

(1 couche tétra + 1 couche octa + 1 couche tétra) + 1 couche octa \implies argile 2/1+1

Ex : Chlorite

✓ La Kaolinite

$2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la plus pauvre en silice, offre des propriétés colloïdales peu accentuées ; les feuillets sont à peu près fixes les uns par rapport aux autres, et ne peuvent fixer ni eau, ni cations dans leur intervalle ; les possibilités de gonflement, le pouvoir absorbant des bases sont donc réduits.

L'épaisseur de la couche tétra : 3 \AA

L'épaisseur de la couche octa : 4 \AA

L'espace inter-foliaire : 0.1 \AA

✓ Les illites

Ce groupe comprend plusieurs types d'argile, également riches en silice ; il offre des caractères et des propriétés proches de ceux des micas, certains illites montrent un pouvoir de gonflement notable, d'autres au contraire ont un réseau fixe. Une argile de 3 couches, une couche octa et une couche tétra et une couche tétra.

L'épaisseur de la molécule d'illite est très stable et elle est de 10.1 \AA . L'illite est caractérisé par le phénomène de rétrogradation qui consiste en la pénétration de l'ion K^+ dans l'espace inter-foliaire de l'argile.

✓ Chlorite

Les chlorites (du grec « khlôros » vert) sont encore des composés à trois couches T-O-T. Ici, l'espace inter-foliaire est garni par des composés de Mg et OH qui forment pratiquement une quatrième couche stable.

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

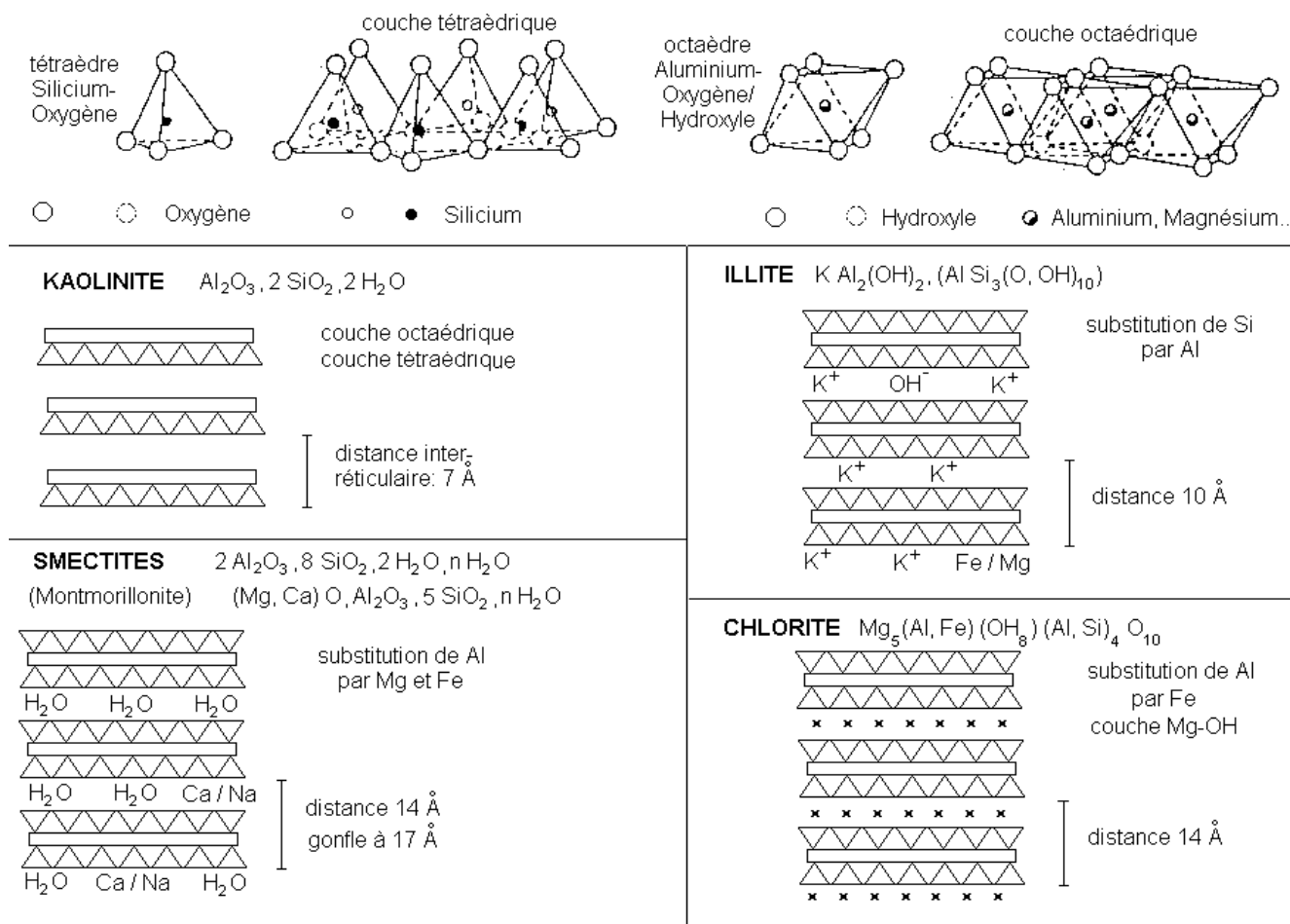


Figure 10: Les types d'argiles

1.2. Les constituants organiques

La matière organique est un élément essentiel pour la fertilisation du sol, la matière organique englobe tous les débris des végétaux à différents stade d'évolution des matières fraîches jusqu'à la décomposition totale (humification). Par contre le terme humus présente de la matière organique complète décomposé aboutissant à des acides organiques.

Lorsque les débris des végétaux tombés sur le sol on a deux voies possibles peuvent étre empreinte en fonction des conditions des milieux.

Les transformations des matières organiques se réalisent essentiellement par les processus de recombinaison (*humification*) et de dégradation (*minéralisation*).

3.1. L'humification

La formation des produits stables « formation de l'humus, ou humification », consiste en des recombinaisons et polymérisations de molécules organiques plus ou moins

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

complexes. La nature biochimique des MO apportées au sol détermine le processus d'humification. Une des caractéristiques importantes de ce processus est l'incorporation d'azote (N) dans les macromolécules humiques, conduisant à un stockage de l'azote sous forme organique dans le sol. Tout en partant des mêmes éléments précurseurs, la qualité des humus produits dépendra des conditions physico-chimiques qui règnent dans le sol. Le pH, la teneur en oxygène, la teneur en bases échangeables, en cations seront déterminants.

3.2. La minéralisation

C'est le passage du monde organique au monde minéral. Ce processus se déroule en plusieurs étapes :

La minéralisation primaire qui concerne les matières organiques jeunes et la minéralisation secondaire ou minéralisation des produits stables (communément appelé « minéralisation de l'humus »).

3.2.1 La minéralisation primaire M1: est un processus assez rapide. Il aboutit à la libération de substances nutritives par désagrégation et dépolymérisations successives des matières organiques. Parmi ces substances, on trouve : l'eau, le CO_2 , l'azote nitrique, les phosphates et sulfates, etc... Cette phase se déroule essentiellement sous l'action de la faune du sol et des microbes (champignons et bactéries). Ces matières minérales peuvent être assimilées par les plantes, adsorbées sur le complexe argilo-humique, perdues par lessivage ou reprise par certains microbes pour la synthèse de l'humine microbienne.

3.2.2. La minéralisation secondaire M2: est au contraire un processus très lent, à raison de 2–3% par an. Elle affecte l'humus formé depuis de nombreuses années et libère des quantités annuelles d'éléments nutritifs considérables qui sont mis à disposition des plantes

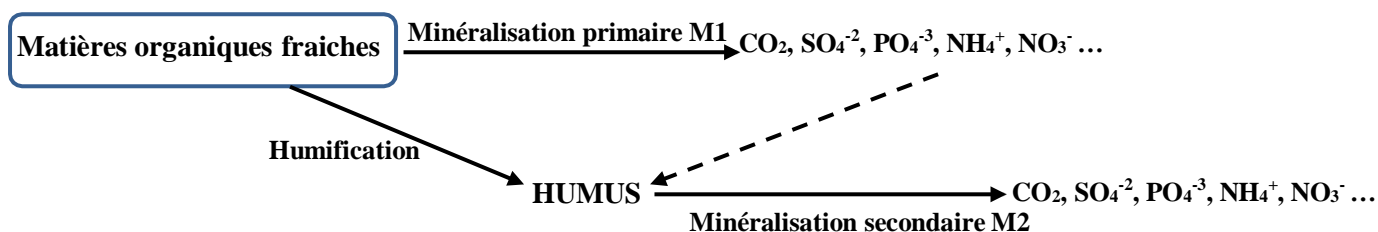


Figure 11 : Humification et minéralisation des matières organiques fraîches

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

4.1. Les complexes colloïdaux (Le complexe argilo-humique)

Quatre éléments sont présents dans le sol : l'air, l'eau, les minéraux et la matière organique. Le complexe argilo-humique résulte de l'association des argiles à l'humus (= matière organique du sol) grâce à l'action stabilisatrice du calcium. Les argiles ayant une puissante charge négative due à leur structure en feuillet, une certaine quantité de cations libres de la solution du sol peuvent s'y fixer (Ca^{+2} , K^+ , H^+ , Na^+ etc.). Le complexe argilo-humique constitue donc un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture qui échange en permanence des ions avec la solution du sol environnante.

L'argile et l'humus forment ensemble le complexe argilo-humique qui a un fort pouvoir adsorbant (adsorber = fixer en surface). Ce complexe est chargé négativement et peut fixer, tel un aimant, de nombreux cations (éléments chargés positivement) comme le potassium (K^+), le calcium (Ca^{+2}) ou le magnésium (Mg^{+2}). Les anions (Cl^- , NO_3^-) ne sont quant à eux pas retenus, à l'exception du phosphore qui se fixe par d'autres mécanismes.

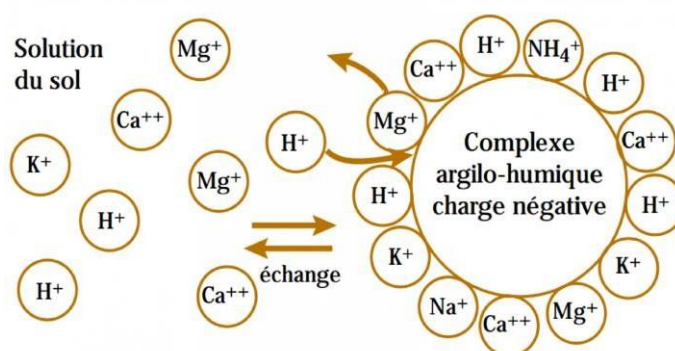


Figure 12: Le complexe argilo-humique

3.3. Les agents de l'humification

Est constituée essentiellement des bactéries, des champignons, des actinomycètes (dans les zones arides), les algues microscopiques, il y a un genre très important qui est le Nostoc. L'intervention de la microflore du sol se fait en fonction de la nature des produits à décomposer c'est-à-dire il y a une spécificité des micro-organismes. La faune du sol : est elle-même divisée en deux catégories :

La microfaune: c'est tous les individus dont la taille est inférieure à 2 mm.

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

La macrofaune: les individus dont la taille est supérieure à 2 mm.

Dans la macrofaune on trouve tous les insectes, les vers de terre, les limasses, les mammifères et les grandes mammifères.

3.4. Transformation et évolution de la matière organique fraîche

99% des produits qui composent la MO du sol est d'origine végétale. Les principaux composés qu'on trouve au niveau des végétaux sont les suivants :

- Cellulose : 20-50% de matière sèche.
- Hémicellulose 10-28% de matière sèche.
- Lignine 10-30% de matière sèche.
- Protéines 1-10% de matière sèche.
- Tanins 1-8% de matière sèche.
- Minéraux 1-8% de matière sèche.

La décomposition passe par 3 étapes :

1^{ère} étape : les débris organiques

Qui arrivent sur le sol subissent un lessivage physique grâce à la pluie, ceci permettra l'élimination de tous les substances solubles exemple : le sucre, les acides aminés.

2^{ème} étape : la désagrégation physique

Les débris végétaux sont fragmentés.

3^{ème} étape: biodégradation de la MO

C'est là où interviennent les micro-organismes du sol, elle est caractérisé par un certaines nombres de processus, exemple : la cellulolyse, protéolyse.

3.5. Les principales fractions d'humus

Constitué de 3 fractions principales qui sont :

- Les acides fulviques.
- Les acides humiques.
- Les acides humines.
- ✓ **Les acides fulviques**

Ce sont des composés organiques très acides, ils sont très peu stables et d'une manière générale leur présence en grande quantité dans l'humus est très défavorable.

✓ **Les acides humiques**

Ce sont des composés plus stables, leur présence favorise la formation d'un humus très favorable. On peut distinguer deux types d'acide humique : acide humique gris et acide humique brun.

✓ Les humines

Ce sont des composés très évolués qu'on retrouve généralement en très grande quantité et en influence faible sur la qualité de l'humus par rapport à deux autres fractions.

3.6. Les principaux types d'humus

3.7.1. Le Mul

C'est l'humus le plus favorable pour l'agriculture,

- Il est constitué essentiellement d'acide humique,
- Il est très stable.
- Il est riche en micro-organismes de type bactérie.
- Il est riche également de Verre de terre.
- Le rapport C/N autour de 12, la liaison entre la matière organique et la matière minérale est très forte.

3.7.2. Moder

La destruction des litières est due principalement, en l'absence des vers de terre anécique, à la mésofaune et à des macrofaunes de surface. L'activité des vers de terre est très faible à nulle. Transformation et incorporation sont donc faibles.

Les Moders se développent lorsque les conditions écologiques sont défavorables à l'activité des vers de terre anécique :

- pH bas (inférieur à 5) associé quelques fois à des textures défavorables (sableuses) ou à des résidus végétaux à fort rapport C/N ;
- Température basse (montagne, zone boréale) ;
- Sécheresse ;
- Asphyxie (hydromorphie) ;

Les Moders présentent généralement des pH très acides (inférieur à 4,5), les rapports C/N sont élevés (jusqu'à 30) et le taux de minéralisation est assez faible (donc faible disponibilité en éléments minéraux (azote, cations)). Les moders correspondent, dans ces conditions, à des niveaux trophiques faibles.

3.7.3. Mor

Les mors correspondent vraisemblablement à des milieux où l'activité faunique est beaucoup plus faible que dans les moders.

Les mors correspondent à des conditions écologiques très défavorables à toute activité animale :

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

- Très forte acidité du sol associée à la présence de végétaux à résidus difficilement biodégradables ou à sécrétions toxiques (certains résineux, Ericacées);
- Climat limitant l'activité biologique (froid);
- Engorgement prolongé (Hydromor);
- Les sols sont des milieux à très faibles niveaux trophiques : pH très bas (inférieur ou très inférieur à 4.5) et taux de minéralisation de l'azote très faible. De plus, ils constituent un obstacle à l'infiltration de l'eau et sont défavorables à la germination : toxicité et sécheresse.
- Le rapport C/N très élevé (45-50), la liaison entre la matière organique et la matière minérale est très faible.

3.7.4. L'Annoor

Il se forme sous les sols humides lorsque la nappe phréatique remonte en surface pendant une période de l'année (hiver) ce qu'on appelle anaérobiose temporaire.

3.7.5. Tourbe

Se forme en conditions d'anaérobiose totale. Les débris des végétaux et particulièrement la lignine s'accumule pour donner de la matière organique qui est presque à l'état brute.

3.7. Les fonctions des matières organiques du sol

Dans le sol, les MO assument de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales :

- Elles assurent le stockage et la mise à disposition pour la plante, par minéralisation, des éléments nutritifs dont elle a besoin.
- Elles stimulent l'activité biologique, étant à la fois source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol.
- Elles ont un rôle central dans la structuration du sol et participent à sa stabilité vis-à-vis des agressions extérieures (pluie, tassement...) en limitant notamment l'érosion hydrique.
- Elles favorisent le réchauffement du sol (coloration plus sombre des matières organiques).
- Elles contribuent à la perméabilité, l'aération du sol et la capacité de rétention en eau.
- Elles jouent un rôle fondamental pour les autres compartiments de l'environnement en participant au maintien de la qualité de l'eau par leur forte

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

capacité de rétention des polluants organiques (pesticides, hydrocarbures...) et minéraux (éléments traces métalliques). Mais elles peuvent être aussi source de polluants potentiels, comme les nitrates et les phosphates.

- Elles influencent également la qualité de l'air, par le stockage ou l'émission de gaz à effet de serre.
- Elles ont un rôle de puits ou d'émetteur de carbone (principalement sous forme de CO₂). Certains changements d'usage des pratiques agricoles favorisent le stockage du carbone dans les sols (conversion de cultures en prairies). Au contraire, la mise en culture de ces prairies entraîne une diminution du stock de carbone.

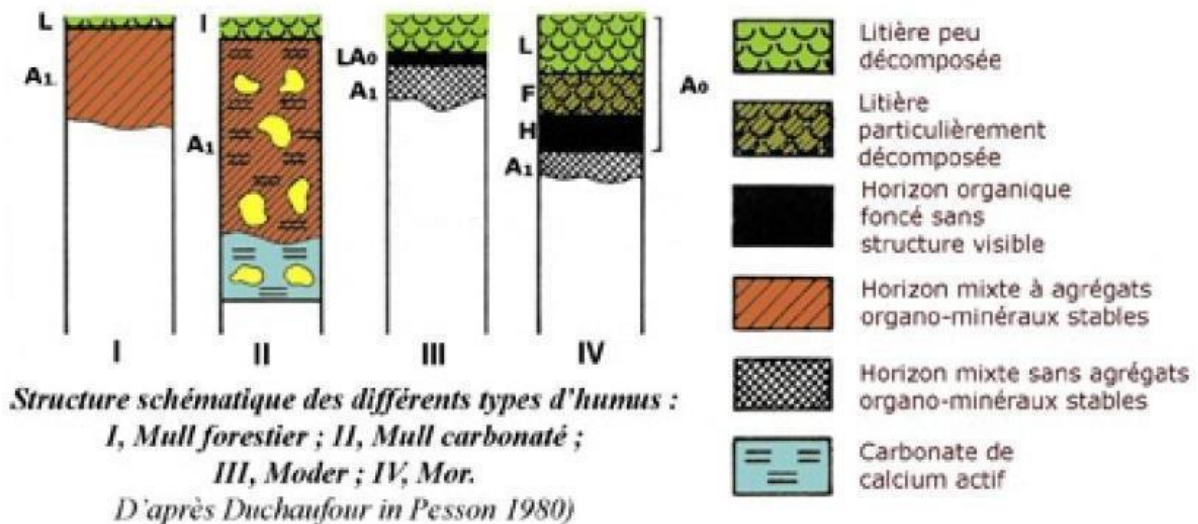


Figure 13 : les différents types d'humus

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

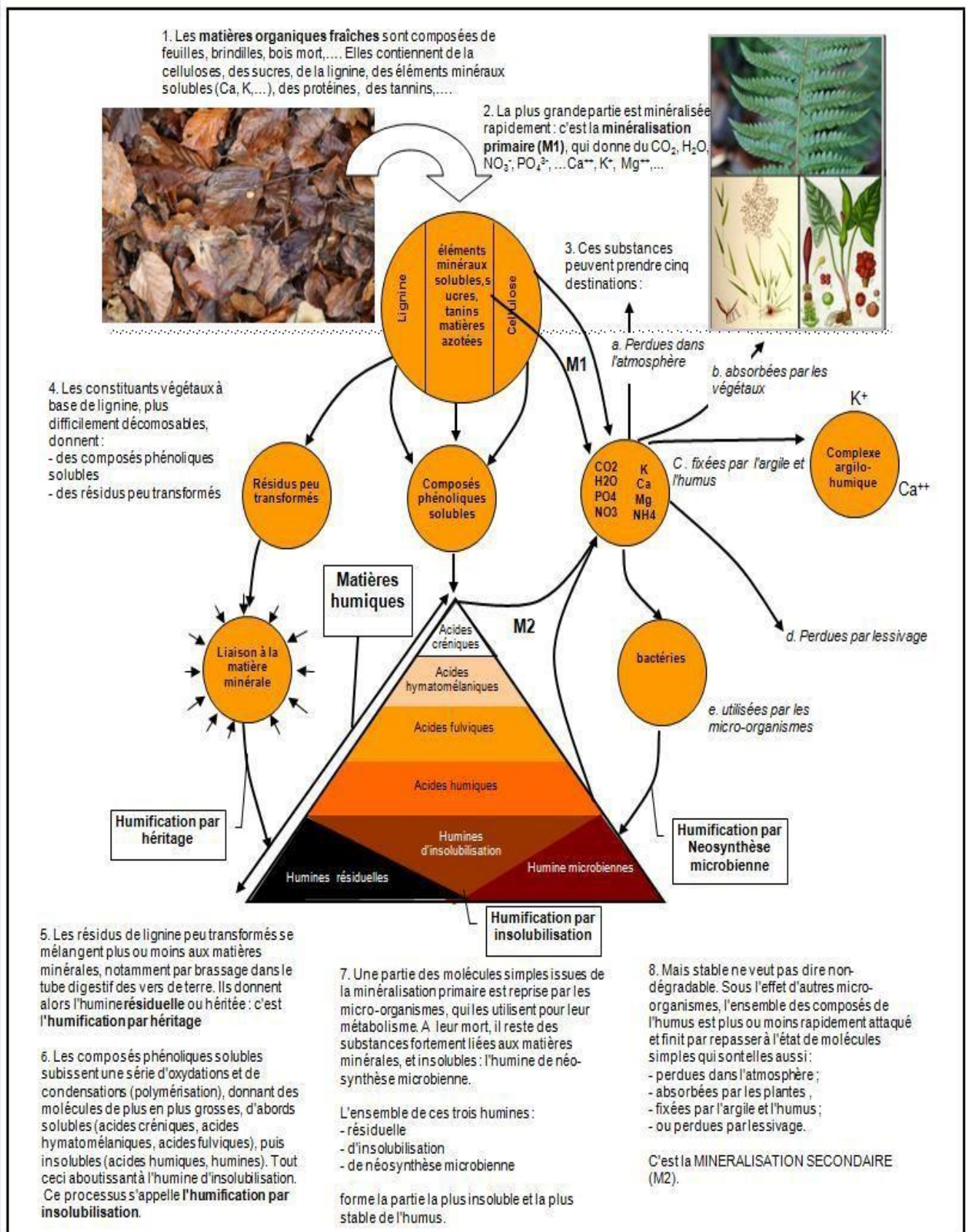


Figure 14 : Evolution générale des matières organiques dans le sol (tiré et modifié de Soltner, 1992)

Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

Critères biochimiques

Le rapport C/N C'est un indicateur de l'activité biologique des sols. Il renseigne sur : le degré d'évolution de la matière organique, l'activité biologique, le potentiel de fourniture d'azote par le sol (minéralisation).

La complexe Adsorbant argilo-humique : (association argile humus)

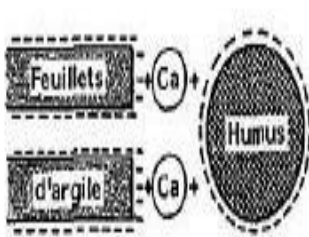
Les micelles d'humus comme celles de l'argile chargées électro-négativement (de même signe). Ce pendant elles peuvent se lier en un complexe, cette liaison étant rendue possible par trois procédés (**voir figure ci-dessous**) :

- 1- l'intermédiaire des ions Ca^{+2} , formant un pont entre l'argile et l'humus (pont calcique) c'est une liaison très forte
- 2- l'intermédiaire des ions Fe^{+++} , c'est liaison faible
- 3- par fixation de l'humus sur certaines charges de l'argile est vice versa formant ainsi une liaison faible. Les cations (Ca^{+2} , Mg^{+2} ...) et les anions (NO_3^- , Cl^- ...) peuvent être retenues (fixés, adsorbés) par le complexe adsorbant argilo-humique (CAH) du sol c'est-à-dire l'ensemble des colloïdes du sol (argile, humus) dotés des charges négatives. Les ions (cations et anions) seront retenus sous une forme **échangeable**. Donc le CAH joue un rôle très important dans la fertilité du sol par son pouvoir adsorbant est échangeable. L'humus et l'argile sont associés en un complexe: le Complexe Argilo-Humique. L'humus protège l'argile: en retenant l'eau, il évite sa dispersion. L'argile protège l'humus de l'action des micro-organismes en ralentissant sa minéralisation. Le tout forme un colloïde qui permet de stabiliser un sol. Il s'agit d'un complexe adsorbant qui a la propriété de retenir des cations présents dans le sol (Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+ , H^+) par des interactions électrostatiques. Ces éléments chargés positivement peuvent alors attirer des anions ou groupements anioniques, notamment les phosphates PO_4^{-3} . On parle d'adsorption. La capacité d'échange cationique (CEC) des CAH, exprimée en milliéquivalents par 100g de terre fin, avec le milieu environnant a une influence sur la fertilité chimique des sols. Le complexe argilo-humique sert aussi de ciment entre les particules les plus grosses et détermine la structure du sol c'est-à-dire mode d'agencement des particules minérales et organiques.

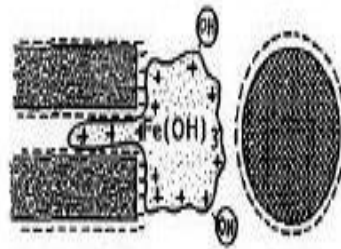
Chapitre I : Les éléments constitutifs du sol

LES MODES DE LIAISON ENTRE ARGILE ET HUMUS

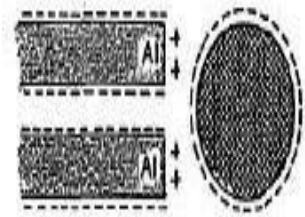
Les micelles d'argile et d'humus, bien que de même signe négatif, peuvent cependant se lier :



• par l'intermédiaire des ions Ca^{++} (pont calcique)



• par l'intermédiaire des hydroxydes de Fe et d'Al, en échange contre leurs ions OH

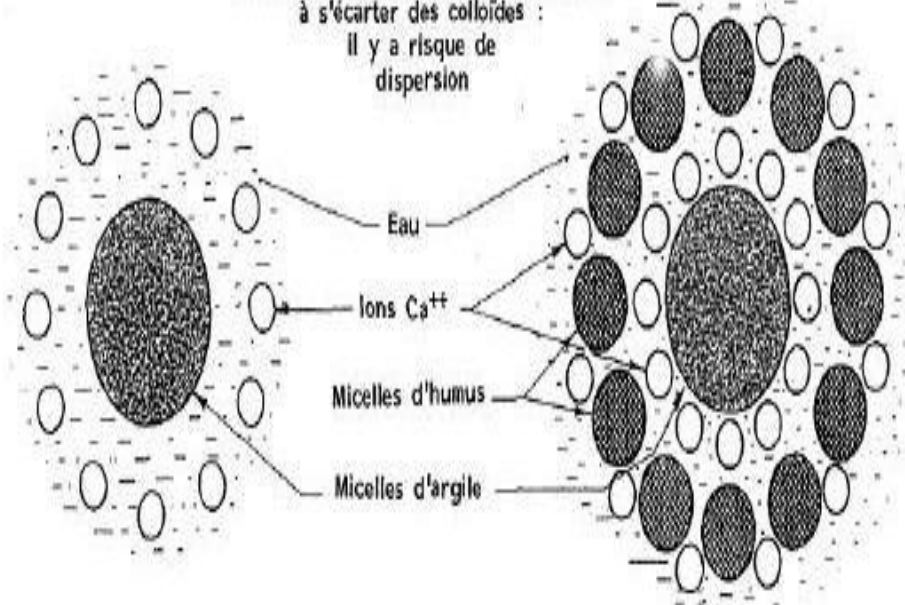


• sur quelques charges positives de l'argile aux points de rupture des feuillets

L'EFFET DE LA LIAISON ARGILE-HUMUS : LA RESISTANCE A LA DISPERSION ET LA STABILITE DE STRUCTURE

En cas d'hydratation brutale (pluies orageuses) ou prolongée (longue période pluvieuse détrempant le sol), les ions flocculants ont tendance à s'écarter des colloïdes :

Il y a risque de dispersion



La dispersion est facile pour l'ARGILE SEULE : les ions flocculants s'écartent beaucoup des micelles argileuses

La structure du sol se dégrade : on dit qu'elle est INSTABLE

La dispersion est difficile pour le COMPLEXE ARGILO-HUMIQUE l'humus flocculé forme autour de l'argile une enveloppe protectrice maintenant en place les ions flocculants ;

La structure du sol résiste : on dit qu'elle est STABLE

Figure 15: mode de liaison de l'argile et l'humus (complexe argilo-humique)

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

Les organisations élémentaires

En moyenne un sol est composé de:

50% de matériel solide et 50 % d'espace porale

L'espace porale contient 25 % d'eau et 25 % d'air

Le matériel solide est composé de matière organique et matière minérale avec 45 à 48 % pour les matières minérales et 2 à 5% pour la matière organique.

