

3ème version (janvier2010)

**CHAPITRE III :**  
**LES CONSTITUANTS**  
**SOLIDES DU SOL**

# CHAPITRE III : LES CONSTITUANTS SOLIDES 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 solubles 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.

CONSTITUANTS SOLIDES		CONSTITUANTS LIQUIDES	CONSTITUANTS GAZEUX
Constituants minéraux	Constituants organiques	= Solution du sol	= air du sol
<p><b><u>Terre fine du sol :</u></b> Argiles, limons fins, limons grossiers, sable fins, sables grossiers</p>	<p><b><u>Matière organique fraîche :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ constituants des tissus végétaux cellulose, hémicellulose, tanins,...</li> <li>➤ déjections animales et animaux morts</li> </ul>	<p><b><u>Eau du sol</u></b> <b><u>Éléments solubles dissous :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ substances organiques (acides organiques, sucres,...