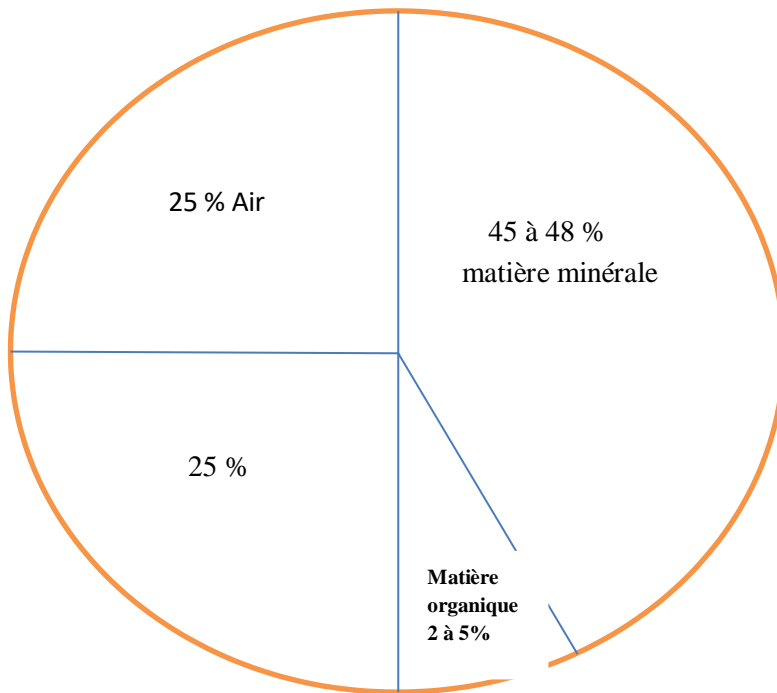


Figure 16: composition volumétrique moyenne d'un sol

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

Donc les organisations élémentaires sont des volumes pédologiques qui rassemblent les constituants. Ces organisations sont partiellement visibles à l'œil nu, c'est à l'aide de microscope que l'on peut voir et décrire les particules primaires (argile, limon, sable, vides, couleur, trace d'activité biologique...etc)

Remarque : des constituants organiques et inorganiques sont associés de diverses manières pour constituer des ensembles qui confèrent au sol, ce qu'on appelle la structure
Les assemblages

Les particules minérales élémentaires (argile, limon, sable) forment des assemblages que l'on appelle agrégats et des mottes (sous l'effet de la matière organique, l'activité biologique, la chaleur, l'humidité ...etc).

On utilise parfois des expressions :

Particules primaires : éléments élémentaires

Particules secondaires : les agrégats, assemblage, mottes

Les assemblages, les agrégats et les mottes sont associés à leurs tours dans des ensembles plus grands appelés horizons du sol qui ont eu même une disposition bien déterminée, à la disposition verticale correspond le profil du sol et à la disposition latérale correspond l'organisation de la couverture du sol

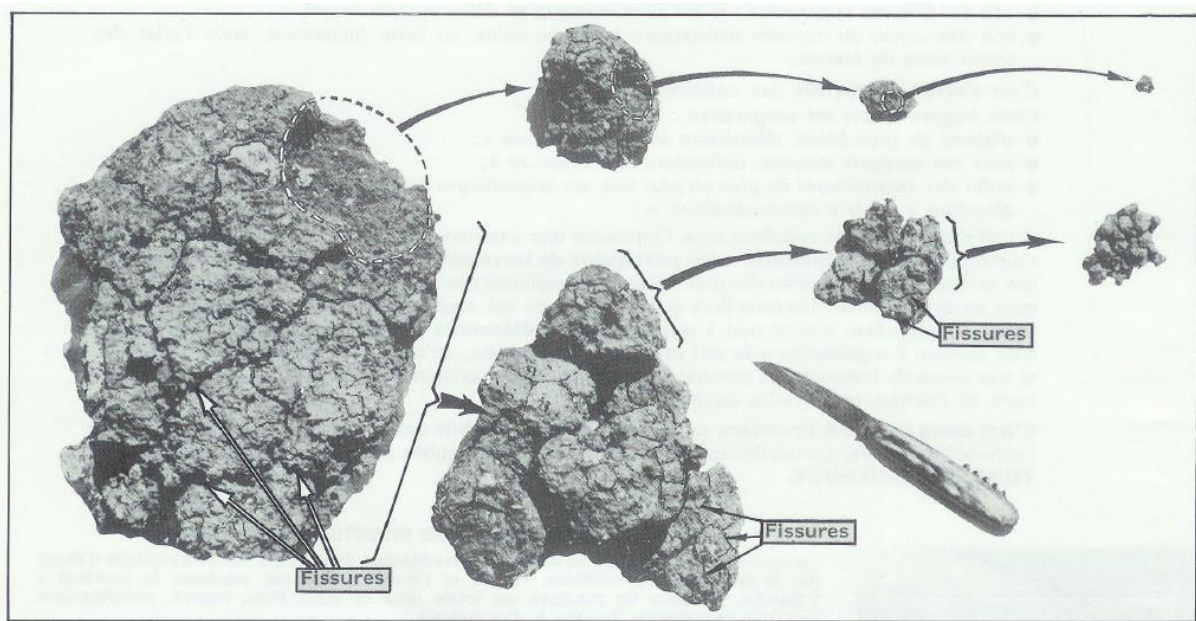


Figure 17: taille des unités structurale d'un sol

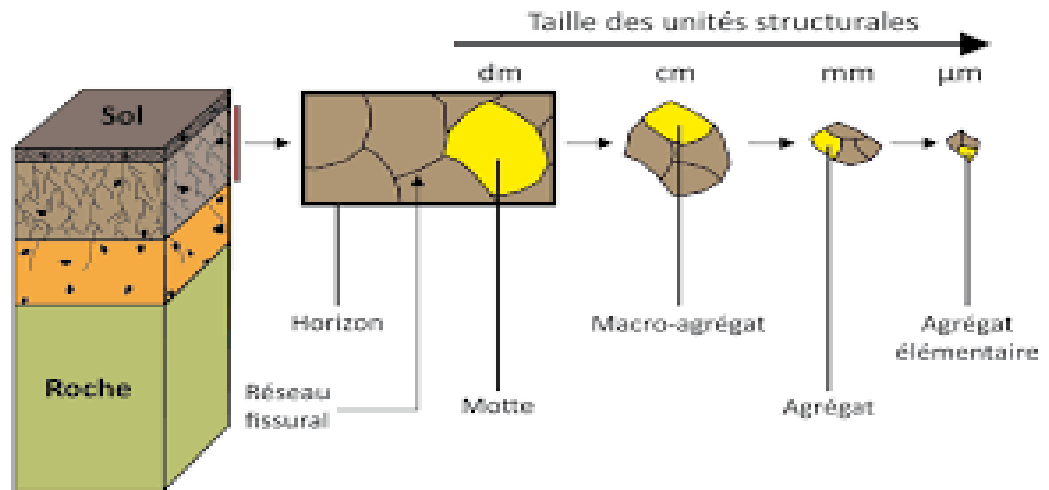


Figure 18: assemblages qui donnent la structure aux horizons du sol.

Donc la description de la structure repose sur l'identification et la caractérisation des particules primaires et secondaires, ses arrangements et ses assemblages qui donnent la structure aux horizons du sol.

Donc on peut définir la structure comme le résultat de l'agrégation des particules primaires en assemblages appelés agrégats.

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

Les organisations élémentaires

En moyenne un sol est composé de:

50% de matériel solide et 50 % d'espace porale

L'espace porale contient 25 % d'eau et 25 % d'air

Le matériel solide est composé de matière organique et matière minérale avec 45 à 48 % pour les matières minérales et 2 à 5% pour la matière organique.

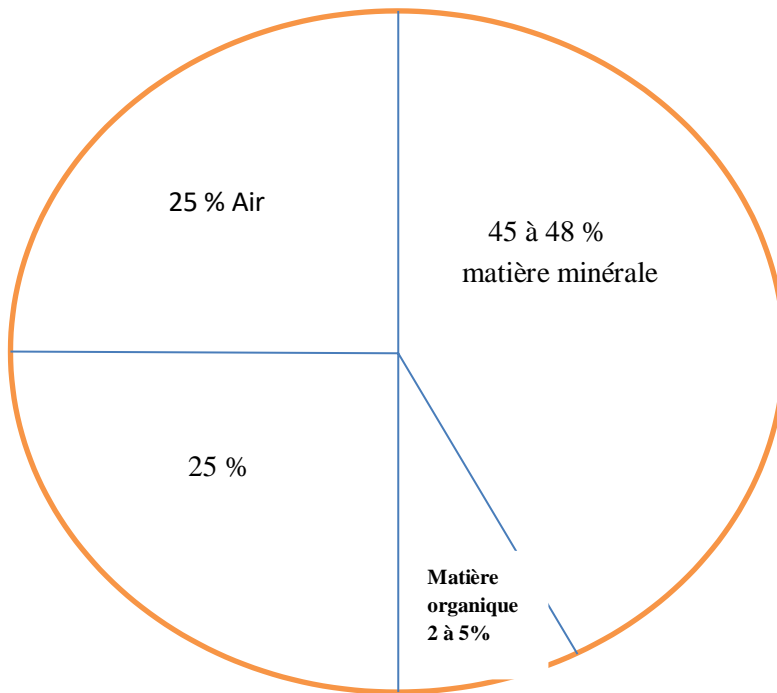


Figure 16: composition volumétrique moyenne d'un sol

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

Donc les organisations élémentaires sont des volumes pédologiques qui rassemblent les constituants. Ces organisations sont partiellement visibles à l'œil nu, c'est à l'aide de microscope que l'on peut voir et décrire les particules primaires (argile, limon, sable, vides, couleur, trace d'activité biologique...etc)

Remarque : des constituants organiques et inorganiques sont associés de diverses manières pour constituer des ensembles qui confèrent au sol, ce qu'on appelle la structure

Les assemblages

Les particules minérales élémentaires (argile, limon, sable) forment des assemblages que l'on appelle agrégats et des mottes (sous l'effet de la matière organique, l'activité biologique, la chaleur, l'humidité ...etc).

On utilise parfois des expressions :

Particules primaires : éléments élémentaires

Particules secondaires : les agrégats, assemblage, mottes

Les assemblages, les agrégats et les mottes sont associés à leurs tours dans des ensembles plus grands appelés horizons du sol qui ont eu même une disposition bien déterminée, à la disposition verticale correspond le profil du sol et à la disposition latérale correspond l'organisation de la couverture du sol

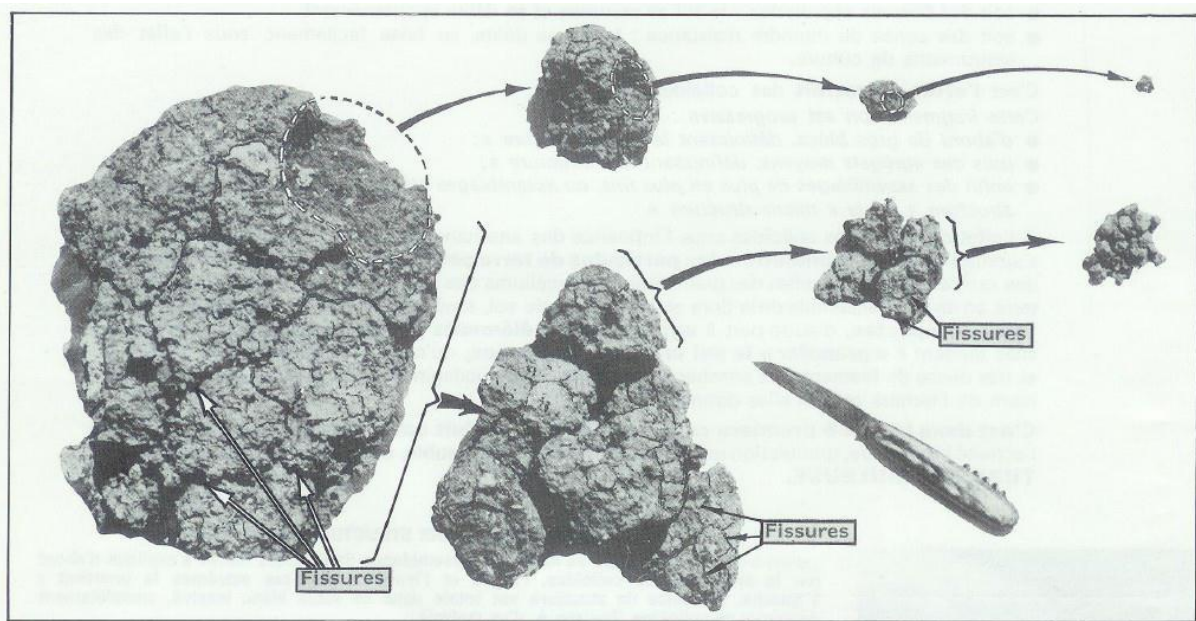


Figure 17: taille des unités structurales d'un sol

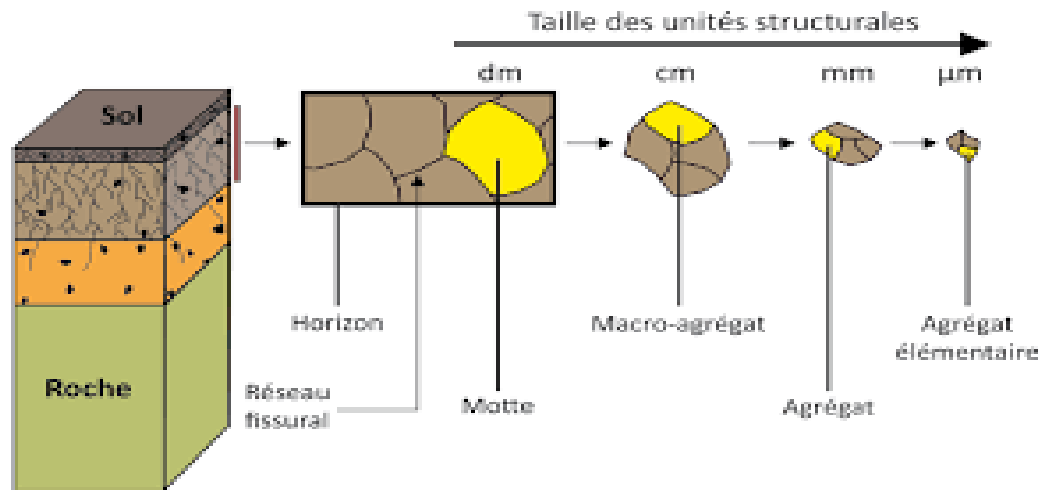
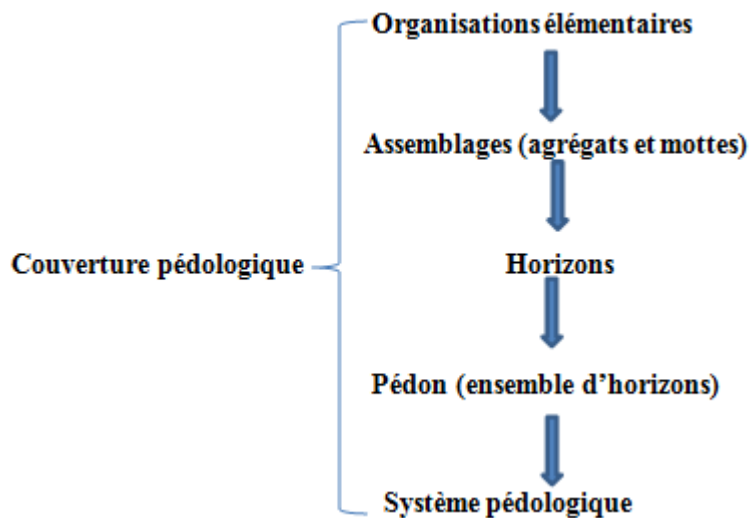


Figure 18: assemblages qui donnent la structure aux horizons du sol.

Donc la description de la structure repose sur l'identification et la caractérisation des particules primaires et secondaires, ses arrangements et ses assemblages qui donnent la structure aux horizons du sol.

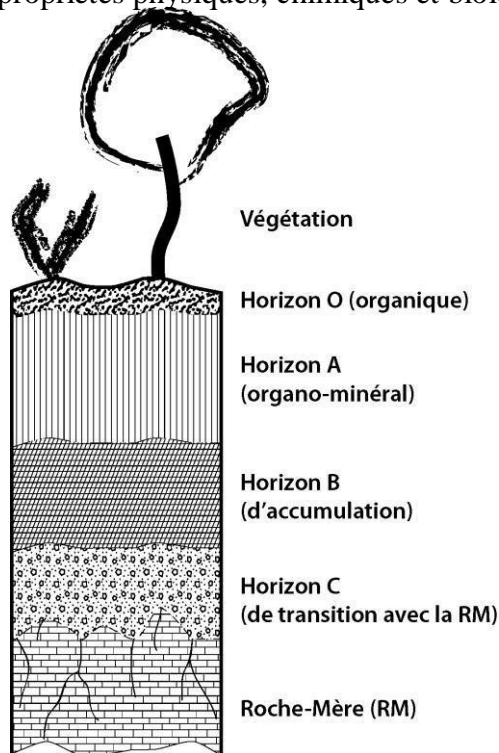
Donc on peut définir la structure comme le résultat de l'agrégation des particules primaires en assemblages appelés agrégats.



Chapitre II : Organisation morphologique des sols

Profil d'un sol: Le profil d'un sol est une représentation schématique d'une coupe verticale d'un sol et montrant la séquence d'horizons caractéristiques d'un sol donné.

Horizon du sol: ce sont des couches successives de différentes épaisseurs et parallèles à la surface. Ces couches successives ne possèdent pas une limite bien distincte entre elles, on les qualifie alors d'**horizons**. Ces horizons se distinguent par leur couleur et par leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques.



Horizon O (organique) : c'est l'horizon le plus superficiel des sols et riche en matière organique provenant principalement des débris et des déchets des organismes vivants (végétaux et animaux).

Horizon A (organo-minéral) : c'est un horizon qui contient la matière organique transformée en humus et de la matière minérale comme les argiles.

Horizon B (horizon d'accumulation) : il comprend des éléments minéraux lessivés par les eaux de pluie et des éléments d'altération de la roche-mère. Les éléments minéraux sont les sables, les argiles et les limons.

Horizon C : c'est un horizon d'altération de la RM et représente la transition entre le sol et la RM.

La roche-mère : roche à l'origine du sol. Elle est responsable de certaines propriétés physico-chimiques du sol et de la nature de la végétation qui s'y développe.

Figure 19 : schéma d'un profil pédologique

La structure

a. Définition

La structure du sol correspond à la façon dont les argiles et la matière organique (MO) et plus particulièrement l'humus sont imbriqués dans le sol. Seule la structure du sol peut être modifiée par ajout de MO et/ou de Ca^{+2} . La texture ne peut être modifiée à l'échelle humaine.

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

b. Les types de la structure du sol

i. Structure fragmentaire

Les agrégats permettent à la fois une rétention de l'eau et des échanges chimiques avec la solution du sol et les racines. C'est la structure la plus intéressante pour l'agriculture.

ii. Structure particulaire

Les particules de terre sont trop grandes et il n'y a pas d'agrégation entre elles (la plage de sable). Sa capacité d'infiltration est très élevée mais sa capacité de rétention très réduite, le sol est donc incultivable.

iii. Structure compacte

A l'opposé de la structure particulaire, les particules sont très fines (grande proportion d'argiles) et s'agglomèrent, elle limite fortement l'infiltration de l'eau dans le sol qui s'engorge, on le dit saturé en eau. Ce sol s'appauvrit en oxygène et devient difficilement pénétrable par les racines.

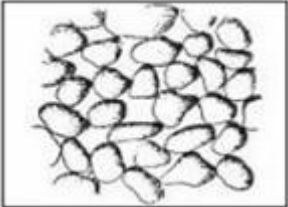
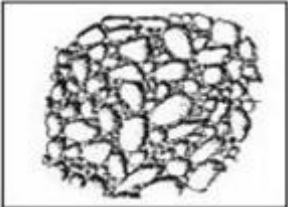
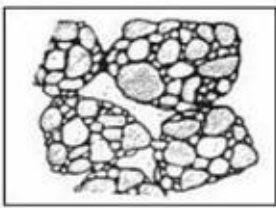
Apparence du sol	Propriétés	Type
	Il n'y a pas de colloïdes Il y a peu ou pas d'agrégats mais cependant beaucoup d'espaces lacunaires, donc ces sols laissent circuler l'eau, l'air et les racines (macroporosité)	<u>Structure particulaire</u> On la rencontrera par exemple dans les sols très sableux, très pauvre en colloïdes. Ce sont des sols très filtrants (trop). Si les éléments squelettiques sont des limons, les sols sont soumis au phénomène de « battance ».
	Il y'a des colloïdes mais ils ne sont pas floclés. Les particules sont assemblées mais elles forment de gros bloc.	<u>Structure compact</u> Les particules sont dispersés. Il y'a donc une prise en masse. Une absence d'agrégats. Le sol est asphyxiant.
	Il y'a des colloïdes et ils sont floclés. La présence de colloïdes floclés va permettre de constituer des agrégats. Entre les agrégats il y'a la macroporosité. Dans les agrégats, il y'a la microporosité.	<u>Structure fragmentaire</u> Selon le pourcentage de chacun des éléments et en fonction de l'action de facteurs extérieurs (eau, travail du sol, végétaux, etc....). On obtiendra différentes formes d'agrégats.

Figure 20 : Les types de la structure

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

La porosité

La porosité totale représente le volume des espaces lacunaire remplis d'air ou d'eau exprimée en pourcent (%) du volume total de la terre en place

Elle est donnée par la formule : $P \% = \frac{D - D_a}{D} \times 100$

D

Dans laquelle D est la densité réel du sol sec, c'est-à-dire des particules solides (il est de l'ordre de 2,5 à 2,6 kg/dm³, un peu moins pour les sols très calcaires ou très humifères, ces deux éléments étant plus légers que les constituants d'origine siliceuse) ; et D_a ou (D') la densité apparente du sol en place (variant généralement entre 1,2 à 1,6).

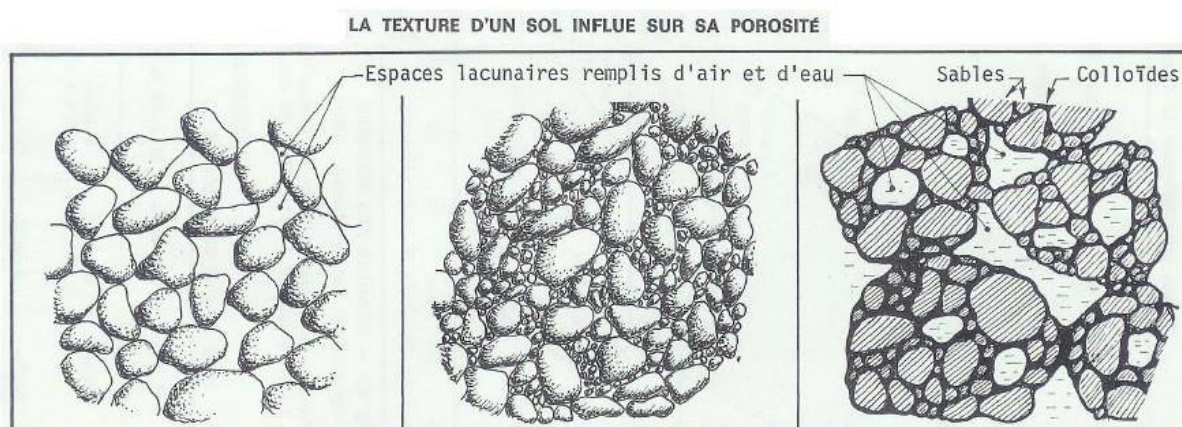


Tableau 21 : types de porosité

Il existe trois types de porosité selon la taille des pores :

- **Microporosité (m)** : la taille des pores $\varnothing < 0,2 \mu\text{m}$ elle retient l'eau inutilisable
- **Méso-porosité (m')** : ou porosité capillaire, ou capacité de rétention en eau : correspond aux volumes des pores dont le $\varnothing [0,2 \text{ à } 50 \mu\text{m}]$ retient l'eau utile pour la plante
- **Macroporosité (M)** : ou porosité non capillaire : correspond à l'ensemble des pores les plus grands remplis d'air $\varnothing > 50 \mu\text{m}$

$$\text{La porosité totale} = m + m' + M$$

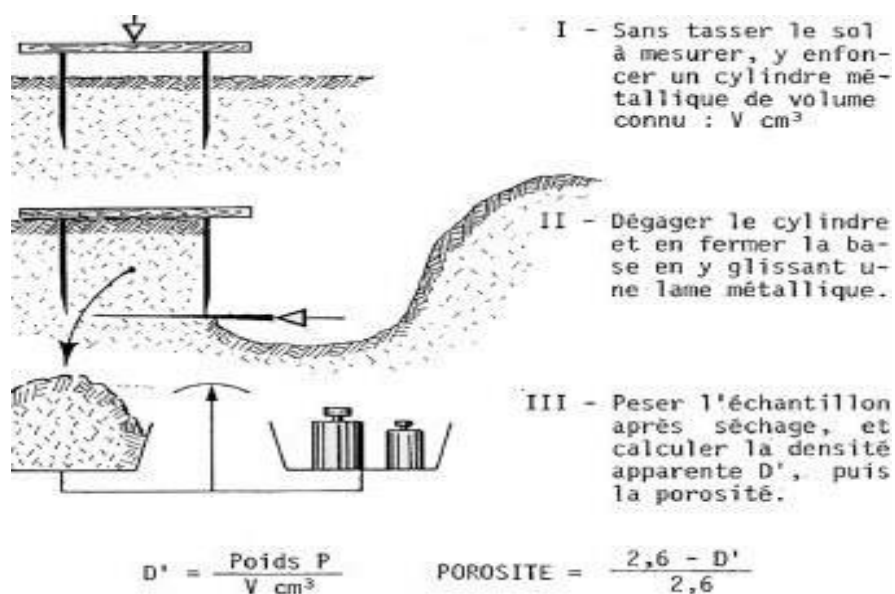


Figure 22. La mesure de la porosité d'un sol

Relation entre porosité apparente et porosité en %

Densité apparente	Porosité
1 à 1,2	55 à 62 %
1,2 à 1,4	46 à 54 %
1,4 à 1,6	40 à 46 %
1,6 à 1,8	moins de 40 %

Densité réelle de divers constituants du sol en fonction de leurs constituants

Quartz et feldspaths alcalins	2,6 à 2,7
Mica	2,8 à 3,2
Craie blanche	2,25 à 2,35
Sables	2,6 à 3
Argile	2,52
Matière organique du sol ..	1,5 à 1,6
Sols de constitution moyenne	2,6
Sols calcaires	2,45
Sols humifères	1,8 à 2,45

La structure d'un sol dépend

- De la répartition granulométrique
- De la nature minéralogique des argiles

- Des oxydes de fer
- Des successions dessiccation-humectation
- De la matière organique
- De l'activité biologique : faune, microflore, racines
- Des actions humaines : pratiques et outils (tassement, semelle, scellement de la porosité)

Mécanismes à l'origine de la formation des agrégats

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

- a) Floculations des colloïdes électronégatifs (agrégats et composés humiques)**, elle se fait en présence de cations flocculant (Ca^{+2} , Al^{+2} , $\text{Al}(\text{OH})_n$, Mg^{+2}).
- b) La cimentation des constituants (particules flocculées et éléments squelettiques)**, due à la présence de matière organique, de minéraux argileux, de fer, de calcaires, 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 de complexe organo-minéraux.
- c) La fissuration**, la formation de fentes de retrait lors de l'alternance des périodes sèches et humides, isole les unités structurales qui vont 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 du type gonflant. La dimension des unités est en rapport avec la teneur en argile ; si elle est élevée, il se forme des prismes de grande dimension, isolés par des fentes de retrait.

2. L'eau du sol

La satisfaction des besoins en eau de la plante est certainement le facteur le plus important de la croissance végétale et de la productivité forestière.

La fertilité d'un sol ne se manifeste que dans la mesure où il existe dans le sol une réserve d'eau suffisant pour compenser les pertes par évapotranspiration et ainsi assurer une bonne hydratation de la plante.

a. Etat de l'eau dans le sol

L'eau dans le sol peut se trouver sous trois états :

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

i. L'eau de gravité

Ou de saturation s'écoule d'abord rapidement puis plus en plus lentement, quittant les espaces vides les plus grands qui se remplissent d'air. Cette eau occupait la

« Macroporosité » du sol.

Lorsque l'eau cesse de s'écouler, la terre, ressuyée, atteint son taux d'humidité à la capacité au champ, valeur qui traduit sa capacité de rétention de l'eau.

ii. L'eau utilisable par la plante

Est celle que retient ainsi le sol, soit à l'intérieur de fins capillaires soit sous forme de films assez épais autour des éléments solides. La plante s'en nourrit tandis que s'abaisse le taux d'humidité de la terre. Mais bientôt la plante semble souffrir de la sécheresse et se fane : le point de flétrissements est atteint. Pourtant une mesure de l'humidité montre que la terre contient encore de l'eau. L'eau inutilisable par la plante

Représente le troisième état. Formant autour des éléments solides des films très minces, cette eau est retenue par le sol avec tant d'énergie que la force de succion des racines, pourtant considérable ne peut l'en extraire.

- i. **Le potentiel matriciel capillaire (PF) :** Mesure la force avec laquelle l'eau est retenue par le sol.

3. L'aération du sol

a. Définition

On appelle « **aération du sol** » le phénomène par lequel l'air du sol qui emplit les macropores se renouvelle à partir de l'atmosphère par rapport D'O₂ et départ de CO₂. L'aération du sol est un échange gazeux fort important car :

- i. Elle assure la respiration des microorganismes aérobies du sol et des racines.
- ii. Elle conditionne de nombreux phénomènes chimiques d'oxydo-réduction qui ont une incidence directe soit sur la pédogénèse (formation du sol), soit sur la chimie du sol et la disponibilité des éléments nutritifs.

b. L'air du sol : son volume et sa composition

i. Volume de l'air du sol

L'air du sol occupe tous les vides que n'occupe pas l'eau, lorsque se

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

ressuie un sol gorgé d'eau, l'air envahit les pores laissés par l'eau de gravité. Au point de ressuyage, il occupe la macroporosité du sol. Par la suite, lorsque s'abaissera l'humidité du sol, il envahit une partie croissante de la microporosité. La quantité d'air contenu dans le sol dépend donc :

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

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

Composition de l'air du sol

L'air du sol a une composition moins stable que l'air atmosphérique : leur composition comparée, qu'illustre le tableau, révèle une teneur semblable en azote, mais d'assez grandes variations, pour l'air du sol, des teneurs en oxygène et en gaz carbonique.

Tableau 4: Composition de l'air du sol

	Air atmosphérique	Air du sol
Oxygène	21%	De 10 à 20%
Azote	78%	De 78.5 à 80%
Gaz carbonique	0.03%	De 0.2 à 3.5%
Vapeur d'eau	Variables	A saturation
Autres gaz	Environs 1%	-

c. Importance des échanges gazeux

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

- L'oxygène d'abord, qui conditionne la respiration des racines et des organismes du sol, et qui intervient aussi dans les réactions d'oxydation.
- Le dioxyde de carbone, produit de l'activité respiratoire, nécessaire à certains microorganismes (bactéries) pour leurs synthèses organiques.

Ces deux gaz existent, soit à l'état libre, au sein de l'atmosphère des sols (lorsque la capacité en air est suffisante), soit à l'état dissous dans les solutions du sol : des échanges ayant lieu constamment entre l'atmosphère extérieure, et l'atmosphère du sol et les solutions du sol, un équilibre tend à s'établir.

Par exemple, pour l'oxygène :

O₂ atmosphère extérieure ↔ **O₂ atmosphère du sol** ↔ **O₂ en solution.**

Il a été démontré que la diffusion de l'oxygène jusqu'aux racines est assurée de façon satisfaisante dans les sols bien drainés et dont la capacité en air est suffisante : la respiration des racines est alors assurée. Si l'oxygène gazeux vient à manquer (dégradation de la structure du sol, saturation des pores par l'eau), l'oxygène dissous peut prendre de relais, à condition qu'il existe en quantité suffisante, ce qui n'est pas le cas des eaux stagnantes.

Par ailleurs, la diffusion de l'oxygène dissous est très absorbée : cela explique l'importance de la circulation de l'eau des nappes autour des racines, lorsque les pores sont saturés d'eau.

Chapitre II : Organisation morphologique des sols

4. Couleur du sol

C'est l'indice le plus immédiatement visible des variations de composition du sol. C'est d'abord un reflet de la teneur en matière organique : le sol est d'autant plus foncé qu'il est plus riche en humus.

Mais la couleur traduit aussi l'état du fer dans le sol : un sol rouge possède des oxydes de fer peu hydratés; amorphes, un sol jaune contient des oxydes de fer hydratés, mieux cristallisés. Malheureusement il n'y a pas de relations quantitatives entre la couleur et ce qu'elle révèle, par exemple il faut peu de fer pour colorer un sable et dans certains sols (vertisols) des quantités faibles de matière organique peuvent donner une coloration noire. La couleur du sol est déterminée par référence avec un code de couleurs. Les pédologues utilisent pratiquement tous le code Munsell.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Les propriétés chimiques du sol

Les phénomènes d'échanges des ions

Le sol possède la propriété de retenir diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le **complexe adsorbant du sol**, c'est-à-dire l'ensemble des colloïdes (substances humique, argile) dotés de charges négatives ou positives. Les ions y seront retenus sous forme échangeable. En d'autres termes, si on traite un sol par une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il y aura échange entre les ions du complexe adsorbant et ceux de la solution.



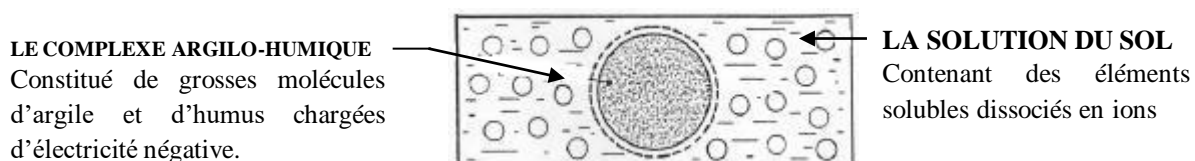
L'absorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible :

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

Le pouvoir adsorbant est la propriété que possède le complexe adsorbant du sol, de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol. Cette définition est illustrée dans le schéma ci-dessous (figure 9).



Pour faciliter l'étude physico-chimique du sol, on peut également le représenter ainsi :



A partir de cette représentation imagée, on peut définir le pouvoir adsorbant

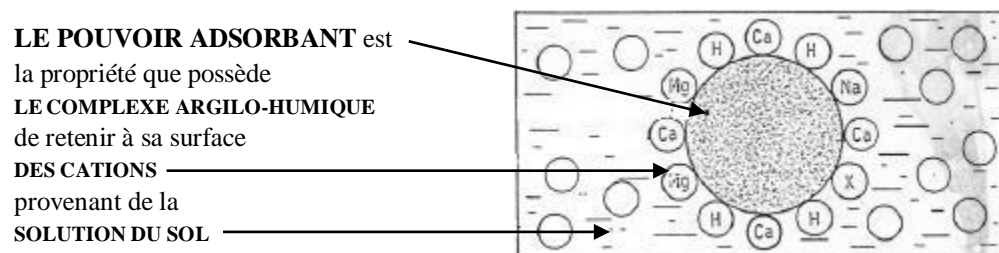


Figure 23: le pouvoir adsorbant du sol.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Mécanisme de l'échange des cations

Deux exemples d'échange de cations:

a) Le remplacement des ions H^+ par des cations Ca^{+2}

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



La concentration d'ions Ca^{+2} augmente dans la solution du sol et cette concentration se communique au complexe, un cation Ca^{+2} prend la place de deux ions K^+ , qui se combinent aux anions OH^- apportés par la chaux pour former de l'eau :



b) L'échange des cations Ca^{+2} contre des cations K^+

Si dans sol enrichi en calcium par le chaulage on introduit du chlorure de potassium (KCl engrais potassique). Ce sel se dissout, puis se dissocie en anions Cl^- et cations K^+ . Ces derniers augmentent la concentration en ion K^+ de la solution, provoquent un échange avec le complexe. Ils prennent sur celui-ci la place d'ions Ca^{+2} , à raison de $2K^+$ pour $1\ Ca^{+2}$. Ces cations Ca^{+2} remis en solution forment avec les anions Cl^- du $CaCl_2$ sel soluble qui peut être lessivé : cet apport d'engrais potassique a provoqué une décalcification du sol, c'est l'action décalcifiante des engrais potassiques.

Les lois de l'échange des cations

Il existe deux lois qui contrôlent les mécanismes de l'échange au niveau du sol :

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

➤ La somme des cations retenus et échangeables sur le complexe adsorbant par une unité de poids du sol est fixe et stable.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Deux exemples d'échange d'ions entre le complexe et la solution du sol

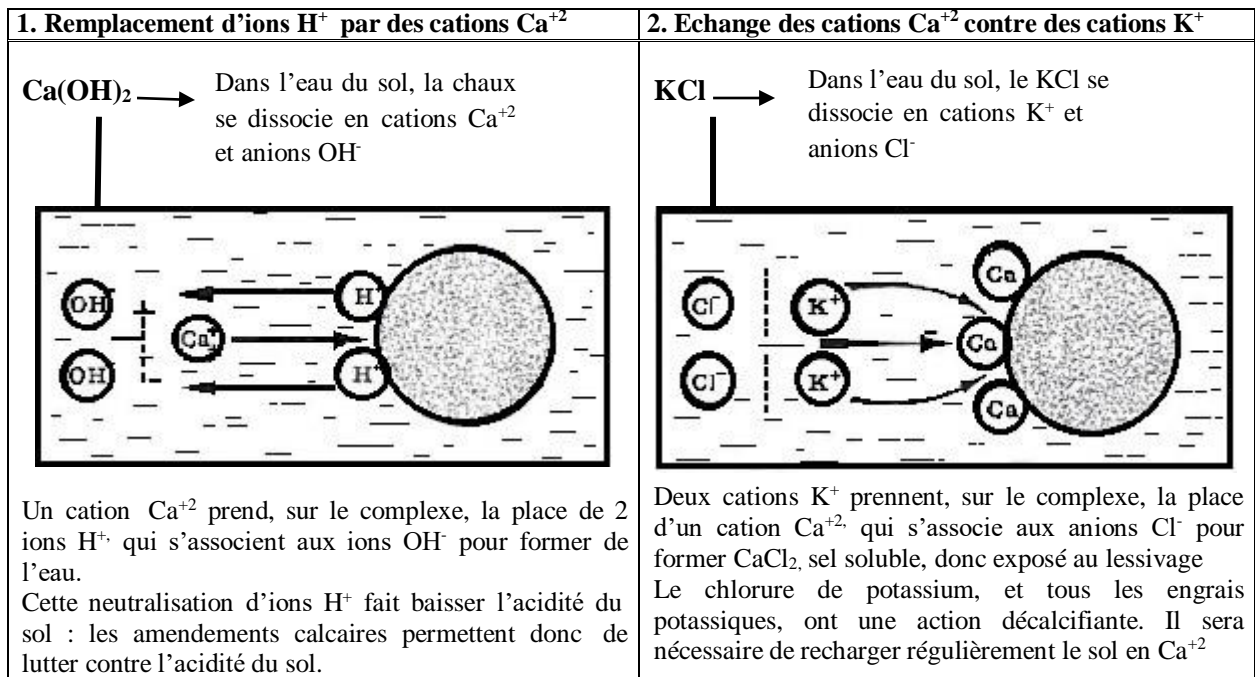


Figure 24: deux exemples d'échange entre le complexe adsorbant et la solution du sol.

Les valeurs caractéristiques du complexe adsorbant : CEC et V%

La capacité d'échange (T ou CEC)

La capacité totale d'échange ou capacité de cation est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber (pour 100 g de matière sèche).

Autrement dit, cette mesure représente le total des charges négatives du sol disponibles pour la fixation :

Des ions H^+ et Al^{+3} ,

Des cations appelés bases échangeables : Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} (l'ion NH_4^+ peut être présent aussi, mais étant très minoritaire, il n'est pas pris en compte).

3.2. La somme des bases échangeable (S)

Il s'agit de la somme des quantités de cations basiques échangeables, fixés sur le complexe à un moment donné. On l'exprime également en meq pour 100 g de matière sèche. La différence T-S représente donc la quantité d'ions H^+ et Al^{+3} fixés. Cette différence peut encore être appelée *insaturation*.

$$T = S + H^+ + Al^{+3} \quad (\text{Eq 8})$$

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

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

Le taux de saturation est le rapport somme des bases échangeables/CEC, exprimé en %.

Ce taux est variable d'un sol à l'autre, et, pour un même sol d'une année à l'autre. En effet toute cause capable d'apporter ou au contraire d'enlever des bases échangeables au complexe le fait varier.

Ce taux dépend :

De la richesse chimique de la roche mère.

De la fréquence et de l'importance des apports de cations (surtout Ca lors des amendements calcaires...),

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

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

Les sols sableux peuvent être pauvres en bases et avoir un taux de saturation inférieur à 20%.

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

Les propriétés électroniques du sol

L'acidité du sol

L'acidité du sol est définie par la concentration en ions H^+ . D'une manière très générale, la grande majorité des hydrogènes du sol, proviennent des activités biologiques.

Les ions H^+ se répartissent en deux catégories :

Les ions H^+ présents dans la solution du sol.

Les ions H^+ fixés sur les colloïdes à l'état échangeable.

Les sources de production d'ions H^+ sont :

Ions H^+ issus de la réaction entre CO_2 produit par la faune du sol, la respiration des racines, la décomposition des matières organiques : $CO_2 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$ (Eq 9)

Les ions H^+ résultant de la fixation de molécule d'eau sur certains ions comme Al^{+3}



Soit l'équation globale:



Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Les différentes expressions de l'acidité

L'acidité actuelle (=acidité active)

La quantité d'ions H^+ libres se trouvent dans la solution du sol. Elle s'exprime le plus souvent par le pH du liquide obtenu en délayant un poids donné de terre dans un certain volume d'eau distillé.

L'acidité potentielle

Cette valeur exprime la somme des ions H^+ fixés sur le complexe adsorbant, qui constituent une « réserve » actuellement non disponible.

L'acidité totale est composée de l'acidité potentielle et de l'acidité actuelle.

L'acidité d'échange

Elle tend à mesurer la masse des ions H^+ échangeables, susceptible de jouer un rôle écologiquement important à brève échéance. Il s'agit d'une mesure indirecte de l'acidité potentielle du sol.

Elle s'obtient en additionnant le sol d'une grande quantité d'un sel neutre comme le KCl dont les K^+ vont provoquer le passage dans la solution du sol, d'un grand nombre d'ions H^+ et Al^{+3} qui étaient fixés d'une manière échangeable à la surface des colloïdes. Le pH KCl est plus acide que le pH eau, les ions K^+ en prenant sur le complexe la place d'ions H^+ , font apparaitre une acidité d'échange d'autant plus forte que l'acidité potentielle est élevée.

Les variations du pH du sol

Le pH d'un sol varie, à court terme, avec la saison le Ph minimum en été et maximum en hiver. Ces variations s'expliquent par :

La dilution de la solution du sol qui à tendance, en hiver, à diminuer la concentration en H^+ et donc à relever le pH.

La production d'acides par activité biologique (microbes et racines), est maximale en été, production d'acides organiques et de CO_2 lors de la respiration ou de l'humification. Le pH d'un sol varie à long terme, sous climat humide, tout sol a tendance à se désaturer, c'est-à-dire à perdre progressivement ses cations basiques, notamment le Ca^{+2} . Il se décalcifie.

A s'acidifier, c'est-à-dire à se charger de quantités croissantes d'ions H^+ . Du fait de l'équilibre acidité active ou acidité actuelle-acidité potentielle, cette acidification porte à la fois sur le complexe et sur la solution.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Transformations d'origine microbiennes

Dans tout écosystème terrestre, les éléments nécessaires à la vie (éléments biogènes) sont successivement incorporés dans les différentes composantes vivantes (plantes, animaux, microflore), puis libérés. On dit qu'il y a renouvellement des éléments. Ces transformations cycliques subies par les éléments constituent le cycle de la matière. Tout comme l'apport continu d'énergie, fournie par le soleil et captée par les organismes photosynthétiques, principalement les plantes, ces transformations cycliques (cycles biogéochimiques) sont indispensables au maintien de la vie sur la Terre.

L'importance de l'intervention des microorganismes dans le cycle de la matière varie suivant l'élément considéré. Dans le cas de carbone (C), d'azote (N), du phosphore (P), elle est capitale, puisque l'absence, voire l'inactivité des microorganismes, entraînerait un arrêt de l'approvisionnement naturel des sols en azote et un blocage du renouvellement de C, N, P se traduisant par l'accumulation de ces éléments sous forme organique inutilisable par les végétaux. Dans le cas des autres éléments, tels que le phosphore (P), l'intervention microbienne est beaucoup plus discrète.

Cycle de l'azote

Définition

Processus cyclique naturel au cours duquel l'azote atmosphérique pénètre dans le sol, entre dans la composition des organismes vivants, puis retourne dans l'atmosphère. N dans le sol est présent dans les résidus végétaux, déjections animales, matières organiques en décomposition, humus, biomasse microbienne et solution du sol. Il est sous 3 formes différentes

- $N_2(g)$ dans l'air du sol;
- Minéral: nitrates (NO_3^-) directement assimilable par les plantes mais peut être lessivé vers les horizons profonds ou dans une moindre mesure volatilisé dans l'atmosphère. sous forme ammoniac (NH_3 ou N_2) et quelques nitrites (NO_2^-) dans la solution du sol et NH_4^+ fixés sur le CAH;
- Organique (**98-99% de l'azote totale du sol**) dans les molécules organiques.

L'azote dans le sol

L'azote organique est transformé en azote minéral grâce à l'action de bactéries du sol (ammonification NH_4^+ puis la nitrification NO_3^-).

La vitesse et l'intensité de ces transformations dépendent du type de sol, des conditions climatiques: rapide pour les sols sableux/argileux et favorisée par la chaleur et humidité.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

A certaines époques de l'année et suivant la quantité de C facilement assimilable, une partie de N minéral peut être assimilée par des μ organismes du sol \Rightarrow organisation de l'azote minéral du sol sous forme de biomasse microbienne.

Proportions des différentes formes d'azote selon l'intensité de la minéralisation

- **Minéralisation importante:** pH légèrement alcalin, taux de MOS, essentiellement NO_3^- (NH_4^+ rare).
- **Minéralisation plus limitée:** sols \pm battants, pH légèrement acide, surtout NO_3^- (un peu de NH_4^+).
- **Minéralisation moyenne et irrégulière:** mauvais ressuyage, autant de NH_4^+ que de NO_3^- .
- **Faible minéralisation:**
 - En sols lourds ou acides, $\text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^-$;
 - En sols calcaires, $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+$.

La plupart des êtres vivants ne peuvent utiliser la molécule (N_2). De ce fait, ils ont besoin de ce qu'on nomme **l'azote fixé** dans lequel les atomes d'azote sont liés à d'autres types d'atomes comme par exemple à l'hydrogène dans l'ammoniac (NH_3) ou à l'oxygène dans les ions nitrates (NO_3^-). Des processus sont nécessaires pour transformer l'azote atmosphérique (N_2) en une forme assimilable par les organismes : **La fixation de l'azote diatomique (N_2), la nitrification et la dénitrification.**

- **La fixation :** Correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans les sols ou dans l'eau et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique (N_2). Il s'agit en particulier des cyanobactéries et de certaines bactéries vivant en symbiose avec des plantes (**Ex. :** Légumineuses), qui ont la faculté de produire de l'ammoniac (NH_3) à partir de l'azote et de l'hydrogène atmosphérique grâce à une enzyme : **La Nitrogénase**. L'ammoniac peut aussi provenir de la décomposition d'organismes morts (Action des bactéries saprophytes) sous forme d'ions ammonium (NH_4^+). Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux.
- **La nitrification :** Transforme les produits de la fixation (NH_4^+ , les ions nitrates NH_3) en (NO_x) (Soient NO_2^- et NO_3^-), des nitrites et nitrates. Les végétaux absorbent grâce à leurs racines les (NO_3^-) et, dans une moindre mesure, l'ammoniac présent dans le sol, et les incorporent dans les acides aminés et les protéines. Les végétaux constituent ainsi la source primaire d'azote assimilable par les animaux.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

- **La dénitrification:** Grâce aux bactéries dites *dénitrifiantes* (Transformant la matière organique), l'azote retourne à l'atmosphère sous sa forme moléculaire (N_2), avec comme produit secondaire du CO_2 et de l'oxyde d'azote (N_2O) (Gaz à effet de serre). L'activité humaine contribue à l'augmentation de la dénitrification, entre autres, par l'utilisation des engrais qui ajoutent aux sols des composés ammoniacués (NH_4^+ , NH_3) et des nitrates (NO_3^-). L'utilisation des combustibles fossiles dans les moteurs ou les centrales thermiques transforme l'azote en oxyde d'azote (NO_2^-).

Cycle biogéochimique du phosphore

Définition

Dans les sols agricoles cultivés depuis longtemps, 1/3 du P est associé à la MO (Matière Organique) et 2/3 sont sous formes minérales retenues à la surface des argiles, MO, oxydes et hydroxydes de Fe, Al.

En sols calcaires, les phosphates calciques évoluent vers des formes solubles.

Moins de 0,1% du P total est libre dans la solution du sol sous forme d'ions phosphates ($H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}).

P dans le sol

Même si on apporte des engrais, la majorité du P absorbé par les plantes (> 75%) provient du P bio-disponible du sol = ions de la solution du sol et fraction très mobile d'ions adsorbant sur le CAH.

La réalimentation du pool de P disponible par les ions adsorbant. Retenus plus énergétiquement est lente: plusieurs semaines à plus d'un an. L'assimilation du P des engrais par les plantes = f(quantité apportée, forme chimique, caractéristiques du sol et plante, temps de contact sol-engrais).

Pour une durée de contact sol-engrais d'un à deux mois, l'engrais le plus soluble est utilisé à 15% et le coefficient d'utilisation du P peut tomber à moins de 1% pour des engrais à faible solubilité.

Les pertes en P dans l'environnement sont généralement faibles, elles proviennent surtout du ruissellement et un peu du lessivage dans les sols sableux très légers.

Le cycle

En dépit de la rareté du phosphore minéral dans la biosphère, cet élément reste important pour la matière vivante (Constituant de l'ADN, de l'ARN et de l'ATP). Il possède un cycle qui passe par deux phases: L'une qui se déroule dans les écosystèmes terrestres, l'autre dans les écosystèmes aquatiques. Son réservoir principal est constitué par diverses roches qui cèdent peu à peu leurs phosphates aux écosystèmes.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Dans le milieu terrestre, la concentration en phosphore assimilable est souvent faible et joue le rôle de facteur limitant. Ce phosphore est mis en circulation par lessivage (érosion) et dissolution et introduit ainsi dans les écosystèmes terrestres où il est absorbé par les végétaux. Ceux-ci l'incorporent dans diverses substances organiques et le font ainsi passer dans les réseaux trophiques. Les phosphates organiques sont restitués au sol avec les cadavres, déchets et excréta produits par les êtres vivants, attaqués par les microorganismes et retransformés en orthophosphates minéraux, à nouveau disponibles pour les plantes vertes et autres autotrophes.

Le phosphore introduit dans les écosystèmes aquatiques par les eaux de ruissellement, rejoint les océans, permettant ainsi le développement du phytoplancton et des animaux des divers maillons de la chaîne trophique. Un retour partiel des phosphates des océans vers les terres émergées s'effectue grâce à la pratique de la pêche ou par les excréments des oiseaux marins piscivores. Cependant, dans les océans, le cycle du phosphore se fait avec des pertes, puisqu'une partie importante des phosphates entraînée en mer se retrouve immobilisée dans les sédiments profonds (Fragments de cadavres de poissons non consommés par les détritivores et les décomposeurs). Lorsqu'il n'existe pas de courants ascendants permettant la remontée des eaux en surface, la pénurie de phosphore devient un facteur limitant. Le cycle du phosphore est donc incomplet et ouvert. Du fait de sa rareté et en raison de ces pertes pour le cycle, le phosphore constitue donc le principal facteur limitant qui contrôle la majeure partie de la production primaire.

Le rapport C/N

C'est un indicateur de la dynamique de décomposition de la matière organique du sol. C'est un indicateur très général qui ne rend pas bien compte de l'évolution possible du produit, tout dépendant des formes biochimiques sous lesquelles se trouvent le carbone (C) et l'azote (N). En général, plus le produit est stable, plus le C/N est élevé.

- $C/N > 12$: la matière organique a des difficultés à se décomposer voire s'accumule.
- $C/N < 10$: la décomposition est rapide et le stock en matière organique diminue.

L'analyse de terre permet de calculer le taux de matières organiques et aide au pilotage des apports de produits organiques pour l'entretien ou le redressement de ce taux.

Le taux de MO d'un sol est calculé à partir de la mesure du carbone organique total d'un échantillon de terre fine.

$$\text{Matières Organiques} = \text{Carbone organique total} \times 1.72 \quad (\text{Eq 14})$$

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Les sols contiennent 2 à 10 t/ha d'azote, essentiellement sous forme organique située dans la couche labourée comprise entre 0 et 25/30 cm de profondeur.

L'azote minéral est essentiellement présent sous deux formes : l'ion ammonium (NH_4^+), l'ion nitrate (NO_3^-). L'azote minéral présent dans le sol ne représente généralement que quelques dizaines de kg par hectare.

L'azote total regroupe toutes les formes d'azote minéral et organique présentes dans un échantillon de sol, excepté l'azote gazeux. Il ne fournit aucun renseignement sur l'azote minéral disponible pour le végétal. Il s'interprète essentiellement au travers du rapport C/N. Sur les bulletins d'analyses, le dosage de l'azote total s'effectue par une méthode normalisée : la méthode Kjeldahl (NTK) qui cependant ne dose pas les formes oxydées (N-Nox).

Donc $\text{NTK} = \text{azote organique} + \text{NH}_4^+$.

Tableau 5: Classement des sols en fonction de leur rapport C/N

6	8	9	10	11	12	14	>14
Très faible	Faible		Normal		Légèrement élevé	Elevé	Très élevé
Sol à décomposition rapide de la matière organique		Bonne décomposition de la matière organique				Sol d'activité biologique réduite ramenant à une décomposition lente de la matière organique	

Plus le rapport C/N est élevé (>12), plus l'activité biologique est réduite et la minéralisation rencontre des difficultés. Cela traduit des conditions d'anaérobie, d'acidité excessive.

Le calcaire

Définition

Le calcaire a pour formule CaCO_3 c'est un minérale qui n'est pas toujours présent dans les sols. Il ne faut pas confondre le calcaire avec calcium car tous les sols contiennent du calcium qui est considéré comme un élément majeur, mais tous les sols peuvent ne pas contenir du calcaire.

Le calcaire a un rôle double dans les sols :

- **Rôle nutritif :** le CaCO_3 se dissocie libère de calcium qui est un élément nutritif indispensable pour la nutrition des plantes.
- **Rôle pédologique :** Il intervient dans la cimentation des particules pour former les agrégats.

Il est utile de noter que l'excès de calcium dans un sol calcaire peut être néfaste pour la nutrition des plantes.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

En effet, le calcium peut bloquer l'absorption de certains éléments tel que : Fe, Mg... qui sont indispensables pour la fabrication de la chlorophylle, on a alors une mauvaise fonction chlorophyllienne qui se matérialise par un jaunissement des plantes, c'est le phénomène de chlorose. On peut distinguer deux types de calcaire sur le plan physique : calcaire grossier et le calcaire fin qu'on appelle également calcaire actif.

Il existe au laboratoire deux techniques utilisées pour la détermination des calcaires.

La 1^{ère} technique dite : technique de calcimètre de Bernard. Elle permet de déterminer uniquement le calcaire total (grossier + fin).

La 2^{ème} technique dite : technique d'oxalate de NH_4^+ elle permet de déterminer uniquement le calcaire fin (actif).

Tableau : L'échelle internationale utilisée par la plupart des laboratoires pour apprécier la

Tableau 6: Quantité de calcaire total dans un sol

0-5% de calcaire total	Sol non calcaire
5-15% de calcaire total	Moyennement calcaire
15-30% de calcaire total	Sol calcaire
>30 de calcaire total	Sol riche en calcaire

Effervescence

Il est important de savoir si un sol contient ou non du carbonate de calcium compte tenu des propriétés importantes qui dépendent de l'ion Ca^{+2} . Citons en particulier le pH (plus élevé en sol calcaire), le type d'humus (certains humus sont liés à la présence de calcium), la structure (généralement plus développée et plus stable en milieu calcique ou calcaire). On sait aussi que certaines plantes, dites calcicoles, préfèrent les sols calcaires alors que d'autres, dites calcifuges, les supportent mal ou pas du tout. Mais la réaction de la végétation dépend aussi de la dureté et du degré de fragmentation de la roche présente.

• Estimation de l'effervescence

En posant une goutte d'acide sur du carbonate de calcium, on obtient les réactions suivantes :



Il y a donc un dégagement de CO_2 qui se traduit par l'apparition de bulles au sein de la goutte de liquide. En conséquence, pour examiner si un échantillon de terre contient du carbonate de calcium, il suffit de poser sur lui de l'acide chlorhydrique dilué dans l'eau (un volume d'acide introduit dans deux volumes d'eau).

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Tableau 7: Liaison entre l'effervescence et la teneur estimée en carbonates

Réaction du sol	Teneur estimée
S'il n'y a pas d'effervescence visible	Nulle
Si l'effervescence est audible et si quelques bulles de CO ₂ apparaissent seulement après quelques secondes (attention à ne pas confondre avec un dégagement d'air lié à l'introduction de liquide dans l'échantillon)	Faible
Si l'effervescence est visible et bulles assez nombreuses	Modérée
Si les bulles forment une couche peu épaisse mais que cette couche est plus ou moins continue.	Forte
Si la réaction importante avec des bulles formant rapidement une écume épaisse.	Très forte

Les formes d'accumulation du calcaire

Il y a 4 formes d'accumulation du calcaire dans le sol :

- **La forme diffuse :** c'est une forme hétérogène de calcaire qui ne peut rencontrer dans un horizon ou dans tous le profil, la quantité généralement faible et ne présente aucun problème pour le sol ou pour les végétaux.
- **Forme pseudo mycélium :** dans ce cas l'accumulation se fait sous la forme de filament au niveau des horizons on trouve cette forme autour des agrégats ou le long des pores, cette forme n'est pas également dangereuse pour la mise en valeurs des sols.
- **Forme nodulaire :** dans ce cas on assiste une individualisation des accumulations des calcaires, ces accumulations peuvent être nocives car il existe 2 types de nodules : Nodules cohérents et meubles : meuble est plus dangereux et peuvent libère des quantités importantes de calcaire fin (actif).
- **Forme en croutée :** c'est une forme qu'il peut être véritable courante pour la mise en valeur du sol car en fonction des régions et est particulièrement des conditions climatiques, la croute peut avoir une épaisseur très important.
- **Les accumulations en fonction des régions :** dans les zones arides et semi-arides les accumulations des CaCO₃ se fait dans les horizons supérieurs sous formes nodulaires et en croute ceci est due particulièrement aux conditions climatiques caractérisé par un faible pluviométrie et une évaporation très intense qui dépose les sels en surface. Par contre dans les zones humides et sub-humides caractérisé par une forte pluviométrie, les accumulations des calcaires se fait en profondeur a cause de lessivage du sol.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

2. La biologie du sol

Les scientifiques du sol utilisent généralement une classification de ces organismes selon leur taille même si d'autres classifications existent aussi (classifications selon le régime alimentaire, selon leur habitat). Dans cette classification on range les *bactéries* et les *champignons* dans le groupe des microorganismes (dont la taille ou le diamètre est inférieur à 10 μm).

Les protozoaires et *les nématodes* dont la taille est comprise entre 10 et 200 μm sont classés dans le groupe de la microfaune.

Ensuite, *la mésofaune* comprend principalement les collemboles et les acariens (entre 200 μm et 2 mm).

Enfin, *la macrofaune* comprend les invertébrés dont la taille est supérieure à 2 mm : les principaux représentants sont *les vers de terre*, *les larves d'insectes*, *les myriapodes*, *les limaces*... Certaines classifications incluent le groupe de *la mégafaune* comprenant les vertébrés vivant dans le sol, comme la taupe ou le campagnol.

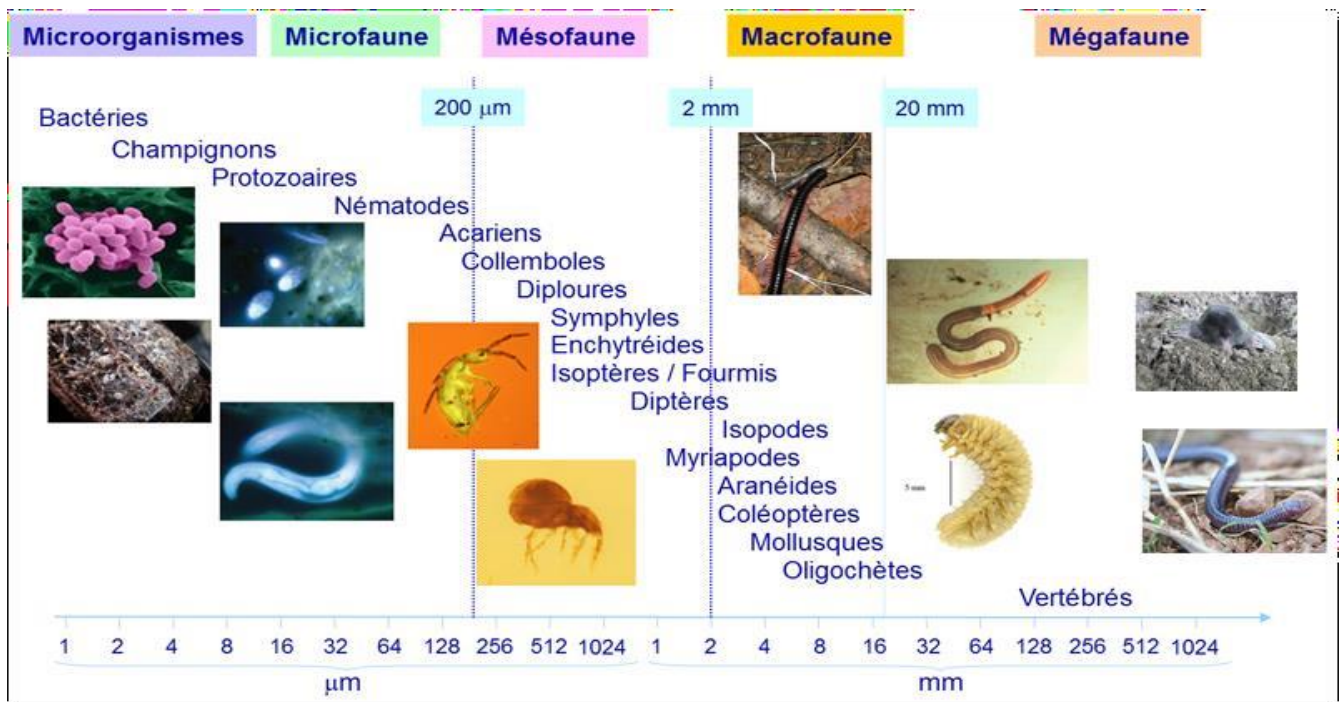
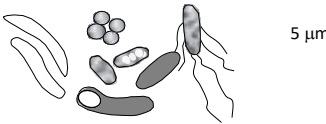
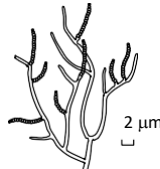
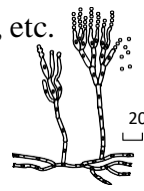

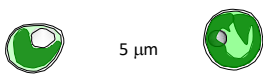


Figure 25: Classification par taille des organismes du sol

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Tableau 8 : Microflore du sol : bactéries, actinomycètes, champignons, cyanobactéries et algues.

Microorganismes	Description	Activité dans le sol
<p>Bactéries</p> <p>cytophaga, rhizobium, clostridium, etc.</p> 	<p>petites cellules dépourvues de vrai noyau, ce sont des procaryotes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Environ 10^9 « germes » vivants par gramme de sol soit une biomasse de 500 mg/ g de sol • Certaines synthétisent des molécules organiques (polysaccharides,...) entrant dans la composition de l'humus, humines résistantes à la dégradation. • Dans des conditions aérobies ou anaérobies, elles oxydent la matière organique plus ou moins complètement. • Certaines espèces, symbiotes ou non, peuvent fixer l'azote atmosphérique.
<p>Actinomycètes (actinobacteries)</p> <p>streptomyces, frankia, etc.</p> 	<p>cellules dépourvues de vrai noyau (procaryotes). Ramifiées, elles ressemblent au mycélium des champignons (diamètre 10 fois plus petit).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques comme de la cellulose et de la chitine. Se développent sur de la matière organique déjà partiellement dégradée et sécrètent des antibiotiques (actinomycine, ...) • Certains forment des nodules au niveau des racines de certains arbres participant à la fixation de l'azote atmosphérique.
<p>Champignons</p> <p>penicillium, aspergillus, etc.</p> 	<p>la plupart des champignons possèdent un appareil végétatif, mycélium, formé de filaments ramifiés (hyphes) cloisonnés ou non. Les cellules sont nucléées (eucaryotes) mais ne possèdent pas de pigments chlorophylliens.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'extension du mycélium d'un "individu fongique" peut atteindre plusieurs mètres (on connaît un basidiomycète dont le mycélium couvrait 15 hectares). • Les champignons sont des hétérotrophes, ils sont les principaux minéralisateurs. • Certaines espèces vivent en symbiose (mycorhizes) avec les plantes.
<p>Cyanobactéries et algues</p> <p>chlorelle, pleurococcus, etc.</p>  <p>nostoc, etc.</p> 	<p>les cyanobactéries sont des petites cellules sans vrai noyau à pigments chlorophylliens, isolées ou groupées</p> <p>les algues (vertes, jaunes-vertes et diatomées) sont des cellules eucaryotes à pigments chlorophylliens</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 10 à 1000 kg de biomasse (matière sèche) par hectare, jusqu'à 24 tonnes dans les rizières pour les seules cyanobactéries. • Elles colonisent rapidement les surfaces minérales brutes qu'elles altèrent par la sécrétion de substances dissolvantes. Elles forment parfois des encroûtements qui modifient la structure du sol. • Ce sont les seuls producteurs primaires du sol.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologique du sol

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Le sol est l'écosystème le plus riche en organismes vivants. Cette vie intense permet le cycle des matières organiques : l'humification et la minéralisation de la litière.

Les principaux groupes d'animaux du sol sont classés en quatre catégories :

- La microfaune : organismes inférieurs à 0,2 mm qui ne peuvent vivre que dans l'eau (protozoaires, rotifères, tardigrades...);
- La mésofaune : organismes de taille comprise entre 0,2 mm et 4 cm (acariens, collembolles, petits insectes et myriapodes...);
- La macrofaune : organismes de taille comprise entre 4 cm et 10 cm (lombrics, myriapodes...);
- La mégafaune : animaux de plus de 10 cm : grands lombrics, rongeurs, taupes...



Les **protozoaires** sont des animaux primitifs unicellulaires, non capables de photosynthèse. Toutefois, pour certaines espèces, la limite avec certains organismes autotrophes n'est pas évidente. Ils sont excessivement nombreux dans le sol. Leur activité est très dépendante de l'humidité ; par sécheresse, ils s'enkystent. Ils mangent surtout des bactéries et jouent donc un rôle dans la composition microbiologique du sol. Certaines espèces comme les thécamibiens sont essentiellement saprophages.

Les **amibes** sont des protozoaires, de la classe des rhizopodes, d'une taille comprise entre 10 μ m et 3 mm, qui se déplacent par émission de pseudopodes (sortes de prolongement) et se nourrissent par **phagocytose** (encerclement et digestion de la source de nourriture).

Les amibes comprennent surtout deux ordres : les amibiens nus et les thécamibiens.

Les **amibiens nus** se présentent comme une cellule, aux contours changeants, qui progresse en émettant des pseudopodes ; l'amibe se nourrit généralement d'autres protozoaires qu'elle enferme entre deux pseudopodes dans une vacuole digestive (phagocytose). Pour se reproduire, l'amibe se divise en deux et le noyau se sépare en deux parties, de sorte que chaque cellule fille se trouve pourvue d'un noyau. Parfois, le noyau de l'amibe se divise en une centaine de petits noyaux qui s'entourent d'un peu de cytoplasme et d'une coque résistante (kystes).

Les **thécamibiens** ou amibes testacées sont enfermés dans une coque rigide.

Notons que certaines amibes parasites sont pathogènes (provoquent des maladies). L'amibe dysentérique provoque, dans les pays chauds, l'amibiase qui se transmet par ingestion de kystes d'amibes dans l'eau contaminée. Cette maladie intestinale s'accompagne de coliques

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

et de diarrhées sanglantes et peut dégénérer en hépatite (infection du foie). Il s'agit d'une maladie grave qui reste difficile à traiter. L'ébullition de l'eau de boisson reste un moyen de l'éviter.

Plathelminthes



Cet embranchement comprend, entre autres, la classe des turbellariés ou **vers plats** de petite taille de 0,2 à plusieurs cm. Les **plathelminthes** se nourrissent de petites proies vivantes et surtout de protozoaires.

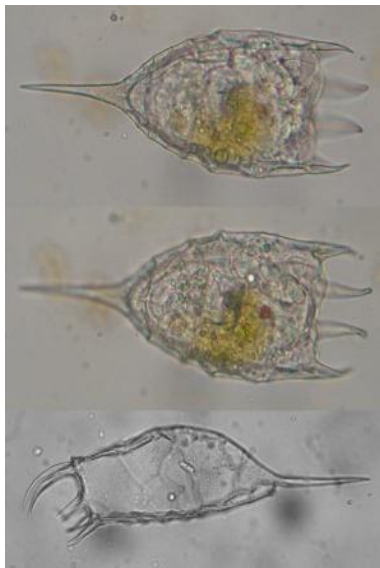
L'espèce la plus connue est la planaire, commune dans nos eaux douces et dans le film d'eau qui enveloppe les particules du sol.

Les plathelminthes sont généralement hermaphrodites c'est-à-dire qu'ils possèdent à la fois des organes reproducteurs mâles et femelles. Toutefois, la fertilisation, croisée, a lieu après la copulation. Celle-ci permet à deux vers d'emmagasiner le sperme de l'autre individu. Les gamètes mâles sont produits avant les ovules (**protandrie**), ce qui réduit le risque d'autofécondation.

Ils peuvent également se dupliquer par scissiparité (division) et sont capables de régénération.

Chez certains parasites, comme le ver solitaire, l'autofécondation est courante. Les segments contenant les œufs sont relâchés en même temps que les excréments de leur hôte.

Rotifères



L'embranchement des **rotifères** comprend des animaux microscopiques **métazoaires** c'est-à-dire constitués d'un grand nombre de cellules. De nombreux rotifères vivent dans les eaux et dans le film d'eau qui enveloppe les particules du sol.

Les rotifères constituent en grande partie le **zooplancton** d'eau douce.

Leur corps est divisé en trois parties : un appareil rotateur cilié, un tronc et un pied. Ils possèdent un appareil masticateur et sont saprophytes ou prédateurs.

Les rotifères (littéralement porteurs de roues) peuvent résister à la dessiccation par reviviscence. Ils se contractent en boule et s'enkystent jusqu'au retour de conditions plus favorables. Leur résistance est extraordinaire. Par exemple, un rotifère qui avait vécu desséché dans un herbier durant cinquante-neuf ans a pu reprendre vie. D'une manière générale, la reproduction des rotifères est classique avec une fécondation interne.

La gestation est donc interne et la femelle accouche directement d'un petit. Cependant, il existe certaines espèces qui sont **parthénogénétiques** c'est-à-dire que les individus se multiplient de manière non sexuée (sans fécondation). Dans ce cas, il n'existe que des femelles. Les Bdelloïdes se multiplient de cette façon depuis plus de 35 Ma, sans aucune trace d'existence de mâle. Les chercheurs s'interrogent sur cette absence de reproduction sexuée qui ne semble pas sans risque de mutations nuisibles à l'espèce. Et finalement, d'autres espèces, enfin, qui produisent **deux types d'œufs**. Ils se développent par **parthénogenèse**, un donnant des femelles et l'autre des mâles dégénérés incapables de se nourrir mais qui féconderont néanmoins les femelles. Le **zygote** (cellule œuf formé de la

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

fusion des gamètes mâles et femelles) est capable de survie même lorsque le milieu s'assèche. Lorsque les conditions redeviennent plus favorables, les zygotes deviennent de nouvelles femelles qui se multiplient par parthénogenèse.

Tardigrades



Les **tardigrades** sont des champions de la **résistance** animale. Leur vie active est d'une vingtaine de mois mais, en conditions défavorables, ils sont capables de se vider de leur eau et de passer en **cryptobiose** (sorte de momification), en prenant une forme de tonnelet pour limiter les pertes en eau. L'animal **produit un sucre** qui prend lieu et place de l'eau de son corps, ce qui limite l'altération des membranes cellulaires. Le tardigrade peut maintenir cet état pendant des siècles voire des millénaires. Etant capable de résister à des conditions qu'on ne retrouve nulle part sur terre, certains ont été jusqu'à penser à l'origine extraterrestre de ces animaux.

Pourquoi la sélection naturelle les aurait-elle dotés d'une telle résistance ? Ainsi, une mousse desséchée depuis un mois et soumise à un refroidissement de -190°C puis chauffée à 151°C , donne des tardigrades actifs après humectation de la mousse... Ils peuvent subir une pression de 600 millions de Pascal, soit six fois la pression exercée au fond de l'océan à

-10.000 m alors que les membranes cellulaires d'autres organismes sont altérées bien avant cela. Ils résistent à des rayons X et à des substances chimiques toxiques...

La plupart des tardigrades se nourrissent de végétaux chlorophylliens. Ils collent leur bouche au végétal et, grâce à leur stylet et à leur gésier qui sert de pompe, ils en aspirent le contenu.

Ce sont des animaux qui nécessitent un mince film d'eau pour mener une vie normale. Ils peuvent mesurer jusqu'à **1 mm** de long et portent **quatre paires de pattes**. Ils colonisent surtout la mousse et les lichens.

Chez les tardigrades, les spermatozoïdes sont injectés dans le **cloaque** de la femelle puis gagnent l'ovaire où ils attendent la maturité des ovules. Les œufs sont pondus isolément ou par petits amas ou encore pondus dans la mue de la femelle qui a quitté sa cuticule (un à trente œufs par mue).

Certaines espèces abandonnent leurs œufs dans des objets creux comme des coquilles vides.

Dès l'éclosion, les jeunes ressemblent aux adultes et n'en diffèrent que par leur taille. L'animal grandit par mues, environ une par mois.

Nématodes



Ces vers ronds mesurent de 2 à 5 mm de long et abondent dans le sol. Les **nématodes** vivent dans le film d'eau qui enveloppe les particules du sol. Certaines espèces se nourrissent de bactéries ou d'autres plantes et d'autres mangent des protozoaires. Les dégâts qu'ils causent sont parfois importants.

La reproduction des nématodes peut être **sexuée**, **hermaphrodite** ou **parthénogénétique**.

Les œufs peuvent être expulsés ou se développer dans le corps de la mère qui est alors **ovovivipare** (c'est-à-dire que les œufs éclosent à l'intérieur du corps maternel).

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Les nématodes mâles sont absents chez certaines espèces. Ils peuvent être rares chez d'autres espèces ou n'apparaître que dans des conditions de stress. Les nématodes mâles ont une paire de **spicules** (sorte de petites pointes) copulatoires qui peuvent saillir du corps.

Mollusques

Limaces



Les transformateurs de matières organiques sont surtout les **limaces**. Leur **coquille** est **réduite** et cachée sous leur dos. Elles se nourrissent généralement de débris végétaux ou de champignons.

Les limaces sont surtout nocturnes et actives par temps humide. En période de sécheresse, les petites limaces vivent et s'alimentent dans le sol (racines, champignons).

Sans eau, la limace ne peut produire de mucus et donc se déplacer. Ce mucus protège également les limaces des infections bactériennes, virales et fongiques (champignons).

Une limace peut ingérer jusqu'à la moitié de son poids en une seule nuit.

Les limaces sont **hermaphrodites**, à la fois mâles et femelles. La **fécondation** est cependant **croisée**. Il semble que le film de mucus laissé au sol par le déplacement des limaces les aide à se retrouver grâce à l'odeur. Ce mucus, grâce aux substances chimiques qu'il contient, facilite également l'humification de la litière. Les gamètes mâles sont toutefois mûrs avant les gamètes femelles. Le mollusque pond des œufs (de 100 à 500) en paquets de 10 à 50, qu'elle enfouit dans la terre ou sous un abri. La durée d'incubation dépend de la température (jusqu'à 3 mois à 5°C et 2 à 3 semaines à 20°C). Il existe une ou deux générations par an. Selon les espèces, les limaces vivent de 9 à 18 mois. Les hivers froids et secs leur sont préjudiciables.



Les **escargots** sont des mollusques gastéropodes pourvus d'une coquille hélicoïdale (qui a la forme d'une hélice). Les escargots, comme les limaces, possèdent une langue couverte d'aspérité, appelée **radula**. La plupart sont **phytophages** (se dit d'un animal qui se nourrit de substances végétales) ou **détritivores** (qui traduit le régime alimentaire des espèces qui s'alimentent de débris organiques d'animaux et/ou de végétaux). Ils contribuent à la décomposition des matières organiques pour d'autres organismes plus petits tels que les champignons et les bactéries. Ils se déplacent grâce à leur pied qui est un puissant muscle qui se contracte et s'allonge. Ils sécrètent du mucus qui leur permet d'avancer plus facilement voire de se maintenir verticalement sur certaines parois. Ils se dessèchent et laissent une traînée brillante à la lumière.

Escargots agglutinés en période sèche

Ils ne sont actifs que lorsque l'humidité est suffisante. En cas de sécheresse, ils se rétractent dans leur coquille qu'ils obturent par un bouchon de mucus.



Les escargots terrestres sont **hermaphrodites**. Ils pratiquent une cour avant l'**accouplement**. Ils s'inséminent réciproquement par paires et pondent jusqu'à 100 œufs. Ils possèdent une « **spermathèque** ». Toute nouvelle portée d'œufs est ainsi fécondée par un mélange de sperme provenant de plusieurs mâles, ce qui favorise le brassage génétique. Par temps tiède et humide, les escargots enterrent leurs œufs jusqu'à 5 à 10 cm de profondeur. L'éclosion a lieu au bout de 2 à 4 semaines. La ponte peut avoir lieu une fois par mois.

Copulation d'escargots de Bourgogne (*Helix pomatia*)

Annélides

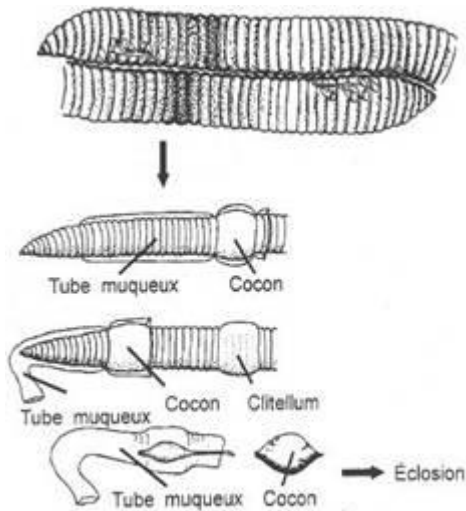
Ce sont des agents d'humification très actifs, spécialement certaines familles d'**oligochètes**(vers de terre) qui comprend :



- Les **enchytréides** sont des vers minuscules de 5 à 25 mm de longueur, se nourrissant de petits débris végétaux. Leurs glandes salivaires sécrètent un produit qui influence favorablement la décomposition microbienne. Ce sont les principaux agents d'humification dans de nombreux milieux forestiers.



- Les **lombrics** dont la composition qualitative et quantitative est un excellent indicateur des conditions écologiques. Des réactions biochimiques ont lieu par le passage de la terre à travers le tube digestif du ver. Les galeries contribuent à aérer le sol et à remodeler la terre.



Le lombric possède à la fois des organes reproducteurs mâles et femelles (hermaphrodisme). Toutefois, les lombrics s'accouplent pour se reproduire en se plaçant **tête-bêche** (de manière que la tête de l'un soit du côté de la queue de l'autre), s'entourant d'un tube muqueux produit par le clitellum (renflement). L'un d'eux émet le sperme qui est recueilli par les réceptacles séminaux de l'autre. Les œufs sont pondus dans un cocon aussi secrété par le clitellum. Le ver fait glisser ce cocon vers l'avant et les spermatozoïdes y pénètrent lorsque ce dernier passe devant les segments qui les contiennent. La fécondation a donc lieu dans le cocon. A la naissance, les petits vers sont formés.

Reproduction - Lombric

Arthropodes

Crustacés



Parmi ceux-ci, citons les isopodes terrestres ou **cloportes**, consommateurs de débris végétaux morts et facilement rencontrés sous les bois morts, les pierres...

Le cloporte est un crustacé au corps segmenté brun-jaunâtre à noirâtre. Le corps est divisé en trois parties : la tête, le thorax et l'abdomen.

La tête porte les yeux, deux paires d'antennes (dont une très courte) et les pièces buccales; le thorax comporte sept segments, chacun pourvu d'une paire de pattes marcheuses (ce qui l'en distingue de l'insecte) et l'abdomen comprend des branchies contenues dans de petites poches d'eau.

Le cloporte est **lucifuge** (il fuit la lumière). Il est donc surtout nocturne et il recherche les endroits sombres et humides. Il s'alimente de matière végétale morte en décomposition.

Il vit deux à trois ans en effectuant des mues mensuelles. Le cloporte femelle maintient les œufs fertilisés en dessous de son corps dans une poche incubatrice appelée **marsupium**. Après un mois d'incubation, la mère donne naissance à sa progéniture.

Arachnides

Acariens

Les **acariens** diffèrent des **araignées** par leur **céphalothorax** qui forme, avec l'abdomen, une masse unique qui les fait ressembler à une petite boule alors que le corps des araignées présente un étranglement entre le céphalothorax et l'abdomen. De plus, les araignées possèdent une paire de chélicères ou crochets à venin et une paire de palpes. Beaucoup vivent à la surface du sol et toutes sont prédatrices.

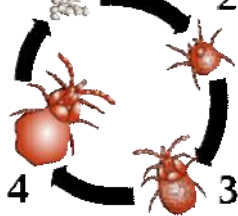
Les acariens sont **ovipares** c'est-à-dire qu'ils se reproduisent par des œufs. Se succèdent ensuite les stades larves, nymphes et adultes. Cependant, la **parthénogenèse** existe aussi chez les Acariens.



Ils sont abondamment représentés dans presque tous les sols. Ils montrent une extraordinaire diversité de formes. Lorsque les conditions écologiques ne sont pas favorables aux vers-fouisseurs, ce sont eux, avec les collembolles qui sont les principaux agents d'humification.



L'aôûtat désigne la nymphe d'une espèce d'acarien de la famille des Trombiculidés : *Trombicula autumnalis*. La larve de cet arthropode parasite temporairement les organismes à sang chaud et occasionne par ses piqûres des démangeaisons parfois importantes chez son hôte. L'adulte est un petit acarien de couleur rouge qui mesure environ trois mm et possède un corps couvert de poils denses et courts. Les femelles pondent plusieurs centaines d'œufs et meurent avant l'automne. La larve rouge vif ne possède que 3 paires de pattes et mesure 0,2 mm.



Vie parasitaire

1. Œufs
2. Larve
3. Nymphe
4. Imago



La larve vit à la surface du sol et contamine l'homme et les petits animaux à sang chaud lorsqu'ils passent dans l'herbe. Elle se nourrit alors de peau et de lymphes durant 1 à 7 jours avant de devenir adulte.

Les piqûres apparaissent dans les plis de la peau (intérieur des coudes et genoux, sous les bras...) et à l'endroit des élastiques (chevilles, sous-vêtements, ceinture) et peuvent démanger sévèrement pendant plusieurs jours.

Symptômes : Apparition de petites papules rouges (2-3 mm de diamètre) plus ou moins entourées d'une auréole plus claire de 1 mm après quelques heures. Un prurit intense apparaît après 24 h et peut persister pendant 1 semaine. Possibilité de complication avec fièvre et paraplégie lorsque le parasite se situe au voisinage d'une veinule.

La **tique** est bien un acarien.



Les forme, taille et couleur des tiques varient beaucoup selon l'espèce et son stade de développement mais leur corps est toujours ovalaire et leur tête est prolongée d'un rostre équipé de deux chélicères.

Leur corps n'est pas segmenté en trois régions comme chez la plupart des arthropodes. On distingue simplement la partie antérieure ou « capitulum » (tête en latin) de la partie postérieure dite « idiosome ».

Le capitulum : constitué d'une région basale, dite base capitulaire qui porte trois pièces buccales (et jamais d'yeux qui, dans les espèces où ils sont présents, sont portés par le scutum de l'idiosome) :

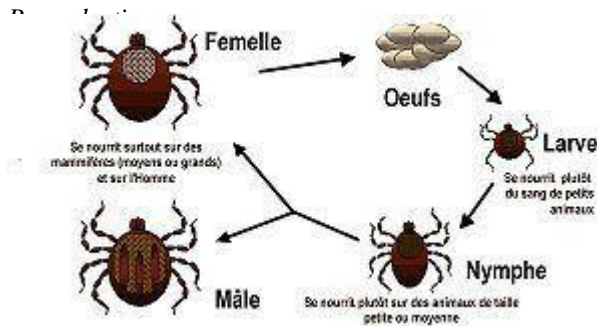
- Un hypostome, dirigé vers l'avant, côté ventral, et garni de plusieurs files de dents qui aident la tique à s'ancrer solidement dans la peau de son hôte ;
- Une paire de chélicères, rétractiles dans une gaine protectrice, terminés par des dents ; ils sont dilacérateurs et coupent la peau, venant ainsi mécaniquement en aide à l'action chimique de la salive, pour perforer la peau. Ils se superposent à l'hypostome, en face dorsale, les deux pièces formant le rostre vulnérant (les tiques « longirostres » sont celles dont le rostre est plus long que large, les « brévirostrès » celles dont le rostre est aussi large ou moins large que long) ;
- Une paire de palpes (ou pédipalpes) disposée latéralement au rostre. Ils sont formés chacun de quatre articles de tailles et fonctions différentes :
 - Le premier, très court, articule le palpe sur la basis capituli ;
 - Le deuxième et le troisième sont plus longs que le premier et pourvus de soies sensorielles ;
 - Le quatrième est plus réduit, mieux visible côté ventral, caché dans une fossette du troisième article, très richement pourvu de petites soies sensorielles.

Ces palpes ont un rôle sensoriel, ne sont pas du tout vulnérants et donc ne pénètrent pas dans les tissus lors de la fixation de la tique mais restent posés à la surface de la peau. Les tiques n'ont pas de canal alimentaire, ni de canal salivaire, comme la plupart des insectes hématophages (moustiques, punaises ...) ; l'apport de salive comme la succion du sang se font par l'espace ménagé entre hypostome et chélicères.

Le tégument des tiques est garni de pores, soies et divers autres organes sensoriels. La détection du gaz carbonique et de l'acide butyrique dégagés par les animaux jouent un rôle dans le choix de l'hôte et peut-être dans le choix du point de fixation de la tique sur son hôte.

L'idiosome :

- Sa face dorsale porte une plaque sclérifiée dite « écusson » ou « scutum » couvrant environ la moitié du dos d'une tique à jeun, la totalité chez les mâles ;
- Les 8 pattes s'insèrent en ligne sur la face ventrale. Elles comportent les articles classiques (coxa, trochanter, fémur, patelle, tibia, et tarse) et sont conclues par une ventouse (pulvile) et deux griffes permettant à la tique de se déplacer sur presque tous les supports. La première paire de pattes porte au niveau du tarse un organe sensoriel olfactif important, l'organe de Haller, sensible à la fois au degré d'hygrométrie, aux phéromones, au gaz carbonique, aux métabolites exhalés par les ruminants, à l'acide lactique ;
- Un pore génital s'ouvre sur la face ventrale, et nettement plus en arrière s'ouvre l'orifice anal. La position du « sillon anal » (antérieur ou postérieur à l'anus) différencie la famille des Ixodes des autres tiques dures. La forme et taille de l'écusson, la présence et position de stigmates, de soies sensorielles et d'ocelles ... qui orientent la diagnose. On connaît quelques symbiotes vivant dans la tique (ex. : *Spiroplasma* sp.) et des bactéries de l'environnement y sont aussi détectées (ex. : *Mycobacterium* sp.), lesquels pourraient éventuellement interagir avec des micropathogènes véhiculés par la tique.



Seules les tiques adultes s'accouplent au sol avant la quête de l'hôte ou sur l'hôte lui-même.

Toutes les espèces connues de tiques se développent en passant par quatre stades évolutifs distincts :

- L'œuf ;
- La larve (qui n'a que 3 paires de pattes, griffues) ;
- La nympe (qui est octopode comme l'adulte mais sans orifice génital) ;
- L'adulte.

A ce dernier stade, le dimorphisme sexuel est généralement net (écusson chitinisé) plus développé en face dorsale chez le mâle des Ixodidae que chez la femelle, dont le tégument doit rester souple pour se distendre pour une prise de sang maximale afin d'élaborer ses œufs.

Dans la plupart des cas, durant son cycle de vie, une tique change d'hôte à chacun de ces stades :

Le cycle est dit « triphasique » quand au sortir de l'œuf, la larve se fixe sur un premier hôte qu'elle quitte après y avoir fait son premier repas, c'est-à-dire effectué sa première phase parasitaire. Elle mue alors au sol, puis doit trouver un nouvel hôte pour son repas nymphal, qui est la deuxième phase parasitaire, après quoi elle se laissera à nouveau tomber au sol pour effectuer la mue de transformation en adulte.

Devenue adulte elle recherche un troisième hôte pour effectuer le dernier repas ou troisième phase parasitaire (chez ces tiques, les adultes sont toujours plus porteurs de pathogènes transmissibles que la nympe et la larve, chaque repas étant une chance de contracter les germes).

Un petit nombre d'espèces de tiques ne changent pas d'hôte à chaque stade :

Le cycle est dit « diphasique » quand il ne comporte que 2 phases parasitaires : la larve effectue son repas sur un hôte puis mue en nympe et effectue son second repas sur un même hôte avant de se détacher pour se transformer en une tique adulte qui effectuera sa deuxième phase parasitaire sur un deuxième hôte.

Le cycle est dit « monophasique » quand la tique effectue tout son cycle de développement (3 repas et 2 mues) sur un même individu-hôte. Seule la larve à jeun effectue une quête d'hôte.

La maladie de Lyme.

Comment se transmet cette maladie ?

La maladie de Lyme est causée par une bactérie, *Borrelia*, transmise par la tique à l'occasion d'une pique.

Borrelia est extraordinaire à plus d'un titre :

Tout d'abord, elle peut rester dans notre corps pendant plusieurs années (voire toute une vie) parce qu'elle se divise très lentement et est donc peu sensible aux antibiotiques (les antibiotiques ne tuent les bactéries que dans la mesure où elles se multiplient). Très discrète également, elle provoque peu de réactions de défense quand elle se promène dans notre organisme.

En outre, *Borrelia* possède peu d'antigènes sur sa surface ce qui ne stimule guère nos défenses immunitaires. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les anticorps apparaissent

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

très tard (plusieurs mois après la piqûre), rendant pratiquement inutile un dosage d'anticorps pour détecter la maladie.



Comment diagnostique-t-on la maladie ?

Au début de la maladie (soit quelques semaines environ après la piqûre de tique), le diagnostic est aisé car on remarque une tache rouge sur la peau autour de la piqûre ; cette tache grandit lentement et s'efface parfois en son centre pour ne laisser qu'un anneau rouge sur la peau. Elle n'est pas gonflée, ne provoque aucune douleur et ne chatouille pas.

Il ne faut pas confondre cette rougeur avec celle qui apparaît immédiatement après la piqûre de tique. Toutes les piqûres ne donnent en effet pas la maladie ; il ne faut s'inquiéter que si l'on constate les premières rougeurs 48 heures après la morsure.



Le patient souffrant de la maladie de Lyme peut ressentir un état grippal qui se prolonge, accompagné éventuellement de maux de tête, de douleurs articulaires ou de névrites (les microbes s'accumulent dans les vaisseaux sanguins qui irriguent les nerfs, les privent parfois d'oxygène et engendrent alors des douleurs comparables à une sciatique). Certaines personnes développent une paralysie transitoire du nerf facial ou une inflammation d'une articulation (souvent le genou).

Rares sont les patients qui présentent les formes les plus graves de la maladie, à savoir une encéphalomyélite (de minuscules lésions du cerveau provoquant des insomnies, un changement de caractère ou une perte de mémoire) ou une myélite (affection de la moelle épinière à l'origine d'une insensibilité au niveau des jambes).

Quel est le traitement ?

Lorsque la maladie de Lyme est diagnostiquée, on administre des antibiotiques au patient. Ce traitement est efficace sur les symptômes mais il arrive que le microbe persiste dans le corps de certains malades. Il ne faut pas nécessairement s'en inquiéter car notre corps abrite une multitude d'autres microbes qui ne nous affectent pas outre mesure. Ce sont les complications de l'infection qu'il faut traiter, pas la présence du microbe.

Quelles précautions prendre pour éviter les piqûres de tiques ?

Lorsque vous vous promenez en forêt ou dans la nature, veillez à rester dans les allées tracées et à ne pas vous frotter aux herbes hautes. Si vous sortez des sentiers battus, ne vous promenez pas jambes nues, portez un pantalon, de couleur claire de préférence pour pouvoir repérer une tique et la retirer du vêtement. Si malgré toutes vos précautions la bestiole a élu domicile sur votre épiderme, vous avez 24 heures pour agir avant qu'elle ne vous transmette la maladie de Lyme. Pour l'ôter, utilisez une pince spéciale (vendue en pharmacie) ou une pince à épiler aux bords recourbés. Glissez l'outil sous l'acarien et effectuez une rotation puis tirez délicatement. Si la tique a eu le temps de piquer, la « méthode de l'agenda » est souhaitable ; elle consiste à surveiller tous les huit jours l'endroit de la piqûre (pendant plusieurs semaines) et à guetter l'apparition d'une rougeur ; s'il y a une rougeur, il faut évaluer l'évolution de la tache pour voir si elle s'étend. Il convient de rester vigilant pendant plusieurs semaines et si la tache grandit, n'hésitez pas à consulter un spécialiste.

Opilions



Les **opilions** ou faucheux, souvent confondus avec les araignées ont un corps segmenté, en une partie. Les grandes espèces vivent parmi les herbes alors que les plus petites fréquentent la litière. Ce sont également des animaux prédateurs.

Ils se caractérisent par 4 paires de pattes, souvent très longues. La reproduction, au contraire des araignées, ne fait pas intervenir de parade nuptiale et l'insémination est directe. La copulation ne dure que quelques minutes et peut se répéter plusieurs fois. Les femelles pondent les œufs fécondés grâce à leur ovipositeur et les abandonnent dans la nature.

Pseudoscorpions



Les **pseudoscorpions** rappellent les scorpions par leur aspect, excepté la queue, mais sont plus petits (2 à 8 mm). Ils se nourrissent de collemboles ou d'autres petits insectes.

Les mâles déposent des spermatophores (réceptacles de sperme) au sol que les femelles collectent. Les œufs sont pondus dans une poche incubatrice située sous le corps de la femelle. Le nombre annuel de générations peut varier selon la position géographique, du nord au sud. Le développement jusqu'à l'adulte comporte 6 stades dont chacun est entouré d'un cocon de soie.

L'hiver, les pseudoscorpions entrent en **diapause** c'est-à-dire un arrêt obligatoire du métabolisme en se regroupant dans des nids d'hibernation. Les pseudoscorpions sont souvent transportés par d'autres espèces animales, notamment à fourrure ou même par des insectes.

Araignées

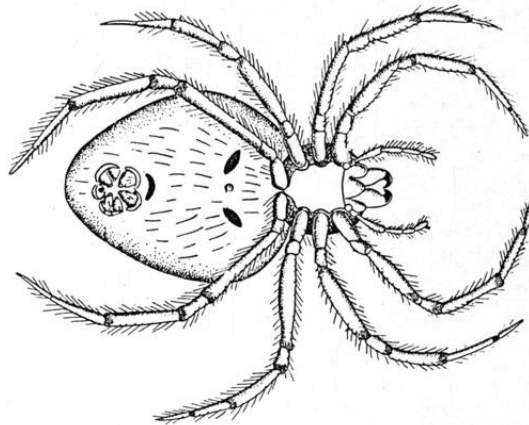
Les **araignées** se distinguent des autres arachnides par la morphologie suivante : le céphalothorax et l'abdomen sont reliés par un fin pédoncule ; l'abdomen ovoïde porte des filières produisant la soie ; les **chélicères** sont des crochets venimeux et les pédipalpes sont transformés, chez le mâle, en organe copulateur.

Cet animal a la capacité de produire de la soie à l'aide de minuscules protubérances articulées qui sont visibles sur la face ventrale à l'extrémité de l'abdomen. La soie, à l'état liquide dans les glandes, se solidifie une fois en contact avec l'air libre. Ces fils de soie sont solides. Il existe différentes soies qui peuvent être collantes ou visqueuses.

On peut classer les araignées selon leur espérance de vie. Les araignées dites saisonnières vivent de 6 à 8 mois tout au plus et après avoir pondu leurs œufs, elles meurent. Les araignées annuelles peuvent espérer vivre de 1 à 2 ans, elles meurent une fois l'éclosion des œufs terminée. Les araignées pérennes, tel que les mygales, sont celles qui ont l'espérance de vie la plus longue.

Afin de pouvoir grandir, les araignées doivent se débarrasser de leur exosquelette donc elles **muent**. Elles peuvent muer jusqu'à 13 fois avant d'atteindre l'âge adulte. Certaines espèces

d'araignées pratiquent aussi la parthénogenèse.



Dessin d'une araignée en vue ventrale, montrant toutes les caractéristiques de l'ordre.

Contrairement aux insectes, les araignées portent des **yeux simples** et non composés de facettes, le plus souvent au nombre de 8, bien que certaines espèces n'en possèdent que 6, voire 4, 2 ou même aucun. Ils sont placés à l'avant du céphalothorax en deux lignes de quatre yeux ou selon une autre disposition caractéristique d'une famille ou d'un genre. La vision des araignées est néanmoins très mauvaise. Seule la paire d'yeux située au milieu et à l'avant, permet une vision directe. Les yeux latéraux ne détectent que les mouvements.



Marpissa muscosa femelle, *Salticidae*,
araignée (corps de 8 mm de long)
(Beaufays, Province de Liège, Belgique).

Notez les deux grands yeux frontaux médians, typiques de la famille des *Salticidae*. Les araignées de cette famille chassent à vue.

Autour de la bouche sont disposées deux **chélicères** : ces appendices antérieurs sont constitués d'un gros stipe et d'un crochet mobile au bout duquel débouche le canal à venin. Ils sont utilisés avant tout pour mordre, empoisonner et immobiliser les proies. Ils peuvent également servir à transporter des proies et le cocon ovigère (contenant les œufs).

Sous la bouche, un labium ventral est flanqué d'une paire de lames maxillaires.

Situés à côté des chélicères, les **pédipalpes**, membres placés à l'avant du céphalothorax, sont des organes du toucher, l'équivalent des antennes chez les insectes. Ils servent à l'examen sensoriel des proies et à leur manipulation. Chez les araignées adultes mâles, l'extrémité du pédipalpe porte le bulbe copulateur, organe d'accouplement mâle.



Dolomède *Dolomedes fimbriatus*,
Pisauridae, araignée (corps de 13mm de
long) (Tourbière des Hautes-Fagnes,
Province de Liège, Belgique).

Notez les chélicères maintenant les restes d'une mouche digérée, les pédipalpes et les huit yeux disposés en deux rangées.

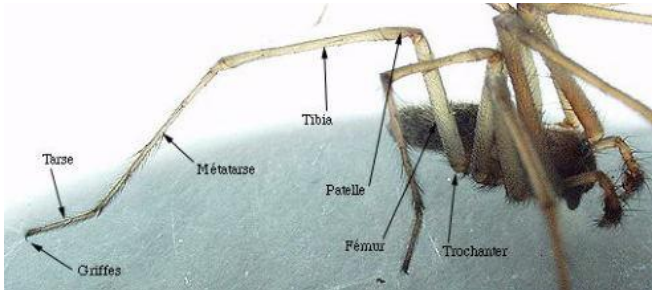
Ventralement, le céphalothorax porte **4 paires de pattes** locomotrices articulées disposées autour du sternum. Chaque patte est composée de 7 articles : de la base vers l'apex, on peut observer une hanche ou coxa, un court trochanter, un long fémur, une plus courte patelle, un long tibia, un métatarse et un tarse terminé par 2 ou 3 griffes qui interviennent dans la manipulation de la soie et dans le déplacement sur les réseaux de fils de la toile. Les pattes portent diverses structures étroitement liées au mode de vie particulier de chaque araignée : des organes sensoriels (épines, crins, poils), des structures de stridulation (sons souvent inaudibles pour l'oreille humaine), des peignes pour « carder » la soie, ...

Une fois matures, les mâles d'araignées cessent de s'alimenter. Ils partent à la recherche d'une femelle réceptrice pour s'accoupler. Ils errent dans l'environnement en pistant les traces odorantes (phéromones), laissées par les femelles sur leur fil de déplacement ou leur toile. Avant l'accouplement, le mâle tisse une petite toile (la toile spermatique) sur laquelle il dépose le sperme. Il aspire alors cette petite quantité de sperme à l'aide du bulbe copulateur situé à l'extrémité de chaque pédipalpe.

L'accouplement ne survient qu'après une période préliminaire (la parade nuptiale) au cours de laquelle le mâle est reconnu comme n'étant pas une proie et apaise le tempérament prédateur de la femelle. Il n'est pas rare, en effet, qu'il se fasse dévorer par la femelle. Les

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

plus rusés échapperont à cette fin tragique en utilisant le subterfuge suivant : apporter une offrande à leur dulcinée... Le bulbe copulateur permet d'introduire directement le sperme dans l'orifice génital de la femelle (l'**épigyne**). La femelle stocke le sperme, parfois pendant de longs mois, dans un réservoir (le **spermathèque**) jusqu'au moment où elle choisit de pondre ses œufs. La plupart du temps, les œufs sont réunis jusqu'à éclosion dans un cocon de soie, puis les jeunes en sortiront tous en même temps. Le comportement de chasseur est instinctif chez les jeunes araignées.



Structure d'une araignée vivante *Tegenaria atrica* mâle, Agelenidae en vue ventrale (Hamois, Condroz, Province de Namur, Belgique).

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Myriapodes (du grec « myrios » qui signifie « dix-mille »).



Les **myriapodes** ou mille-pattes possèdent un corps formé de nombreux segments portant chacun une ou deux paires de pattes. Ils vivent dans la litière des forêts ou sous le bois mort.

La classe des **myriapodes** comprend essentiellement deux ordres :

- Les **chilopodes** qui possèdent une paire de pattes par segment et dont les pattes du premier segment forment des crochets à venin ;
- Les **diplopedes** qui possèdent deux paires de pattes par segment, sauf les trois premiers.

Les diplopedes ne possèdent pas de crochets venimeux comme les chilopodes. Leur régime alimentaire est végétarien et détritovore.

Les deux ordres possèdent une cuticule enduite de lipides qui les protège contre la dessiccation ou l'inondation.

La plupart des myriapodes possèdent des glandes de chaque côté du corps. Les sécrétions nauséabondes qu'elles produisent éloignent les prédateurs (oiseaux, chilopodes). Seul l'étourneau semble apprécier ces myriapodes qui représentent 25 à 50 % de son alimentation.

La reproduction a lieu au printemps jusqu'à la fin de l'été. Il n'y a pas de fécondation directe : le mâle dépose un **spermatophore** au sol ou sur une petite toile qu'il aura confectionnée. La femelle introduira alors celui-ci dans ses voies génitales. La progéniture compte de 15 à 100 jeunes.

Certaines espèces font preuve d'un instinct « maternel » en protégeant leurs œufs tandis que d'autres les abandonnent.

Chez les **myriapodes**, les segments peuvent être ou non tous présents à la naissance. Certains adultes connaissent des états reproducteurs et stériles.



Les **Lithobius**, de l'ordre des **chilopodes**, courent à la surface du sol, parmi les feuilles mortes ou sous les bois morts. Ce sont des prédateurs d'insectes, de vers et de diplopedes (portant deux paires de pattes). Ils possèdent de forts crochets à venin avec lesquels ils attrapent et tuent leurs proies.



Les **géophiles** possèdent un corps long et mince, formé d'un grand nombre de segments portant chacun **une paire de pattes** (25 paires ou plus). Ils se déplacent en serpentant. Les espèces qui vivent en surface sont plus grandes et plus colorées que celles qui vivent dans l'humus.



Les **glomérifères** sont des **diplopodes** au corps trapu, formé de douze segments recouverts d'un enduit cireux. Ils s'enroulent en boule à la moindre alerte. On les trouve dans la litière des forêts, sous les pierres ou les bois morts. Ils se nourrissent de débris de feuilles mortes ou de bois. Durant l'hiver ou en période de sécheresse, ils s'enfoncent dans le sol.

La reproduction a lieu au printemps et en été. Les mâles produisent des phéromones qui attirent les femelles. Après fécondation par le sperme, les femelles pondent de 70 à 80 œufs de 1 mm de diamètre. L'incubation dure 2 mois et le développement complet passe par 9 stades.



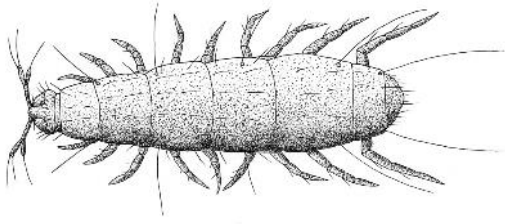
Les **iules** possèdent un corps long et cylindrique, formé de plus de trente segments, portant chacun deux paires de pattes (**diplopodes**). Ils possèdent aussi un enduit cireux et s'enroulent en boule. Ils vivent parmi les feuilles mortes et les bois vermoulus. Par temps de gel ou de sécheresse, ils s'enfouissent dans le sol.

Les géophiles, les iules et les glomérifères sont fuisseurs. Ces deux derniers préfèrent les sols calcaires. Ils se nourrissent de débris végétaux et découpent la litière en petits morceaux.

L'iule est **ovipare** (pond des œufs). Les iules femelles construisent un nid pour abriter leurs œufs, au moyen de salive, d'excréments et de terre.



Les **symphyles**, très nombreux dans le sol, sont de petite taille (2 à 8 mm), au corps allongé, non pigmenté, muni de douze paires de pattes et d'une paire d'antennes. Le corps est terminé par deux appendices en forme de lamelle. Ces animaux sont communs parmi les mousses et dans l'humus où ils se rassemblent en agrégats.

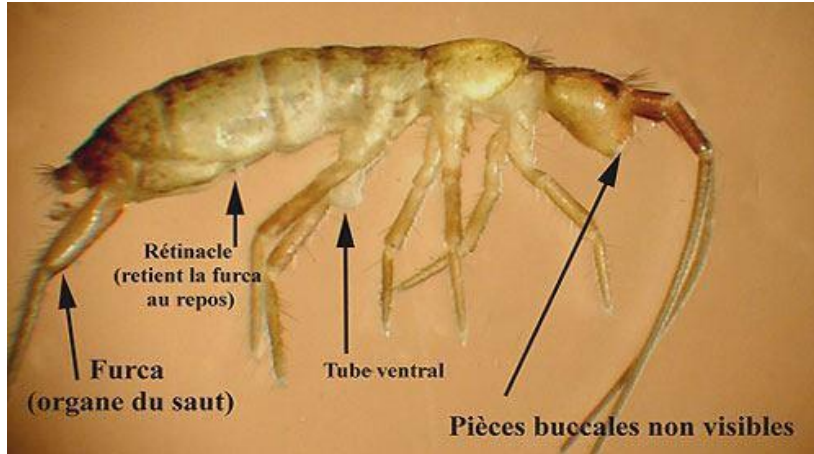


Les **pauropodes** ont un corps trapu, inférieur à 2 mm. Ils sont aveugles et possèdent des téguments mous. Leurs antennes ramifiées sont caractéristiques. Ils se nourrissent de mycélium de champignons et de débris végétaux.

Insectes

Sous-classe : aptérygotes (insectes non ailés) Ordre des

collemboles



Ils sont surtout représentés par les **collemboles** qui sont des agents de formation de l'humus très actifs. Ils comprennent de très nombreuses espèces. Ils possèdent une tête, un thorax, un abdomen qui compte six segments et est pourvu d'un organe fourchu pour le saut à l'extrémité postérieure : la furca.

Les **collemboles** du sol ont un régime alimentaire varié :

- Des feuilles en décomposition ;
- Du mycélium et des spores de champignons ;
- Des bactéries ;
- Des excréments d'autres arthropodes ;
- Des tissus végétaux vivants.

Les sols forestiers (à mull – voir plus loin) peuvent compter jusqu'à 200.000 collemboles par m². La majorité des collemboles se trouve dans la litière ou les couches superficielles du sol qui sont riches en matières organiques.

Les espèces de surface ont les caractéristiques suivantes :

- Grande taille (2 à 5 mm) ; (l'abdomen compte 6 segments)
- Furca bien développée ; (organe fourchu pour le saut à l'extrémité postérieure)
- Yeux présents ;
- Corps pigmenté et souvent couvert de poils.

Les espèces qui vivent plus profondément ont des caractéristiques inverses :

- Petite taille, de forme allongée ;
- Furca plus courte ou absente ;
- Formes aveugles en profondeur ;
- Pattes et antennes plus courtes ;
- Dépigmentées.

Ces caractéristiques sont en relation avec les conditions de vie. En profondeur, la température et l'hygrométrie sont plus constantes et la porosité du sol diminue.

Les collemboles ne subissent pas de métamorphose. L'insecte qui sort de l'œuf a une forme identique à celle de l'adulte. Le cycle est généralement court et certaines espèces peuvent se reproduire trois semaines après leur naissance.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Certaines familles de collemboles effectuent des parades sexuelles. Le mâle produit un spermatophore (organe de certains animaux invertébrés qui contient les spermatozoïdes et qui se détache pour être remis à la femelle) que la femelle introduit dans ses voies génitales. Certaines espèces enrobent leurs œufs de substances diverses pour les protéger de la sécheresse ou des prédateurs.



Les feuilles « en dentelle » sont principalement la conséquence de l'action des collemboles. Ces derniers prélèvent la partie la plus tendre de la feuille pour se nourrir. Il ne reste que les vaisseaux qui constituent la charpente.



Les **lépismes** ou « poissons d'argent » ont l'abdomen constitué d'au minimum neuf segments recouverts d'écailles brillantes, terminé par trois appendices articulés (cerques). Sa taille varie jusqu'à 20 mm. Ils possèdent de longues antennes filiformes. Ils sont fréquents à la surface du sol et sous les pierres. Ils sautent en contractant brusquement le thorax et l'abdomen. Ils se nourrissent de débris organiques, de pollen, de spores de champignons, de coton et de farine. Ils ne sont pas rares dans les maisons. La mère pond

les œufs et les petits qui en sortent ressemblent tout à fait à leurs parents. La seule différence est qu'ils sont plus petits qu'eux. Au cours de sa vie, le lépisme va muer jusqu'à 50 fois (un record) et il ne portera jamais d'ailes.

Ordre des Protoures



Les **protoures** sont des insectes minuscules (moins de deux mm), sans pigments, aptères et aveugles. Ils ne possèdent ni yeux ni antennes. La première paire de pattes est dirigée vers l'avant. Ils sont communs dans les endroits

humides, parmi les débris végétaux. Ils se nourrissent de champignons.

Ordre des diploures



Les **diploures** sont également sans pigments et aveugles. Leur taille ne dépasse pas quelques mm. Ils sont aptères. Ils possèdent de longues antennes. L'abdomen, constitué d'onze segments, présente deux filaments articulés (cerques). Ils recherchent les endroits humides, dans le sol, sous les pierres, dans la mousse ou l'humus. Ils se nourrissent de débris mais certaines espèces, carnivores, se nourrissent de collembolles et d'acariens.

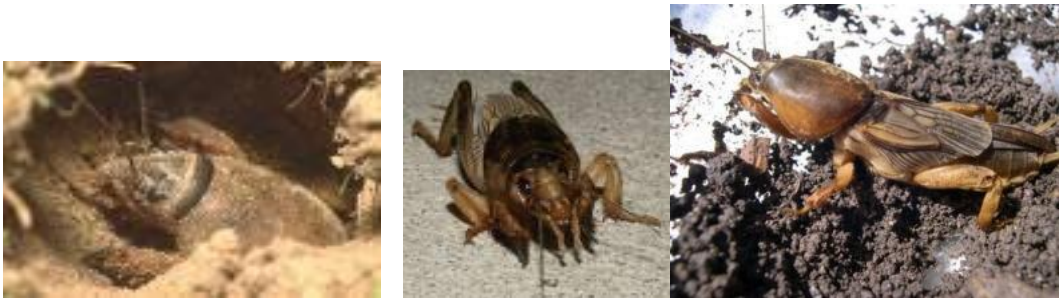
Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Sous – classe : ptérygotes (insectes ailés)

Ordre des orthoptères

Ils possèdent deux paires d'ailes dont les antérieures sont plus épaisses. Le vol est peu important. Ils possèdent une tête volumineuse qui comporte de grands yeux et des antennes de longueur variable. Les cerques sont aussi de longueur variable. Les pattes postérieures sont développées et adaptées au saut. La stridulation est produite par le frottement de l'archet qui est pourvu d'une série de dents et est situé sur l'aile ou sur la patte sur l'arête qui est toujours située sous l'aile.

Famille des Gryllotalpidae : la courtilière ou taupe-grillon



La **courtilière** ou **taupe-grillon** se reconnaît aisément à son corps robuste pouvant atteindre 35 mm, aux pattes antérieures fousseuses très développées et fortement dentées et à ses longs cerques.

En effet, ces insectes dont la vie est essentiellement souterraine creusent des galeries dans le sol d'où leur nom de taupes-grillons. La femelle pond 200 à 300 œufs dans un nid souterrain. Elle veille sur sa ponte et soigne les jeunes qui éclosent après deux ou trois semaines. Après un mois, les jeunes insectes quittent le nid et se nourrissent de racines et de larves d'insectes. Les stades larvaires peuvent être nombreux, jusqu'à 10 et s'étaler sur deux ans. Les mâles, seuls, strident en mai-juin, à l'entrée de leur terrier, en se frottant les ailes l'une contre l'autre.

En Wallonie, l'espèce est rare et localisée en Gaume. Elle préfère les substrats meubles, humides et humifères (jardins potagers). Elle se nourrit de végétaux, de lombrics et de larves diverses.

Famille des Gryllidae : le grillon



Il possède des **antennes plus longues que le corps** et porte de longs cerques. Il est omnivore. La **stridulation est réservée aux mâles** par frottement des ailes.



Les **grillons** creusent des galeries dans le sol et enfouissent des débris organiques. Il est très rapide. Il est actif surtout la nuit et il vit dans un terrier où il se réfugie bien vite au moindre danger.

Famille des Tettigonidae : la sauterelle



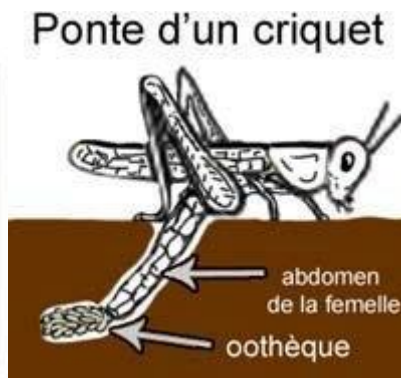
Elle possède les **antennes plus longues que le corps**. Elle est omnivore. La **stridulation est réservée aux mâles** par frottement des ailes. Les organes auditifs sont situés sur les pattes antérieures. Seule l'aile gauche est pourvue d'un archet.

Famille des Acrididae : le criquet



Il possède les **antennes plus courtes que le corps**. La **stridulation est assurée aussi bien par les mâles que les femelles** par frottement de la patte sur l'aile. Les organes auditifs sont situés à la base de l'abdomen. Il est phytophage.

La reproduction



Si chez les criquets et les grillons la reproduction est assez classique avec un accouplement suivi de la ponte d'œufs dans le sol, les **sauterelles rajoutent une étape supplémentaire**.



Lors de l'accouplement, qui est très court, le mâle sauterelle colle, au bout de l'abdomen de la femelle, une masse gélatineuse blanche : le **spermatophore**. Le mâle parti, la femelle doit mâcher le spermatophore pour en libérer les spermatozoïdes et ainsi être fécondée. Cette opération lui demande souvent plusieurs heures.



Quelques jours après la fécondation, sauterelles, criquets et grillons vont pondre des œufs dans le sol. Là encore, il existe des différences entre ensifères (sauterelles et grillons) et **criquets**. Chez ces derniers, les **œufs sont pondus en enfonçant l'abdomen dans la terre** et ces œufs sont englobés dans une **oothèque** (enveloppe résistante protégeant les œufs).

Chez les **sauterelles et les grillons**, les œufs sont pondus **un par un à différents endroits** et ils sortent par l'**oviscapte** (la femelle possède sous l'abdomen un organe en forme de sabre, la tarière

ou **oviscapte**, qui lui sert à fouir le sol pour y déposer ses œufs).

Le chant

Dans ce domaine, encore une fois, les variations sont grandes. Pour la plupart des sauterelles et grillons, seuls les mâles chantent. Chez les criquets, la femelle émet aussi des sons. Chez les sauterelles et les grillons, le chant est produit par frottement des ailes entre elles alors que les criquets frottent leurs pattes contre les ailes.

Le cycle de vie

La plupart des orthoptères font leur cycle de vie en un an et les adultes finissent leur vie à l'automne après avoir assuré la reproduction et pondu les œufs dans le sol. Ces œufs restent enfouis tout l'hiver et éclosent au printemps. La nouvelle génération démarre un nouveau cycle.

Ordre des dermoptères



Le perce-oreille ou **forficule** adulte mesure de 1 à 2 centimètres de long. Leur corps est couvert d'une carapace ou cuticule, brun-roux brillant. L'abdomen est souvent plus foncé que la tête et le thorax. De forme très allongée, il possède deux longues antennes, une paire de pièces buccales de type « broyeur ». Il est muni d'ailes antérieures très courtes et d'ailes postérieures repliées sous les antérieures qu'il n'utilise pratiquement pas sauf pour planer.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Le perce-oreille doit son nom à son abdomen qui se termine par deux **cerques modifiés en de puissantes pinces**, plus foncés sur leurs extrémités. Ces cerques sont presque **droits** chez les **femelles** alors qu'ils sont nettement **incurvés** chez les **mâles**. Ce sont des armes défensives mais guère efficaces face à leurs gros prédateurs (oiseaux, lézards, mammifères insectivores dont musaraigne...). Les jeunes ressemblent aux adultes mais ils sont plus clairs et aptères (sans ailes).

Le jour, le perce-oreille, **lucifuge** (fuyant la lumière), passe la plupart de son temps dans les crevasses du sol, sous les écorces du bois mort, dans le creux des fleurs ou entre les pétales de grosses fleurs (roses par exemple). C'est un animal **nocturne** : la nuit, il sort et part à la recherche de nourriture (pucerons, psylles...).

Après l'accouplement qui s'effectue en été, la femelle creuse une petite loge (terrier), s'y isole et pond au maximum une soixantaine d'œufs blancs translucides et arrondis. Vers la mi-mai les larves éclosent. La femelle, qui possède un **instinct maternel développé**, s'occupe de ses œufs et de ses larves avec un soin attentif jusqu'à la dernière des quatre mues que subissent les larves qui ressemblent aux adultes mais en plus petit et sans ailes. Les jeunes adultes émergent généralement en juillet. Ils demeurent actifs jusqu'aux premiers gels. Aux premiers froids et gelées d'automne (vers octobre), le forficule s'enfouit dans le sol pour hiberner. La plupart des mâles décèderont en hiver alors que les femelles de l'année survivront. Le perce-oreille est généralement considéré comme un auxiliaire du jardinier parce qu'il est un grand consommateur d'insectes considérés comme « nuisibles » ou « ravageurs ». Il consomme aussi des végétaux très mûrs ou en début de décomposition (pétales de fleurs, fruits - pêches, prunes ou abricots en particulier -, légumes, racines de plantes coupées).

Ordre des hémiptères

Les **hémiptères** possèdent **deux paires d'ailes**. Les antennes sont parfois très longues mais ne comportent que 4 ou 5 articles. Les **pièces buccales piqueuses-suceuses** aspirent la sève des plantes ou le sang des animaux. Les maxilles et les mandibules sont engagées dans le labium et forment un rostre qui se place à l'horizontale sous le corps au repos.

Les hémiptères comprennent deux sous-ordres :

- Les **hétéroptères** dont les couleurs dominantes sont le brun et le vert et dont les ailes antérieures (les **hémélytres**) sont partiellement coriaces. Les **ailes**, dont la nervation est réduite, sont repliées à **plat** au repos. Afin de se protéger, ils possèdent des **glandes odorifiques** spéciales près des pattes postérieures qui libèrent des sécrétions nauséabondes.



Les **punaises** possèdent un appareil buccal piqueur- suceur, des ailes postérieures membraneuses et des antennes longues. Elles se nourrissent surtout de sève végétale.

Les gendarmes apparaissent en grand nombre au printemps au pied des arbres à feuilles caduques. Les imago passent l'hiver dans le sol. Chez cette espèce, les ailes sont souvent atrophiées ou absentes (d'où son nom scientifique : *Pyrrhocoris apterus*).

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

- Les **homoptères** (littéralement aux ailes semblables) possèdent deux paires d'ailes dont les antérieures sont toujours de texture uniforme et disposées en toit, sur le dos, au repos. Ils possèdent un prothorax plus petit que celui des hétéroptères. Ils regroupent les cigales, les pucerons, les psylles et les cochenilles. Les pucerons consomment de grandes quantités de sève végétale formée d'eau et de sucre et secrètent le **miellat** qui est une production d'une sécrétion sucrée formée en grande partie d'un excès de sucres provenant de la sève et expulsée par l'anus. Ils sont donc pourvus d'un appareil buccal piqueur-suceur de liquide.



Cycle de vie très compliqué : la plupart des espèces de **pucerons** alternent des générations **ailées et aptères**. L'abdomen se termine par la **cauda**, sorte de queue, qui dirige l'écoulement du miellat sortant de l'anus. Plusieurs espèces se reproduisent par **parthénogenèse**, d'autres par **oviparité** et d'autres encore par **viviparité**. Les pucerons sont des insectes à métamorphose incomplète, les jeunes étant semblables à l'adulte.

Les coccinelles sont d'importants prédateurs de pucerons et de cochenilles.

Les « **crachats de coucou** » ou amas mousseux sont composés d'air mélangé à un liquide que la larve sécrète par l'anus et qui la protège de la dessiccation et des prédateurs. Ces crachats de coucou (qui abritent les larves), rencontrés sur certaines tiges ou feuilles, sont dus au **cercopie**.



Les **psylles**, du grec « spulla » qui signifie « puce » regroupent des espèces ayant leur hôte privilégié (aulne, bouleau, arbres fruitiers...). Ils ressemblent à de minuscules cigales aux antennes longues et à tête large. Ils se déplacent par sauts et vols brefs. Les psylles produisent un abondant miellat.

Le psylle de l'aulne

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Famille des Coccoidés



Les cochenilles femelles sont aptères, apodes et possèdent des antennes réduites. Elles ont également un bouclier dur ou ciré. Les cochenilles sont immobiles et se fixent sur les végétaux dont elles tirent la sève. Elles s'entourent généralement d'une sorte de feutre. Elles parasitent donc les végétaux. Il existe un dimorphisme sexuel important : les mâles possèdent une unique paire d'ailes alors que les femelles sont aptères (sans aile). Les mâles sont rares et ressemblent à de petits moucheron. La reproduction s'accomplit par **parthénogenèse et viviparité**.

Ordre des Isoptères



Les **termites** (nom masculin) possèdent un corps mou, sont aptères ou possèdent deux paires d'ailes semblables. Ils vivent en colonies qui comprennent différentes castes qui regroupent mâles et femelles : les ouvriers qui apportent les soins aux œufs et à la colonie et qui digèrent le bois ; les soldats qui garantissent la défense et le roi et la reine qui assurent la reproduction. Quelques espèces se nourrissent de plantes et de champignons. Cependant, la plupart des espèces s'alimentent via la digestion de la cellulose du bois grâce aux protozoaires logés dans leur estomac. Les yeux ne sont développés que chez la caste reproductrice, les autres sont aveugles. Ils craignent la lumière. Ils jouent un rôle fondamental dans le cycle du carbone et de l'azote en **régions chaudes**. Ils sont de gros

consommateurs de débris ligneux. De plus, ils édifient des termitières qui remanient le sol et leurs activités en modifient la composition chimique. Ils sont surtout répandus en zones tropicales.



En **Belgique**, la présence des termites n'est pas effective.

Les termites se manifestent surtout par leurs constructions verticales ou termitières, qui constituent la partie aérienne de la colonie, et sont constituées de résidus d'alimentation maintenus par des parois de terre renforcées par de la salive.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Ordre des Hyménoptères

Les **hyménoptères** (du grec « hymen » signifiant « mariage ») sont des insectes aux deux paires d'ailes membraneuses, à nervation réduite, couplées par une rangée de crochets sur le bord de l'aile postérieure. Les ailes antérieures sont plus grandes. La tête, mobile, est séparée du thorax par un cou très mince. Les antennes sont de longueur variable. Cependant, elles sont plus longues chez le mâle. Les pièces buccales sont du type broyeur ou suceur-broyeur. Les hyménoptères possèdent un **ovipositeur** bien développé. La parthénogenèse est assez répandue. Ils sont divisés en deux sous-ordres :

- des **Symphytes** qui ne possèdent pas de taille de guêpe mais disposent d'un ovipositeur qui ressemble à une petite scie qu'ils utilisent pour pondre. Les **larves** ressemblent à des chenilles cependant, elles sont **munies d'au moins six paires de fausses pattes** (sirex) ;

- des **Apocrites** qui possèdent une taille de guêpe dont le premier segment abdominal est fusionné avec le reste du thorax. Ils possèdent un ovipositeur important qui peut être modifié en un aiguillon chez la femelle (stylet et deux lancettes dentées qui entourent le canal à venin). Les **larves** sont **apodes**. Les Apocrites sociaux (fourmis, abeilles, guêpes) vivent en colonies dirigées par la ou les reines, dont l'unique fonction est la reproduction. Les ouvrières, femelles stériles, s'occupent de la nourriture, de l'élevage des jeunes, de la construction et de l'entretien du nid. Les **mâles** sont **rare**s. Leur **fonction** est de **féconder** les nouvelles reines. Ils sont produits par **parthénogenèse**. Ils naissent d'œufs non fécondés.

Fourmis



Les **fourmis**, insectes sociaux, ont une action considérable sur le transport et l'accumulation de la matière organique et l'ameublissement du sol.

Les fourmis les plus primitives sont nomades, chasseresses et carnivores ; d'autres, un peu plus évoluées et qui représentent la plupart de nos espèces, sont sédentaires et pratiquent l'élevage des pucerons et récoltent le miellat.

Enfin, les plus évoluées sont sédentaires, cultivent des spores de

champignons et sont mycophages. Le **venin, formé d'acide formique**, est leur moyen de défense.

Que sont les fourmis ailées ?

Les femelles et les mâles de la plupart des espèces de fourmis possèdent des ailes qui leur permettent de voler lors de l'essaimage. Celui-ci permet aux fourmis mâles et aux fourmis femelles de se rencontrer. Les femelles ailées seront les futures « reines » qui assureront la descendance. Il peut y avoir plusieurs reines par colonie.

Les conditions d'essaimage correspondent généralement à un temps chaud et humide.

Après fécondation, les mâles ailés meurent rapidement. Quant aux femelles, une fois fécondées, elles se posent au sol, arrachent leurs ailes et cherchent un endroit où déposer leurs œufs. Ces derniers donneront naissance à des larves qui se transformeront ensuite en nymphes puis en fourmis.

Les principaux prédateurs des reines de fourmis sont les fourmis elles-mêmes, de la caste des « ouvrières ».



Les espèces *Formica rufa* (fourmi rousse des bois) et *Formica polyctena* (fourmi rousse polygone) sont intégralement protégées.

Ces deux espèces figurent dans l'annexe II b qui reprend les espèces de mammifères, amphibiens, reptiles, poissons et invertébrés menacés en Wallonie qui font l'objet d'une protection stricte.

Chaque fourmilière est différenciée en colonies possédant trois **castes** :

- Les **ouvrières**, stériles, vivent de un à deux ans. Elles construisent la fourmilière et entretiennent la colonie. De plus, elles assurent l'approvisionnement en nourriture. Elles possèdent une sorte de second estomac qui peut contenir une réserve de nourriture et qui peut servir à alimenter une autre ouvrière qui ne trouverait pas le temps nécessaire à ses besoins nutritifs. Les phéromones jouent un grand rôle dans la recherche de la nourriture. Les ouvrières s'occupent également des œufs pondus par la reine en attendant leur éclosion et apportent les soins aux jeunes fourmis venant d'éclore (nourrice). D'autres ouvrières, de plus grande taille, appelées « soldats » assurent la protection de la fourmilière contre les attaques extérieures ;

- La **reine**, femelle ailée fécondée et qui a perdu ses ailes, unique, est la plus grosse des fourmis ; elle stocke les spermatozoïdes dans une spermathèque et assure la ponte. Elle pond en fonction des besoins de la cité, parfois pendant 10 à 15 ans ;

- Les **mâles**, quasiment toujours ailés, ont un rôle unique : ils fécondent les femelles qui deviendront reines à leur tour, en fondant une nouvelle colonie ou en succédant à la reine mère. Ils sont issus **d'œufs non fécondés** pondus soit par la reine, soit par des ouvrières. Ces dernières sont censées être stériles. Cependant elles pondent malgré tout des œufs par parthénogenèse (œufs haploïdes, à n chromosomes). Comme stipulé ci-dessus, une fois l'accouplement réalisé, les mâles meurent. Ils ont une vie éphémère (seulement quelques semaines en été).

Les fourmis se défendent, notamment en produisant de **l'acide formique** qui peut faire fondre la chitine des insectes. Les fourmilières dégagent d'ailleurs fréquemment cette odeur d'acide formique.

La **trophallaxie** est l'échange de nourriture entre les ouvrières.

Les fourmis possèdent un très bon odorat. Elles possèdent également des organes tactiles développés dont des antennes et des palpes.

Famille des Apidés

Bourdons



Les **bourdons** sont des hyménoptères de la famille des *Apidae*, au corps lourd et velu. Il ne faut pas les confondre avec les faux-bourdons ou mâles de l'abeille. Ils vivent en colonies annuelles. Ils ont la particularité de construire leur nid dans un trou du sol, souvent dans un vieux nid de campagnol ou de mulot, à une profondeur ne dépassant pas 75 cm. Ce nid est formé avec de l'herbe ou de la mousse et contient des cellules de cire. D'autres espèces forment leur nid à la surface du sol, sous la mousse ou les broussailles.



Comme chez les abeilles, il y a des individus sexués (femelle fondatrice et mâles) et des individus stériles (ouvrières). Cependant, à la différence des abeilles, la reine fondatrice commence l'édification du nid et son approvisionnement. La reine donne ensuite naissance à des ouvrières puis, à la fin de l'été, à des mâles et des femelles fécondes qui quittent la colonie. Ces reines fécondées à l'automne hivernent dans des endroits bien exposés, propices au réchauffement printanier, pour former de nouvelles colonies au printemps. Les ouvrières nourrissent les larves avec le nectar ou le pollen. Les mâles sortent du nid plus tôt que les femelles et ne reviennent plus au nid. La reine vit environ un an alors que les ouvrières ne vivent généralement que deux mois.

Les bourdons ont généralement une activité de butinage plus précoce que celle des abeilles au printemps et possèdent un organe de succion plus long, muni à son extrémité d'un pinceau de poils, ce qui leur permet d'atteindre des glandes nectarifères plus profondes. Les ouvrières récoltent le pollen qu'elles placent sur de petites brosses de soies rigides situées à l'extrémité de leurs pattes postérieures (corbeilles).

Tout comme les abeilles, les bourdons sont de grands agents de pollinisation.



Les **abeilles solitaires, fouisseuses**, creusent souvent des terriers dans les terres sableuses et légères. Les andrènes sont parmi les plus connues. On peut également les trouver dans des anfractuosités de vieux murs. Elles sont généralement très sélectives vis-à-vis d'un type particulier de pollen. Ces abeilles sont souvent brunes à noires, avec des bandes colorées sur l'abdomen, blanchâtre à roussâtre. Après l'accouplement, les femelles cherchent des sites de nidification ou terriers où elles construisent une petite cellule contenant du pollen et du nectar.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

(des petits monticules sableux entre les pavés ou sur un chemin sableux). Ces insectes ne forment pas de véritables colonies (d'où l'adjectif de solitaire) mais des juxtapositions de terriers individuels, suscitées par la production de phéromones.

Famille des Vespidés



Les **guêpes sociales**, de la famille des *Vespidae*, possèdent des yeux presque en forme de croissant. Elles construisent fréquemment leur nid dans le sol. Les adultes se nourrissent de substances sucrées. Les ailes sont repliées dans le sens de la longueur au repos. Les reines hivernent dans des refuges situés dans des bâtiments, sous les écorces décollées ou les vieux nids. Elles émergent au printemps et se nourrissent de nectar et de sève.

Les **nids** sont constitués d'une sorte de papier mâché, obtenu en mastiquant du **bois et des débris végétaux avec de la salive**. Le nid est suspendu, avec une série de loges hexagonales tournées vers le bas. Ces dernières sont alors cimentées et les larves qui éclosent n'en sortent pas. Elles s'entourent d'un cocon de soie avant de se transformer en nymphes.

Quatre à six semaines après la ponte des **œufs**, la première génération d'ouvrières apparaît. Ce sont des guêpes femelles plus petites que les reines. Les mâles apparaissent plus tard dans la saison. Les ouvrières élargissent ensuite le nid en construisant des

« niveaux » en dessous du niveau initial. Elles apportent également la nourriture, constituée de larves d'insectes, de mouches, de chenilles et d'araignées, aux **larves carnivores** (au contraire des larves d'abeilles). Les larves exsudent une sécrétion sucrée dont se servent les ouvrières pour compléter leur alimentation et les aider à décomposer les aliments destinés aux larves (relation de trophallaxie). Pendant que les ouvrières développent le nid, la reine pond. A l'automne, de nouvelles reines et des mâles sont produits. Ceux-ci fertilisent les femelles qui



Les **guêpes solitaires** relèvent de plusieurs familles dont notamment celles des *Sphecidae* et des *Eumenidae*. Elles portent les ailes à plat au repos. Elles sont, pour la plupart, **héliophiles** (favorisées par l'éclairage) et **thermophiles** (aiment la chaleur), bien représentées dans les milieux sableux. Elles comptent une ou deux générations par an, généralement de mai à septembre. Elles sont fouisseuses.

On distingue des espèces « à nid libres », des espèces terricoles (qui adoptent ou creusent leur nid dans le sol) et des espèces qui construisent leur nid dans du bois mort (cavité préexistante ou creuse), des tiges ou des rameaux.

La terre et les débris végétaux interviennent souvent dans la construction des nids ; ces matériaux peuvent être cimentés pour former des cloisons. Les proies sont amenées dans ces nids. Les différentes espèces sont plutôt sélectives quant à leur type de proie (pucerons, mouches, chenilles, coléoptères...). La femelle paralyse les proies à l'aide de son

aiguillon. Les guêpes solitaires jouent un rôle important de prédation parmi les arthropodes.



Nid de guêpe solitaire et proies (araignées)

D'autres guêpes solitaires ne construisent pas de nid et ne capturent pas de proies, ce sont les guêpes parasites. Elles parasitent notamment d'autres aculéates (ou porte-aiguillon).

Elles se nourrissent de leurs larves ou de la nourriture stockée pour ces dernières.

Ordre des Coléoptères

Les **coléoptères** (du grec « Koleos » qui signifie « étui ») possèdent deux paires d'ailes dont les antérieures sont dures et se rejoignent au milieu du dos suivant une ligne médiane bien droite, ce sont les **élytres**. Elles ne possèdent pas de rôle actif lors du vol. Les ailes postérieures sont membraneuses à nervation réduite, repliées sous les élytres au repos, parfois elles sont absentes et les élytres sont alors soudés.

Ils sont munis des pièces buccales broyeuses. Ils sont phytophages, scatophages, nécrophages, prédateurs et parasites. Les antennes comportent souvent 11 articles. Les larves possèdent des pattes thoraciques.

On distingue **quatre sortes de larves** :

- La campodéiforme, allongée et aplatie dont les pattes et les antennes sont bien développées comme le Ténébrion ;
- La scarabéiforme, dont le corps est mou et épais recourbé en forme de C, possédant des pattes bien développées sans fausses pattes comme le Hanneton ;
- L'éruciforme, en forme de chenille à corps cylindrique, dont les pattes sont bien développées et qui possède des fausses pattes abdominales comme le Chrysomèle ;
- L'apode, au corps cylindrique sans pattes, comme le charançon.

Les coléoptères subissent une **métamorphose complète** (larve et nymphe). Ils vivent moins longtemps à l'état parfait qu'à l'état de larves et meurent généralement après l'accouplement. Les larves sont fort différentes de l'insecte parfait.



Famille des Elatéridés

Les taupins sont des coléoptères allongés à antennes filiformes ou dentées en scie. Ils sont phytophages. Leurs élytres sont coriaces. Leurs pattes courtes et grêles sont ramenées sous le corps en position de repos. En cas de danger, ils tombent sur le dos et peuvent se redresser brusquement (saut de carpe) en retombant sur leurs pattes grâce à une brusque contraction du thorax sur l'abdomen. Ceci est possible grâce à une articulation très mobile entre les première et deuxième thoraciques et une sorte de ressort sur la face ventrale. Leurs larves peuvent commettre des dégâts importants aux racines de végétaux. Les larves, essentiellement phytophages, de formes très allongées et vermiformes, vivent dans le sol. Elles affectionnent notamment les champs de pommes de terre. D'autres espèces développent leurs larves dans les souches et le bois en décomposition. L'évolution des larves est lente (plus de 4 ans).

On trouve bon nombre d'espèces phytophages et xylophages (se nourrissant de bois).

Famille des Staphylinidés

Staphylins



<http://www.ecosociosystemes.fr/carabiques.html> Les staphylins possèdent des ailes membraneuses. Les élytres réduits ne recouvrent pas tout l'abdomen, il reste six segments visibles. Ils mesurent de 2 mm à 3 cm. Ils sont nécrophages ou phytophages.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Famille des Scarabaeidés (Hanneton, Bousier, Cétoine, Scarabée, Cerf-volant)

Ils possèdent le premier article des antennes allongé, les « 3 à 7 » forment un coude et les trois derniers sont étalés en forme de massue. Ils sont phytophages ou coprophages.



Le hanneton (*Melolontha melolontha*) est un coléoptère nocturne. L'adulte se nourrit de feuilles et la larve de racines.

Il mesure de 25 à 30 mm de long. Ses élytres sont brun rougeâtre. Le mâle peut-être distingué de la femelle grâce aux « feuilles » sur les antennes : il en a 7 alors que la femelle en a 6.



La larve de hanneton commun est blanchâtre complètement arquée, de consistance molle, avec une tache noire à l'extrémité de l'abdomen.

Le cycle du hanneton se déroule sur trois années. La première année, la femelle pond ses œufs dans le sol à quelques centimètres de profondeur. Les larves éclosent quatre à cinq semaines plus tard et rongent les racines, mais les dégâts sont peu importants. À la fin de l'été, elles s'enfoncent dans le sol à 50 cm de profondeur pour hiberner. À la fin du printemps, les larves remontent près de la surface et commettent des dégâts importants en dévorant les racines de toutes les plantes. À l'automne, les larves s'enfoncent à

environ 70 cm de profondeur, pour hiberner à nouveau. Elles remontent à nouveau au printemps, puis vers le mois de juillet, elles redescendent à 1 m de profondeur environ, et là se produit la nymphose. Un à deux mois plus tard, l'imago se libère mais reste en terre. Au printemps suivant, l'imago remonte à la surface et un nouveau cycle recommence.

De nombreux animaux se nourrissent de leurs larves : taupes, hérissons, grenouilles.

Le hanneton a payé un lourd tribut aux insecticides et à la modification de l'habitat (haies). En Wallonie, l'espèce n'est bien représentée que dans les régions bocagères.



A noter qu'il existe, à la côte, une autre espèce de hanneton, plus grande encore, le hanneton foulon dont les larves vivent trois à quatre ans dans le sable des dunes, se nourrissant principalement d'oyats.



Bousiers au travail

Famille des Carabidés

Carabe



Il mesure de quelques mm à 8 cm. Il est nocturne, carnassier, de couleur noire, aux élytres striés. Les antennes sont insérées sous le bord du front à la base des mandibules. Ils vivent dans la litière, sous les pierres, sous les mousses et les écorces des arbres morts et se nourrissent principalement de chenilles, de vers et de larves.

Deux espèces sont protégées : Calosome sycophante et Carabe cancellé.

ulionidés

Charançon



Il possède un corps globuleux et une tête prolongée par un **rostre**. Les antennes peuvent s'insérer tant à la base qu'au milieu ou au bout du rostre, le premier segment est allongé et les autres forment un coude et se terminent par une massue de trois articles. Il est phytophage.

Famille des Coccinellidés

Coccinelle



Elle possède un corps court, globuleux, trapu. Les antennes sont insérées sous le rebord de la tête et sont repliées au repos. Elle est de couleurs **aposématisques** c'est-à-dire qui lui assurent une protection maximale contre les prédateurs. Elle saigne par réflexe. Elle est une grande prédatrice de pucerons.

Au printemps, le mâle et la femelle s'accouplent.

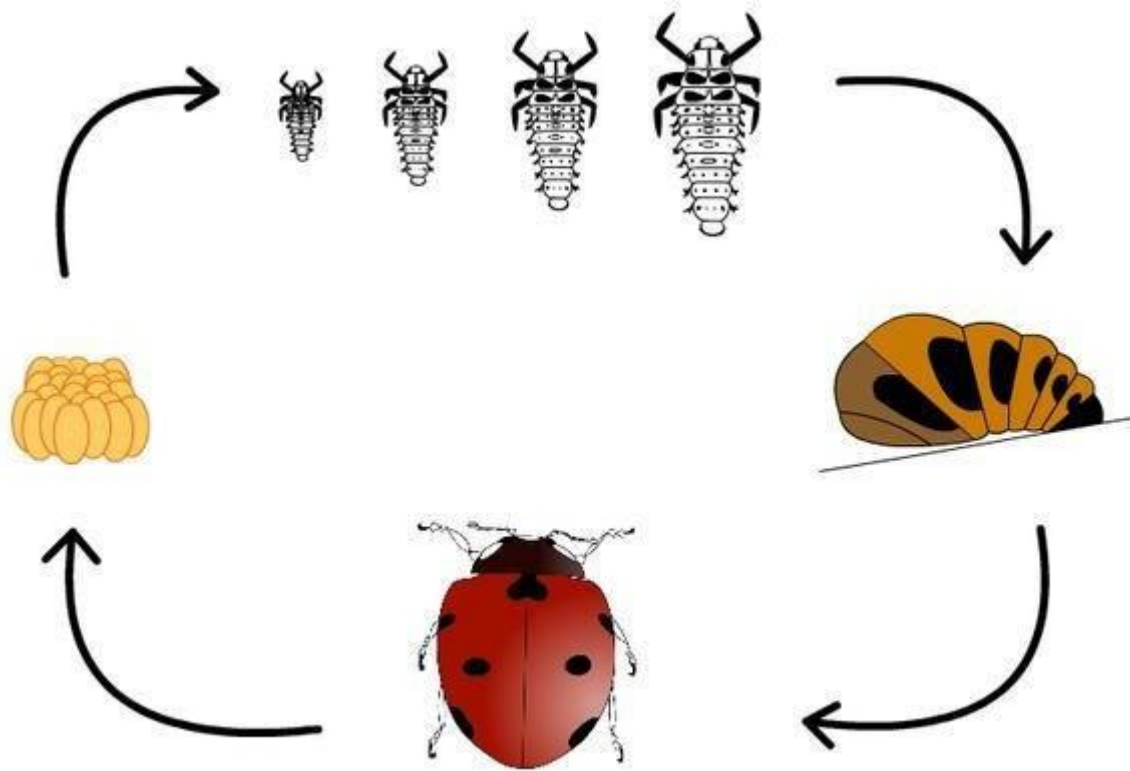
Au moment de **la ponte**, la femelle choisit une **feuille envahie de pucerons**. Elle s'y installe et commence à pondre ses œufs, au nombre de cinquante à quatre cents. Les œufs sont de très petite taille et de couleur jaune.

Au bout de sept jours, les **œufs** éclosent et des larves en sortent.

Les **larves**, fuselées, de couleur bleu gris, métallique, ont un appétit extraordinaire, et peuvent dévorer jusqu'à neuf mille pucerons durant les trois semaines de leur développement.

Vient alors la phase de la **nymphose** : les larves fixent, avec quelques fils de soie, leur queue au verso d'une feuille et restent ainsi recroquevillées et immobiles pendant huit jours pour se transformer en coccinelle adulte.

Puis, la cuticule se fend, et l'**adulte**, de couleur jaune pâle, émerge. En quarante-huit heures, la coccinelle devient rouge, avec plusieurs points noirs ou jaunes.



Cycle de reproduction de la coccinelle



Œufs



Larve se nourrissant

Images : <http://plantunivers.blogspot.com>



La coccinelle **asiatique** (*Harmonia axyridis*) est une espèce de coccinelle **aphidiphage** (qui se nourrit de pucerons), originaire de Chine. Dès le début du siècle, mais surtout plus massivement, vers la fin des années 1980 elle a été importée en Europe et aux États-Unis pour la lutte biologique. Son comportement, sa prolificité et sa voracité en ont fait perdre le contrôle et elle est désormais considérée comme **nuisible** pour de nombreuses espèces de coccinelles autochtones qu'elle tend à éliminer tellement elle est agressive. Le mâle est plus petit que la femelle. Elle se nourrit de pucerons, de psylles et de cochenilles avec une voracité plus importante que les espèces autochtone.

Ordre des Lépidoptères

L'ordre des lépidoptères ou papillons est scindé en deux sous-ordres :

- Les **rhopalocères** (à antenne en forme de massue) dont la plupart volent de jour.
- Les **hétérocères** (à antennes de formes diverses mais jamais en massue) dont la plupart volent de nuit.

Les ailes.

Ils possèdent deux paires d'ailes membraneuses qui sont recouvertes d'écailles creuses (poils modifiés) et qui renferment les pigments responsables de la coloration. Ces écailles sont disposées comme les tuiles d'un toit.

Certaines écailles sont reliées à des glandes qui sécrètent des substances odorantes : ces écailles odoriférantes sont dénommées **androconies**.

Les ailes sont toujours couplées : chez les diurnes en simple superposition et chez les nocturnes, elles sont couplées par une soie dure appelée frein. Les ailes antérieures sont plus grandes que les postérieures.

La tête.

La tête est grande et comporte deux gros yeux composés de 17.000 **ommatidies**. Chacune forme sa propre image et l'envoie au cerveau. La sensibilité au mouvement est donc très élevée.

Les pièces buccales sont transformées en une longue trompe adaptée à la succion. Cette trompe est enroulée sous la tête au repos.

Le corps.

Les femelles disposent d'organes chimiorécepteurs sur les tarsi; les mâles sur les antennes. Chez les diurnes, les organes auditifs sont situés à la base de l'abdomen et chez les nocturnes, sur le métathorax.

Le développement.

Il se scinde en quatre stades : œuf, chenille, chrysalide, et **imago** (adulte).

La larve est **éruciforme** (en forme de chenille). Elle possède trois paires de vraies pattes (à l'avant) et cinq paires de fausses pattes dont la dernière est le **refouloir** (progression en accordéon). La larve est équipée de pièces buccales broyeuses et est phytophage.

En outre, elle est munie de deux glandes séricigènes qui produisent de la soie (glandes salivaires modifiées) au niveau de la bouche.

Beaucoup de papillons **nocturnes** se nymphosent dans le **sol** dans un **cocon rudimentaire**. La chrysalide de diurne est suspendue la tête en bas par le **crémaster** (couronne de petits crochets située à l'extrémité de l'abdomen) ou suspendue la tête en haut attachée par le crémaster et une ceinture de soie.

La liaison entre les papillons et le sol est complexe car le nombre d'espèces est très élevé.

A titre d'exemple, citons le **sphinx tête de mort** (*Acherontia atropos*), un des plus grands papillons d'Europe (envergure 13 cm), dont la chenille, friande de plantes de la famille des solanacées (pomme-de-terre) se transforme en chrysalide dans le sol après y avoir aménagé une loge ovoïde. Le papillon en sortira et séchera ses ailes à l'air. Notons, au passage, que ce papillon est très attiré par le miel et les ruches.



Ordre des Diptères

L'ordre des **diptères** (littéralement « deux ailes ») comprend essentiellement les **mouches**, les taons et les **moustiques**. Ils possèdent une seule paire d'ailes membraneuses. Le reliquat d'une paire postérieure est constitué d'haltères ou balanciers qui servent à stabiliser le vol. Les pièces buccales sont adaptées à la succion par la présence d'une « trompe ». Elles sont piqueuses chez les espèces hématophages (qui se nourrissent de sang).

Les diptères participent beaucoup à l'élimination des excréments (espèces **coprophages** très importantes au niveau écologique) et des cadavres (espèces **nécrophages**). Ils se nourrissent aussi de nectar et jouent un grand rôle dans la pollinisation. Les hématophages sont vecteurs de maladies comme la malaria,...

Ils possèdent une tête assez grande avec des yeux volumineux. Le thorax est formé en grande partie par le mésothorax. Les larves sont souvent apodes mais peuvent présenter des excroissances charnues : les fausses pattes. Nombre de leurs larves vivent dans le sol.

On distingue deux sous-ordres :

- Les **nématocères** (du grec « nematos » qui signifie « fil ») aux antennes en forme de fil (plus de trois articles) comme les moustiques ou les tipules ;
- Les **brachycères** (du grec « brachy » qui signifie « court ») aux antennes courtes (trois articles) et à la tête très mobile, comme les mouches.

Nématocères



Les femelles de moustiques possèdent de longues pièces buccales rigides, de type suceur-piqueur. En zones tropicales, les moustiques sont d'importants vecteurs de maladies pathogènes comme le paludisme (malaria), une des premières causes de mortalité humaine, ou la fièvre jaune.

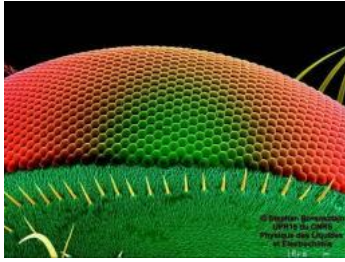
Les larves sont aquatiques. La présence de moustiques est donc favorisée par la présence d'eaux stagnantes.

Brachycères

La mouche aime la chaleur et s'abrite dès que la température commence à baisser. En dessous de 7°C, la mouche domestique entre dans un état de torpeur. A moins de 5°C, elle meurt. Elle est omnivore et détecte les aliments à l'aide d'organes gustatifs et olfactifs situés sur ses antennes et sous ses pattes.

La mouche a une préférence pour les aliments liquides car elle ne mastique pas. Elle aspire le liquide avec sa trompe rétractile (le **labium** transformé).

Si un aliment est trop compact, elle le dilue en vomissant sur lui des substances sécrétées par son intestin qui contiennent des enzymes. Elle suce ensuite le liquide pré-digéré. Elle transmet des microbes pathogènes car elle régurgite fréquemment une partie de son repas précédent. Une mouche peut être porteuse de plus de 2 millions de bactéries qu'elle transporte sur ses pattes ou dans ses excréments.



Sa vue est particulièrement développée. L'œil est composé de multiples facettes hexagonales séparées les unes des autres. Aucune ne converge vers le même point et chacune enregistre sa propre image. Pour simplifier, on peut dire qu'une mouche possède 3.000 yeux élémentaires, les **ommatidies**. Sa vue perçante et ses capteurs ultrasensibles sous la forme d'antennes et de cils vibratiles, lui permettent de réagir en moins de deux centièmes de seconde. Elle gère 200 images par seconde.

Une mouche peut rester la tête en bas sans tomber. Cet exploit est dû à de minuscules griffes qui agrippent toutes les aspérités. Sur une surface parfaitement lisse, les coussinets sécrètent un liquide collant qui leur permet d'adhérer. En vol, les ailes peuvent battre 200 fois par seconde. Elle vole en moyenne à 8 km/h. Les deux autres ailes atrophiées agissent comme un balancier et permettent à la mouche d'effectuer des manœuvres aériennes. La taille de la mouche domestique varie de 7 à 9 mm.



C'est surtout dans le fumier des animaux, mais aussi sur tout aliment en décomposition susceptible d'apporter chaleur et humidité que la mouche pond ses œufs. Le mâle coule dans son appareil reproducteur de la liqueur séminale. Des contractions ondulatoires expulsent les œufs que la femelle pond en grappes. La femelle vit en moyenne à peine plus de trois semaines mais pond 4 à 5 fois durant ce court laps de temps. La mouche domestique dépose à chaque fois 100 à 150 œufs. L'incubation est très rapide et surtout en période chaude où elle ne dure

que 8 heures. En période tempérée, les larves (ou asticots) sortent des œufs 24 heures plus tard. Ces larves atteignent leur forme adulte après avoir quitté une enveloppe appelée **puparium**. Ce cycle complet (œuf, larve, nymphe) se déroule normalement sur un mois mais peut être réduit en période de forte chaleur à une dizaine de jours.

Les mouches peuvent servir de moyen de transport aux pseudoscorpions.

Galles



Galle de feuilles



Galle en coupe - détail



Cynips Mâle



Cynips Femelle

Deux galles différentes pour une même espèce.

Au printemps, les branches des chênes exhibent des dizaines d'excroissances de couleur blanc-jaunâtre à rougeâtre, de la taille d'une bille, ressemblant à une pomme miniature. Ces excroissances sont composées d'une matière hétérogène, spongieuse en périphérie et ligneuse au centre : une galle du chêne. Elle est formée de logettes occupées chacune par une larve d'un joli blanc nacré. Cette fausse "pomme" est donc une galle, issue de la transformation d'un bourgeon après qu'un **cynips**, *Biorhiza pallida*, y ait introduit ses œufs.

De façon moins spectaculaire, le chêne porte sur ses racines d'autres excroissances ressemblant à des truffes. Ces faux champignons hébergent chacun une larve qui devra attendre seize mois sous terre avant de se transformer en une petite guêpe aptère, à l'allure de fourmi.

Des observations approfondies ont démontré que les galles-pommes et les galles-truffes abritent une seule et même espèce. En effet, cet insecte présente un cycle de vie de deux ans avec une alternance de deux générations très différentes.

La première se déroule en hauteur, dans les bourgeons terminaux, durant le printemps et l'été ; les adultes sortant des galles-pommes sont ailés et sexués et les femelles fécondées vont s'enterrer au pied de l'arbre pour pondre dans les racines.

La génération suivante est asexuée et aptère : chaque larve passe plus d'une année dans sa galle-truffe avant de se métamorphoser. Au printemps sortira une femelle parthénogénétique qui grimpera le long du tronc jusqu'à l'extrémité des branches pour aller pondre ses œufs.

Les cynips présentent souvent des générations alternantes dont chaque stade larvaire se déroule dans une galle différente, soit sur la même plante-hôte, soit sur deux espèces différentes.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Ordre des Mécoptères

Famille des Panorpidés : charognard - attiré par les fruits.



Le Panorpe possède une tête prolongée par un rostre et possède deux paires d'ailes semblables. L'extrémité de l'abdomen du mâle est relevée comme la queue du scorpion. La larve est fousseuse.

Ordre des Embioptères



Ils sont aptères. Cependant, les mâles sont parfois ailés.

L'article basal du tarse est dilaté et contient des glandes spéciales qui produisent la soie. Il vit dans le sol. Ils sont surtout présents en zonestropicales et région méditerranéenne.

Vertébrés

Amphibiens

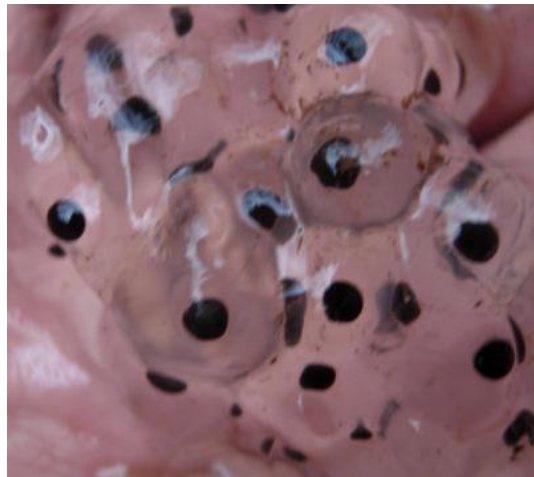
Les **amphibiens** sont les premiers vertébrés à s'être affranchis du milieu aquatique, au Dévonien, il y a 350 millions d'années. Leur indépendance à l'eau n'est toutefois pas totale ; la plupart d'entre eux doivent retourner à l'eau pour se reproduire et permettre le développement larvaire. De plus, les adultes recherchent souvent les endroits humides.



(double) et bios (vie), ce qui se traduit littéralement terrestre pour l'adulte).

La **grenouille rousse** (*Rana temporaria*) est une des plus communes. La tête porte un museau arrondi. Le dos est jaunâtre, brunâtre ou rougeâtre. La face ventrale est claire. Sa taille maximum est de 10 cm. Elle se nourrit d'insectes divers, de cloportes, de limaces et de vers (d'où son rôle de **prédateur de la faune du sol**). Elle est surtout diurne et crépusculaire. Elle ne peut séjourner longtemps dans un endroit sec car sa peau se dessèche vite. Elle se réhydrate rapidement en absorbant de l'eau par la peau.

Fin octobre, début novembre, elle rejoint son lieu d'hivernage dans la vase d'un étang ou d'une cavité. Dès les premiers jours de mars, les grenouilles se rassemblent dans les mares et les étangs. Le mâle de la grenouille rousse, comme la plupart des espèces de l'ordre des anoures, enlace la femelle sous les aisselles. Le mâle possède des pelotes sur les pouces qui l'aident à maintenir cette femelle. Lorsqu'elle pond ses œufs, le mâle éjecte sa laitance sur ceux-ci. Les œufs sont donc fécondés dans l'eau, à l'extérieur du corps de la femelle.



Œufs de grenouille. Photo B.Sottiaux

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

Une femelle de grenouille rousse peut pondre jusqu'à 4.000 **œufs déposés en massés** dans une zone d'eau peu profonde (5 à 20 cm) qui peut vite se réchauffer. La ponte précoce au printemps est dictée par le risque d'évaporation de l'eau des mares, qui s'accroît avec l'avancement de la saison.

Une fois sorti de l'œuf, au bout de trois à quatre semaines, l'embryon devient une larve. Celle-ci se fixe à la végétation à l'aide d'un disque adhésif à l'emplacement de la future bouche.

Dès que les trois paires de branchies externes, la nageoire caudale, la bouche, les yeux et l'intestin sont développés, la larve devient un têtard. Au début, celui-ci se nourrit surtout d'algues qu'il broute, puis il consomme de plus en plus de zooplancton. Les branchies se recouvrent ensuite d'une enveloppe cutanée pour devenir internes. L'animal respire par la bouche en absorbant de l'eau. En contact avec l'eau, les branchies captent alors l'oxygène et le diffusent dans le système circulatoire. Des poumons apparaissent enfin et rendent caduc le système branchial.

Les pattes se développent alors en commençant par les pattes postérieures. Le têtard devient une jeune grenouille. Les yeux deviennent plus globuleux et peuvent être fermés par une paupière ; la bouche se dote d'une langue protractile. La queue se résorbera petit à petit. Le jeune amphibien commence sa vie terrestre et devient carnivore prédateur.

Il est à noter que la grenouille adulte possède deux systèmes respiratoires indépendants : par la peau et/ou par les poumons. Elle utilise ces deux systèmes séparément ou simultanément suivant les circonstances.



La **grenouille verte** (*Rana esculenta*) se reproduit tardivement, en avril ou en mai. Les **œufs sont déposés en paquets qui tombent sur le fond**. L'éclosion se produit une semaine plus tard.

La grenouille verte possède une tête pointue avec des yeux proéminents. Sa taille varie de 8 à 12 cm.



Le **crapaud commun** (*Bufo bufo*) commence sa migration une ou deux semaines après la grenouille rousse. A la différence de celle-ci, le corps du crapaud est couvert de verrues et comprend des glandes à venin situées derrière les yeux (paratoïdes). Sa tête est large et son museau arrondi ; la pupille de l'œil est horizontale. Sa coloration varie du beige clair au brun-rouge ; il mesure une moyenne de 13 cm.

Les **œufs sont libérés en deux cordons**, enroulés autour des plantes et autres branchettes immergées. Les têtards éclosent au bout de deux semaines.

Le crapaud est surtout crépusculaire et nocturne. Il se déplace en marchant. En cas de danger, il s'aplatit au sol et rentre les yeux tout en gonflant son corps. Il se réfugie toujours sous un même abri. L'hibernation commence en octobre.

Ordre des urodèles



Le **triton alpestre** (*Triturus alpestris*) possède un corps trapu, une tête un peu plus longue que large et une queue aplatie. La peau est grise à noirâtre avec des taches sur le dos. La face ventrale est orangée à rouge vif. En parure nuptiale, le mâle est gris bleuté avec une crête dorsale jaunâtre ponctuée de taches sombres. Sa taille varie jusqu'à 11 cm.

Il vit principalement dans l'eau ou à proximité de celle-ci. Il consomme des insectes, des crustacés, des vers mais aussi des larves de têtards de grenouilles ou de sa propre espèce (cannibalisme).

A la différence de la grenouille, la femelle de triton ne pond que quelques centaines d'œufs. Après une parade nuptiale, le mâle émet un amas gélatineux ou spermatophore qui contient les spermatozoïdes.

A la différence des anoues, **la fécondation n'est pas extérieure mais a lieu à l'intérieur du corps de la femelle qui absorbe le spermatophore à l'aide de son cloaque** (orifice commun des voies intestinales, urinaires et génitales chez certains reptiles).

Lorsqu'elle a trouvé le lieu de ponte idéal, la femelle émet les œufs qui sont fécondés en passant par le cloaque. L'œuf est ensuite **déposé dans une feuille** immergée que l'animal a roulée grâce à ses membres postérieurs. C'est ainsi que les tritons répondent à la menace de prédation des poissons.

A la sortie de l'œuf, les larves de tritons sont carnivores (larves d'insectes, vers, daphnies...). Après trois mois, les adultes sont développés. Toutefois, si les conditions demeurent difficiles, la métamorphose à l'état adulte peut ne pas avoir lieu (néoténie) ; les adultes conservent leur apparence de larve mais sont néanmoins fertiles.



La **salamandre tachetée** (*Salamandra atra*) possède une tête large à museau arrondi et des yeux saillants. La queue, plus courte que le reste du corps, est de section arrondie. Cette espèce se reconnaît à ses taches jaunes sur fond noir. Sa taille adulte est de 20 à

28 cm. Elle fréquente les milieux humides, surtout les forêts de feuillus, non loin des mares, des fossés et des sources. Elle s'abrite sous les pierres ou les souches. Elle se nourrit d'insectes, de lombrics, de limaces, d'araignées, de myriapodes (mille-pattes), d'où son rôle de prédateur de la faune du sol.

En période de reproduction, le mâle recherche une partenaire et dépose un **spermatophore** (masse gélatineuse renfermant les spermatozoïdes) **qui est reçu par le cloaque de la femelle. Cette espèce est ovovivipare c'est-à-dire que les œufs se développent à l'intérieur du corps de la femelle.**

De l'été à l'automne, les larves, au nombre de 10 à 70, sont déposées dans l'eau. Les jeunes commencent leur vie terrestre trois à quatre mois plus tard.

Chapitre III : Les propriétés chimiques et biologiques du sol

La salamandre est principalement nocturne et terrestre. En dehors de la période de reproduction, elle vit en solitaire. Elle se déplace lentement. Elle est protégée par une sécrétion toxique de la peau. Elle hiverne d'octobre à mars dans les cavités du sol ou sous de vieilles souches.

Reptiles

L'**orvet** (*Anguis fragilis*), parfois appelé erronément « serpent de verre » est un lézard sans pattes, mesurant jusqu'à 50 cm. Il se nourrit surtout de limaces, de vers de terre, de cloportes, d'araignées et aussi de larves d'insectes. L'œil est petit et protégé par des paupières mobiles. Il a la faculté d'autotomie c'est-à-dire de régénération d'un bout de sa queue qui serait accidentellement perdue.

On trouve l'orvet partout où les invertébrés sont nombreux et où il peut se cacher à l'abri de la lumière et où l'humidité relative est élevée (racines, galeries de rongeurs, détritus divers...). Il hiverne, parfois en grand nombre, dans un terrier qui aura été obstrué par de la terre ou de la mousse, voire un tas de fumier ou une fente de rocher.

L'orvet est ovovipare c'est-à-dire qu'il met au monde ses petits qui déchirent la coque de l'œuf dès la naissance. Les accouplements ont lieu en avril-mai ; les jeunes, de 7 à 10 cm de long, apparaissent en fin d'été (août-septembre). Comme les autres reptiles, il subit des mues régulières.

Ses principaux prédateurs sont les mammifères et les oiseaux (rapaces, faisans...).



La **couleuvre à collier** (*Natrix natrix*) est le serpent le plus fréquemment rencontré en Wallonie. Elle est souvent observée dans l'eau et la végétation des rives. Elle n'est pas venimeuse et est donc inoffensive pour l'homme.

Elle se nourrit essentiellement de batraciens, petits poissons et petits mammifères.

La couleuvre à collier hiverne dans un trou dans le sol, un tas de fumier ou de compost ou une galerie de petit mammifère. La ponte (de 10 à 40 œufs blancs) a lieu dans des endroits propices du point de vue thermique (talus ensoleillé, tas de fumier, tas de bois mort sec ou de feuilles...). A la naissance, les jeunes ont de 14 à 22 cm.



La **vipère péliade** (*Vipera berus*) est un serpent de taille relativement petite, 45 à 65 cm. Son corps se rétrécit brusquement au niveau de la queue qui est courte. Le dos présente une bande longitudinale caractéristique, en zigzag. Les flancs possèdent des taches arrondies. Le dessus de la tête est marqué d'un dessin en forme de X ou de Y. La pupille de l'œil est verticale. Ce serpent est surtout diurne. On peut le trouver dans l'eau.

La vipère est un serpent venimeux mais, en Belgique, les accidents sont rares car, craintif, il fuit la présence de l'homme sauf s'il se sent menacé.

Ce serpent se nourrit de petits rongeurs, lézards, batraciens et oisillons. Les proies sont tuées par injection de venin. Il occupe des milieux variés se caractérisant par une alternance de zones sèches et de zones humides. Il affectionne les voies de chemin de fer et les anciennes carrières. Au printemps, on le retrouve dans des zones d'insolation (bordures forestières...) tandis qu'il se rapproche des milieux plus frais et humides en été.

L'espèce est ovovivipare et a besoin d'abris (galeries, de mammifères, souches, fissures dans le sol...).



Oiseaux qui nichent dans le sol

martin-pêcheur



Le **martin-pêcheur** se nourrit de poissons de moins de 10 cm. Il mange aussi des insectes aquatiques et des têtards. Il se poste sur une branche en hauteur à la recherche d'une proie et lorsqu'il l'aperçoit, il plonge et l'attrape avec son bec.

Le martin-pêcheur peut se reproduire dès l'âge d'un an. Sa durée de vie est de quinze ans. En période d'accouplement, les mâles et les femelles volent des heures durant l'un après l'autre. Le mâle offre un poisson à la femelle qu'il a choisie. Le martin-pêcheur ne construit pas de nid dans les arbres mais creuse un tunnel dans une berge avec la chambre de couvaison au fond. La femelle y pond 4 à 8 œufs qui éclosent après quelques semaines. Les deux parents nourrissent les petits. Quatre semaines plus tard, ceux-ci quittent le nid. Les parents aident les jeunes à trouver de la nourriture pendant quelques jours.

L'hirondelle de rivage



L'**hirondelle de rivage** se nourrit d'insectes attrapés en vol, parfois sur le sol ou à la surface de l'eau. C'est un des rares oiseaux qui creuse le sol. Elle niche, en colonies, de quelques couples à six ou sept cents. L'hirondelle creuse un terrier de section circulaire, à une profondeur de 60 à 100 cm dans une paroi de terre meuble ou de sable. Dans le fond du terrier, elle aménage une chambre qui sera ainsi maintenue à une température et une hygrométrie presque constantes.



Le nid est généralement fabriqué à partir d'un mélange d'herbes et de plumes et il peut être utilisé plusieurs années de suite. Les œufs, pondus au nombre de trois à sept, sont blanc pur et ovales. L'incubation dure de quatorze à seize jours et les hirondeaux prennent leur premier envol autour du dix-neuvième jour.

L'espérance de vie moyenne dans la nature est estimée à deux ou trois ans, et la longévité maximale observée en captivité est de huit ans.

Cette hirondelle vole près du sol, souvent au ras de l'eau et très rarement en altitude.

La cour s'effectue par le chant et par des poursuites aériennes entre mâles et femelles à proximité des sites de nidification. Avant la copulation, le mâle escorte souvent sa femelle lors de ses déplacements et chasse les autres mâles trop entreprenants.

Lors de la nidification, les deux parents participent à l'aménagement du nid, à la couvaison et aux soins apportés aux oisillons.

Comme les autres migrateurs, les hirondelles partent vers le sud en hiver, et certaines parcourent plusieurs milliers de kilomètres.

A noter que l'hirondelle de rivage, faute de trouver des berges de cours d'eau accueillantes pour la nidification, trouve des conditions favorables dans des sites de substitution comme les sablières.

Chevêche d'Athéna ou chouette chevêche



La **chevêche d'Athéna**, ce petit rapace nocturne niche dans les cavités diverses telles que trous d'arbres (saules) ou vieux murs. A titre subsidiaire, il lui arrive de nicher dans des terriers de lapins. La femelle pond de 4 à 8 œufs et couve pendant 26 à 28 jours. Les poussins naissent couverts d'un duvet épais et sont nourris d'insectes et petits vertébrés. Ils sont capables de voler et de quitter le nid entre 28 et 35 jours.

La Chevêche d'Athéna se nourrit de beaucoup d'insectes mais aussi de vers de terre, de petits mammifères (campagnols, musaraignes), de reptiles, de petits oiseaux et de chauves-souris surtout à l'époque du nourrissage des jeunes. Elle régurgite des pelotes de réjection.

Elle mesure environ 23 cm et pèse de 180 à 200 g, pour une envergure moyenne de 50 cm. Elle vit en moyenne neuf ans.

Tadorne de Belon



Le **tadorne de Belon** est un canard aux couleurs très bariolées qui fréquente surtout les zones maritimes d'estuaires (Zwin). Des copulations ont lieu dès mars. Le nid est placé dans un trou d'arbre ou un terrier de lapin. Généralement, la femelle pond en deux semaines une douzaine d'œufs. Elle assure seule l'incubation pendant environ 30 jours. Demeurant sur le nid toute la journée ou presque, elle ne

dispose que de très peu de temps pour s'alimenter lors de deux ou trois courtes pauses. Le lendemain de l'éclosion, la femelle quitte le nid et incite ses poussins à la suivre en émettant des appels continus. Ceux-ci la suivent tandis que le mâle se joint à eux. Le Tadorne de Belon se nourrit en surface en marchant dans la vase et balançant son bec latéralement. Il s'alimente également sur l'eau en utilisant différentes techniques : sur pied dans les flaques et en eau peu profonde, à la nage ou en basculant la queue en l'air en eau profonde. Il se nourrit principalement de mollusques et de crustacés marins. Le tadorne est très fidèle et reste à vie avec son premier partenaire.

Mammifères

Enfin, bon nombre de petits ou moyens mammifères vivent en relation avec le sol. Citons : taupe, campagnol, musaraigne, mulot, souris, belette, putois, hermine, blaireau, renard, lérot, loir, muscardin, lapin, lièvre, hérisson, musaraigne, castor, loutre... Ces animaux feront, à titre d'exercice, l'objet d'une courte présentation orale faisant partie intégrante de ce cours de pédologie.

Références bibliographiques

TOUYRE P., 2001. Le monde secret du sol, de la roche-mère à l'humus. Editions Delachaux & Niestlé.

MANIL G., HANOTIAUX G., Cours de Pédologie Générale; Première Partie : les constituants du sol, origines et propriétés; Troisième Partie : L'étude du profil, le problème de la classification des sols; Chaire de Sciences du sol; Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat Gembloux.

HANOTIAUX G., 1980. Pédologie forestière; Notes de cours; Service de la Science du sol; Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat Gembloux.

DELECOUR F., 1981. Initiation à la Pédologie. Service de la Science du Sol. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat Gembloux (Belgique).

Centre Technique de l'Enseignement de l'Etat, 1985; Le sol, milieu vivant; Ministère de l'Education Nationale.

PHILIPONEAU P., MENU F., RENARD M.N., 1974. Grande encyclopédie alpha des Sciences et des Techniques; Zoologie I; Grange Batelière, Paris.

SCOHY J.-P., 1992. Utilisation des cartes pédologiques. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts.

Ministère de la Région Wallonne, 1991. Le fichier écologique des essences; Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts, Namur.

DELACOUR Jacques, 1990. Amphibiens et reptiles. Editions Arthaud – Paris – 1990.

MULHAUSER Blaise, 1995. Guide de la faune et de la flore des lacs et étangs d'Europe. Delachaux & Niestlé, Lausanne – Paris, 1995.

Chapitre IV : Classification des sols

Les différentes classifications

Plusieurs systèmes nationaux de classification des sols existent. Ils traitent souvent des caractères propres à chaque pays :

- France : CPCS + RP
- États-Unis : USDA soil taxonomy
- Russie

La classification française (CPCS)

Cette classification a servi de base aux discussions du groupe de pédologues du C.P.C.S. (Commission Pédologique et Cartographique des Sols). Après quelques modifications qu'ont été faites, elle sera présentée en 1975. Après cette classification les pédologues français ont constatés que leur classification ne tient pas compte des types pédologiques des nouvelles découvertes de sols ; donc ils constituent un autre système de classification plus objectifs et basé sur des caractères plus observables et mesurables, cela a donné le référentiel pédologique (RP) en 1986 ; ils ont publiés la première version en 1992, suivie d'une deuxième en 1995, puis d'une troisième version en 2008.

Tableau 9: Les classes de la CPCS, 1967

Classe	Mécanisme dominant	Climats caractéristiques
Sols minéraux bruts	Aucun (roches affleurantes)	Différenciés au niveau de la sous-classe
Sols peu évolués	Pas net (sols jeunes)	Différenciés au niveau de la sous-classe
Vertisols	Evolution orientée, voir bloquée, par la présence d'une forte teneur en argile de type 2/1 : c'est la <i>vertisolisation</i>	Méditerranées ou subtropicaux
Andosols	Evolution liée à la présence d'une roche volcanique très altérable fournissant des produits mal cristallisés (allophanes) ; cela correspond à l' <i>andosolisation</i> et parfois à la brunification	Humides avec une différenciation au niveau de la sous-classe
Sols calcimagnésiques	Evolution liée à la présence de calcium en quantité variable : on prend en compte la <i>décarbonatation</i> et la <i>décalcification</i>	Indifférents
Sols isohumiques	Evolution liée à la présence simultanée d'une forte activité biologique et d'une matière organique humifiée et stable	Continentaux avec une différenciation au niveau de la sous-classe
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 <i>dégradation</i> , la <i>planosolisation</i> .	Tempérés avec une différenciation au niveau de la sous-classe.
Sols podzolisés	Evolution matérialisée par une acidification détruisant les minéraux silicatés, éliminant les bases et la silice 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.

Chapitre IV : Classification des sols

Sols 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 méditerranées
Sols ferrallitiques	Sols liés à la dissolution totale des minéraux primaires, à l'exportation des bases et de la silice (y compris quartz), à la concentration relative du fer et de l'aluminium : c'est la <i>ferrallitisation</i>	Chauds
Sols hydromorphes	Sols liés à un excès d'eau : c'est l'hydromorphie	Indifférents
Sols sodiques	Sols évoluant dans des milieux riches en sels solubles : on examine <i>salinisation</i> et <i>sodisation</i>	Indifférents

Référentiel pédologique français (RP)

Le Référentiel Pédologique français est le fruit d'un travail collectif. Il est le résultat d'une évolution depuis l'ancienne classification française des sols (CPCS, 1967). Le Référentiel pédologique montre la distinction entre la réalité, les images de cette réalité et les concepts qui sont définis. Il doit être fait une distinction entre :

- L'espace géographique et son application dans la cartographie des sols,
- La typologie comprenant la classification des sols, les taxonomies des sols, les typologies des sols.

Cette distinction est faite dans la Base de données des sols d'Europe entre « Unités typologiques des sols » et « Unités cartographiques des sols ». Le Référentiel Pédologique a introduit deux innovations :

- Les objets étudiés sont les couvertures pédologiques qui peuvent être subdivisées en horizons avec des séquences verticales ou horizontales,
- Le système n'est pas une classification hiérarchique.

Les horizons sont des volumes élémentaires permettant d'échantillonner les couvertures pédologiques qui se définissent par :

- Leurs propriétés (constituants, organisations, caractéristiques analytiques),
- Leurs relations avec les autres horizons :
 - Relations pédogénétiques, avec les évolutions lentes et progressives,
 - Relations fonctionnelles, avec les changements journaliers et saisonniers.

Les « horizons de référence » sont la base du système. Ils sont le résultat des principaux caractères morphologiques, de données analytiques liées aux processus pédogénétiques en tenant compte des autres horizons de la section verticale de la couverture pédologique, appelée solum

Chapitre IV : Classification des sols

La classification américaine (soil taxonomy)

Depuis les années 1960, un système de classification apparus prend le nom d'USDA (United States Department of Agriculture) rédigé lors du 7^{ème} Congrès International de Science du Sol tenu à Madison (USA), qui a été réalisé par le service de cartographie des sols sous la direction de SMITH avec l'aide d'une équipe belge, ce système a été modifié plusieurs fois pour donner en fin de compte la *soil taxonomy*. L'édition définitive est apparue en 1975. Cette classification est basée sur l'identification précise d'horizons diagnostiques, soigneusement hiérarchisés et défini par un ensemble de propriétés physiques, morphologiques et chimiques décrites et chiffrées avec une grande précision.

Les Américains ont inventé la notion d'horizon de « diagnostic ». Il s'agit d'horizon typique, très précisément décrits. La présence de tel ou tel d'entre eux est suffisante, en principe, pour classer un sol, au plus haut niveau dans la taxonomie. Même si cela revient un peu à présenter les détails avant l'essentiel, nous devons donc étudier d'abord ces horizons de diagnostic puisqu'on ne peut entrer dans le système de niveaux principaux. Les chiffres entre parenthèses font référence au nombre de taxons rencontrés à ces niveaux.

Tableau 10: Organisation de la taxonomie américaine

Order (12) Définis par des horizons de diagnostic matérialisant un processus de formation du sol (ex : Horizon Argillic)
Suborder (60) Correspondent au régime hydrique du sol ou à des conditions environnementales : climat, géologie, végétation
Great groupe (plus de 300) Définis par une propriété importante qui peut être la présence d'un horizon de diagnostic mais moins différencié
Subgroup (plus de 1200) Information complémentaire, par exemple sol typique ou tirant sur tel autre

Epipedons (horizon de diagnostic de surface)

Les Américains rangent à part les horizons de diagnostic de surface ou *diagnostic Epipedons*. Ces horizons sont caractérisés par des noms qui sont éventuellement abrégés.

Chapitre IV : Classification des sols

Tableau 11: Horizons de diagnostic de surface (Epipedons)

Epipedon	Abrév.	Définition simplifiée
Anthropic	Anthr	Avec des traces de modification par l'homme
Folistic	Fol	(Latin folta = tissu), milieu sain, plus de 15 cm, plus de 8% de carbone organique
Histic	Hist	(Latin histos = tissu), milieu humide, plus de 8% de carbone organique
Melanic	Melan	(Grec mela = noir), noir, plus de 6% de carbone : présence (ou est associé à) des propriétés andiques
Molic	-	Humifère, sombre, calcaire ou peu acide, taux de saturation > 50%, plus de 10 cm
Ochric	Ocht	(Grec ochros = pâle), très pauvre en C, pauvre en CaCO ₃ , légèrement coloré
Plaggen	Plag	Plus de 50 cm, fabriqué par l'homme, traces typiques (poteries empreinte de bêche)
Umbric	Umbr	10 cm ou plus, sombre, taux de saturation < 50%

Les abréviations sont importantes car elles servent à constituer le nom des sols. Par exemple, il existe un « Suborder » appelé « Folist » qui reprend la racine « Fol » du « Folistic ».

Horizon de diagnostic de subsurface

Tableau 12: Horizons de diagnostics de subsurface (horizon B)

Horizon	Abrév.	Définition simplifiée
Agric	Agr	(Latin ager = champ), illuvial sous un horizon cultivé, revêtements de limons, argile et humus
Albic	alb	(Lati albus = blanc), éluvial, claire, surmonte souvent un horizon illuvial
Argillic	arg(i)	(Latin argilla = argile) blanche), argileux, épais, maques d'illuviation sauf dans le cas particulier des sols gonflants
Calcic	calc(i)	(Latin calcis = calcaire), illuvial, enrichi en carbonates secondaires (attention : faux ami :en français « calcique » veut dire qui a perdu son calcaire)
Cambic	camb	(Latin cambiaire = échanger), d'altération, structure de la roche partiellement effacée, éventuellement décarbonaté
Duripan	dur	(Latin duras = dur), cimenté par la silice
Fragipan	fra(i)	(Latin fragilis = fragile), limoneux, structure prismatique, dur et massif mais encore facile à briser, pas de racines
Glossic	gloss	(Grec glossa = langue), dégradation en langue d'horizons argillic, kandic ou natic
Gypsic	Gyps	Contenant 5% ou plus de gypse non induré
Kandic	kandi	Illuvial CEC < 16 cmol (+) : kg d'argile, présence de revêtement non obligatoire
Natric	natr	(Latin natrium = sodium), argile de structure primatique liée à des conditions de salinité (SAR > 13)
Ortstein	-	Matériel spodique, cimenté et épais de 2.5 cm au moins
Oxic	-	Sable limoneux, pauvre en minéraux altérables. CEC < 16 cmol (+)/kilo d'argile, riche en fer ou aluminium
Petrocalcic	-	Illuvial cimenté par des apports de CaCO ₃
Petrogypsic	-	Illuvial cimenté par des apports de CaSO ₄
Placic	plac	Illuvial de 0.1 à 2.5 cimenté par fer ou manganèse et matière organique
Salic	sal	(Anglais salt = sel), accumulations de sels plus solubles que le gypse, conductivité électrique élevée
Sombric	sombr	(Français sombre), illuvial, riche en MO, non spodique ou salé, typique des montagnes intertropicales
spodic	-	Illuvial riche en matériel spodique

Chapitre IV : Classification des sols

Une fois, les définitions fournies sont simplifiées. Donnons, à titre d'exemple, la définition, presque complète de l'horizon Argillic

Un horizon « argillic » est normalement un horizon de sub-surface avec un pourcentage de phyllosilicates plus élevé que celui du matériel qui le surmonte. Il présente des marques évidentes d'illuviation de l'argile. L'horizon argillic se forme sous la surface mais il peut être exposé plus tard en surface à cause de l'érosion. (Suivant des critères d'identification morphologique, micromorphologiques et analytiques que nous avons résumés ci-après).

Condition d'épaisseur : l'horizon dont on envisage le classement en « argillic » doit avoir une épaisseur minimale de x cm (il y a plusieurs valeurs de x en fonction de la texture, de la teneur en argile et de la structure de l'horizon à classer).

Conditions relatives aux marques d'illuviation : il faut voir dans l'horizon candidat « argillic » de l'argile orientée ou des films d'argile sur les agrégats ou dans les pores ou encore déterminer qu'il est proportionnellement plus riche en argile fine dans les cas où le sol est affecté de mouvements qui détruisent les figures d'illuviation.

Condition de teneur relative en argile : il s'agit de vérifier que l'horizon dont on envisage le classement en « argillic » est plus riche en argile de y% que l'horizon éluvial qui le surmonte : il y a plusieurs valeurs de y en fonction de la teneur en argile de cet horizon éluvial.

Caractères diagnostics

En plus des horizons de diagnostic, la taxonomie américaine distingue des *diagnostics properties* qui ne correspondent pas nécessairement à des horizons déterminés. Par exemple, un changement textural brutal met en cause à la fois deux horizons superposés. Ces caractères diagnostics sont classés en trois ensembles : ceux qui intéressent les sols minéraux, ceux qui intéressent les sols organiques, ceux qui peuvent intervenir dans tous les sols.

Tableau 13: Caractères diagnostics spécifiques des sols minéraux

Caractère	Abrév.	Définition simplifiée
Abrupt textural change	-	Accroissement important de la teneur en argile sur une faible distance
Albic materials	alb	(Latin albus = blanc), matériel dépourvu d'éléments colorants (argile, fer) et dont la couleur est celle des sables et limons qui le composent
Andic soil properties	and	Contient des allophanes, imogolite, ferrihydrite, complexes al-humus (amorphes au sens large) : caractérise des verres volcaniques dont la présence n'implique pas le classement du sol en Andisol.
Anhydrous conditions	-	(Grec anhydros = sans eau), caractérise les déserts froids sans eau liquide
Coefficient of linear Extensibility	-	Appelé aussi COLE : définit au niveau d'un agrégat par : (Lh-Ls)/Ls avec Lh : longueur à l'état humide Ls : longueur à l'état sec
Durinodes	duri	(Latin durus = dur), concrétions de structure concentrique, plus ou moins indurées, de taille > 1 cm à base de silice
Fragic Soil properties	frag	(Latin fragilis = fragile), caractérise un Fragipan qui n'a pas l'épaisseur voulue ou la taille des constituants pour correspondre à la définition de cet horizon de diagnostic
Identifiable Secondary carbonates	-	Caractérise différentes forme de carbonates secondaires masses, nodule, concrétions, revêtement
Interfingering of Albic Material	-	Matériel albiqne pénétrant de plus de 5 cm sous forme de doigts, dans un horizon argillic ou natric sous jacent tout en représentant

Chapitre IV : Classification des sols

		moins de 15% , en volume, de la partie de l'horizon envahi.
Lamellac	-	Horizon illuvial fait de plusieurs lamelles de moins de 7.5 cm d'épaisseur séparées par des horizons éluviaux ; les lamelles correspondent à un horizon cambic ou Argillic (Ben bandes des Français)
Lineur Extensibility	-	Vaut la valeur COLE multipliées par l'épaisseur de l'horizon ; rend compte du potentiel du sol à gonfler et se rétracter
Lithologic discontinuities	-	Il n'y a pas de norme pour caractériser une discontinuité lithologique. On se reporte à la rapidité du changement textural, à la taille contrastée des sables, à la nature des éléments grossiers, à la présence d'une « stone line », à l'état d'altération des éléments grossiers.
Thermic	therm	Moyenne annuelle entre 15 et 22 degrés, différence été-hiver de plus de 6 degrés
Hyperthermic	-	Moyenne annuelle au-dessus de 22 degrés, différence été-hiver de plus de 6 degrés
Isomesic		
Isothermic		
Isohyperthermic		
Sulfidic		Contient des sulfures
Sulfuric		Contient des sulfates

Tableau 14: Clé de détermination de la Soil Taxonomy

Ordre	Abrév.	Définition succincte, équivalent en langage CPCCS
Gelisols	cls	(Grec gelid = très froid), ont un permafrost en surface ou au moins avant 200 cm de profondeur (sols peu évolués des hautes altitudes et latitudes)
Histosols	ist	(Grec histos = tissus), présentent un horizon organique épais (+ de 400 cm ou plus de 2/3 de l'épaisseur du sol si celui-ci est superficiel), accumulation liée à la présence actuelle ou ancienne de l'eau (tourbes et sols très organiques)
Spodosols	ods	(Grec spodos = cendre), présentent un horizon Spodic (sols podzolisés typiques des milieux très acidifiés)
Andosols	ands	(Japonais ando = noir), présentent des propriétés andiques (andosols typiques des régions volcaniques si le milieu est humide et frais ou froid).
Oxisols	ox	(Français oxyde), présentent un horizon Oxic (moins de 10% de minéraux altérables dans la fraction 50-200 microns, présence de sesquioxydes du type Fe ₂ O ₃ ou Al ₂ O ₃ , capacité d'échange de moins de 16 cmol (+) par kg d'argile) ou présentent un horizon Kandic : texture fine, enrichissement relatif en argile, capacité d'échange limitée (sols ferrallitiques des zones intertropicales)
vertisols	erts	(Latin vertos = virer ⇔ sols qui bougent), présentent des slickensides ou au moins des agrégats à faces obliques, plus de 30% d'argile et des fentes de retrait en période sèche (vertisols des climats secs méditerranéens ou subtropicaux)
Aridisols	ids	(Latin aridis = sec), correspondent à un climat aride (peu d'eau) que la température soit élevée ou non. Mais peuvent être saturés d'eau si salés. Horizons de diagnostic possible : Natric, Calcic, Petrocalcic, Gypsic, Petrogypsic, Salic, Argillic, Duripan (Sols des climats secs présentant des accumulations de calcaire, gypse ou sels)
Ultisols	ults	(Latin ultimus = ultime), présentent des marques de forte évolution : horizon Argillic, Kandic ou Fragipan et taux de saturation inférieur à 35% Sels aux matériaux très altérés de la zone intertropicales et subtropicales
Mollisols	olls	(Latin mollis = doux ⇔ sols à humus doux), présentent un horizon de surface Mollic avec un taux de saturation supérieur à 50% (sols des prairies et forêts à feuilles caduques, calcaires ou non)

Chapitre IV : Classification des sols

Alfisols	alfs	(Terme inventé), présentent un horizon Argillic, Kandic, Natric ou un Fragipan. Climat humide ou subhumide, taux de saturation > 30%, légèrement acide (sols lessivés des climats humides)
Inceptisols	epts	(Latin inceptum = débutant), n'entrent pas dans les catégories présentées ci-dessus car relativement superficiels et pas suivis en profondeur par des horizons Calcic, Petrocalcic, Gypsic, Petrogypsic, Placic, Duripan ? fragipan, Oxidic, Spodic, Sulfuric. En revanche, peuvent présenter des horizons correspondant à des sols peu évolués : Cambic, Histic, Mollic, Plaggen, Umbric Epipedon
Entisols	ents	(Terme inventé), n'entrent dans aucune des catégories précédentes. Pas d'horizons de diagnostic développé, sauf epipedons Ochric et Anthropic (sols minéraux bruts)

La classification Russe

C'est dans les années 1870 qu'une école russe menée par Vassili Dokoutchaïev a introduit une nouvelle approche des matériaux « sols ». Cette école les conçoit comme des corps naturels indépendants, chacun avec une morphologie unique résultant d'une combinaison unique de facteurs, climat, matières vivantes, matériaux terrestres, âge des reliefs. La morphologie de chaque sol est définie par une coupe verticale donnant les différents horizons des couches reflétant les effets combinés de l'ensemble des facteurs responsables de son développement et des altérations. Ce concept révolutionnaire qui montrait les interférences entre les couches de sols, le climat et les autres facteurs environnementaux considérés seuls ou combinés.

Aperçu sur les sols d'Algérie

Plusieurs travaux sur les sols de l'Algérie ont été fournis pour connaître les caractéristiques des sols en fonction des facteurs du milieu. Parmi les premiers travaux dans ce domaine, nous citons ceux de Del Villar en 1947, il a étudié la plaine de Habra et du Chélif, puis en 1953 il a proposé une méthode de classification et analyse des sols au Maroc et en Afrique du Nord. Entre les années 1940 et 1950, Gaucher a étudié les sols rouges sur croûtes et les sols gris salés du Bas-Chélif. Cependant, les travaux de Durand sont importants; on cite leur synthèse sur les sols d'Algérie en 1954, s'ensuit par un ouvrage sur les sols rouges et les croûtes calcaires en 1959. Il a édité plusieurs cartes à l'échelle 1/500 000 et 1/200 000 sur les sols de l'Algérie du Nord. Durant la même période, de nombreuses études régionales ont été menées parmi celle-ci de Benchetrit en 1956, il a publié un travail de synthèse sur les sols d'Algérie. Des études de Boulaine en 1957 sur les sols de la plaine du Chélif. Après l'indépendance, de nombreuses recherches sur la cartographie des sols en cite en particulier les travaux de Belouam, 1971; Dekkiche, 1974; Pouget, 1980; Halitim, 1988 ; Lahmar, 1988 ; Daoud, 1993. Leurs études consacrées sur le fonctionnement et

Chapitre IV : Classification des sols

la dynamique d'un type de sol ou d'une propriété pédologique .On cite aussi les travaux de Djili En 2000, il a proposé la création d'une banque de données informatisée avec l'utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Douaoui a apporté une contribution sur l'apport de la télédétection et la géostatistique sur la variabilité spatiale de la salinité dans la plaine du bas Cheliff en 2005. Kazi-Tani a établi une cartographie numérique des sols à l'échelle de paysage cas de la région des Traras orientaux (Nord-ouest de l'Algérie) en 2016. Les travaux de Djili (2000) sont basés sur l'utilisation des SIG (Système d'Informations Géographiques) pour quantifier et analyser les données des sols du nord de l'Algérie, leurs travaux constituent une démarche dans la pédologie moderne. L'utilisation de la géostatistique par Douaoui (2005) a fait franchir définitivement le pas, de la pédologie en Algérie dans l^{ère} de la pédologie moderne. Les travaux de Kazi –Tani (2016) sur la cartographie des sols avec l'utilisation de la chaîne de Markov induite, pour le but de distinguer les séquences des sols de la région d'étude. Tous ces travaux sont importants et donnent plusieurs d'informations sur les sols d'Algérie, mais malgré d'un nombre études pédologiques ces derniers restent encore mal connus.

Les principaux sols d'Algérie Les sols des régions

Sahariennes

- La formation des sols dans cette région est entièrement dominée par les conditions climatiques ou le vent joue un rôle prépondérant. D'où formation des deux types de sols éolien.
- **Sols éoliens d'ablation** sans terre fine et dont le caractère essentiel, l'absence de terre fine ne dépend pas de la roche mère. L'enlèvement de toutes les parties de roches suffisamment fines pour être entraînées ne laisse sur place que des cailloux plus ou moins grossiers qui se concentrent en surface et donnent ce qu'on appelle à tort un **reg**
- **Le reg** est par excellence un sol zonal, son caractère est constant : surface couverte de cailloux éolisés reposant sur une épaisseur très variable d'alluvions plus ou moins meubles.



- **Sols éoliens d'accumulation** formés par les particules entrainés par le vent qui s'accumulent dans les zones abrités formant des dépôts de sable plus ou moins développés : **rehboub, ncbk, dune, jusqu'au Ergs.**



- **Les sols des régions semi-arides :**

En Algérie caractérisés par la présence de 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

Chapitre IV : Classification des sols

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 un état primitif.

Les roches mères sont en générale calcifères, des sols contenant du calcaire ou du gypse (**sols calciques**) et des sols qui n'en contiennent pas (**sols en équilibres**), 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 riche en ions Ca^{++} et le pH est toujours compris entre 7 et 8 et ils contiennent des doses appréciables de matières organiques (entre 0,3 et 1 %), mais pas de sels solubles. A côté des sols calciques on observe aussi des sols gypseux.

Ils présentent les caractères suivants : texture légère, bonne perméabilité mais faible capacité de rétention en eau due à leur relative pauvreté en colloïdes.

- Les sols en équilibres : sols ayant les mêmes caractères que les sols calciques mais formés sur des roches mères non calcifère. Ces sols sont rares en Algérie car les roches calcaires ou gypseuses couvrent 90 % de la surface des zones semi-arides mais il est fréquent de rencontrer des **sols salins** dans les bas-fonds mal drainés ou alimentés par des nappes phréatiques.

- **Les sols des régions telliennes humides**

Les sols de ces régions humides peuvent se définir par leur mode de formation original : Entraînement des 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 des sols dans le seul caractère commun est lessivage plus ou moins poussé et que l'on classe en trois grands groupes.

Le groupe calcaire comporte tous les sols formés à partir de roches calcaire

Groupe non calcaire qui comporte les sols formés sur une roche non calcaire. Deux types principaux : sols insaturés (les granites de Nadroma) par exemple et sols podzoliques se sont des sols très acides se rencontre dans le nord de l'Algérie sur les grès de Numidie, les gneiss et certaines dunes et supportent de belles forêts acidophiles (chênes) avec sous-bois dense bruyère, dyss ou la pluviométrie est supérieur à 500mm/an

Le groupe des terres rouges méditerranéennes :

Chapitre IV : Classification des sols

- **Les sols azonaux (locaux)**

A peu près toutes les variétés des sols azonaux se retrouvent en Algérie : sols des marais, sols dunaires, sols d'éboulis, sols alluviaux, divers etc.

Les sols à encroutement sont particulièrement nombreux en Algérie. Ils ne constituent pas un type de sol original. Mais se caractérisant par la formation d'une croûte. Plus ou moins épaisse et souvent très dure au sommet du profil, formant un encroutement calcaire, gypseux ou salin. Ces encroutements résultent d'une remontée capillaire des substances dissoutes dans l'eau. Dans tous les profils à encroutement calcaire le matériau encrouté n'est pas en surface mais à une certaine profondeur.

Les sols salins très répandus dans le Tell algérien ce sont surtout des solonchaks ou les chlorures de sodium sont en quantité telles (plus de 0,2 %) que la végétation naturelle de la région laisse place à une végétation halophyte qui disparaît elle-même lorsque la proportion de sels augmente trop. Très nombreux sont les affleurements des roches salifères en Algérie : gypse triasique, grès du Crétacé moyen, marne sénonienne dans le sud constantinois, grès et limon rougeâtre.

Références bibliographiques

TOUYRE P., 2001. Le monde secret du sol, de la roche-mère à l'humus. Editions Delachaux & Niestlé.

MANIL G., HANOTIAUX G., Cours de Pédologie Générale; Première Partie : les constituants du sol, origines et propriétés; Troisième Partie : L'étude du profil, le problème de la classification des sols; Chaire de Sciences du sol; Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat Gembloux.

HANOTIAUX G., 1980. Pédologie forestière; Notes de cours; Service de la Science du sol; Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat Gembloux.

DELECOUR F., 1981. Initiation à la Pédologie. Service de la Science du Sol. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat Gembloux (Belgique).

Centre Technique de l'Enseignement de l'Etat, 1985; Le sol, milieu vivant; Ministère de l'Education Nationale.

PHILIPONEAU P., MENU F., RENARD M.N., 1974. Grande encyclopédie alpha des Sciences et des Techniques; Zoologie I; Grange Batelière, Paris.

SCOHY J.-P., 1992. Utilisation des cartes pédologiques. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts.

Ministère de la Région Wallonne, 1991. Le fichier écologique des essences; Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts, Namur.

DELACOUR Jacques, 1990. Amphibiens et reptiles. Editions Arthaud – Paris – 1990.

MULHAUSER Blaise, 1995. Guide de la faune et de la flore des lacs et étangs d'Europe. Delachaux & Niestlé, Lausanne – Paris, 1995.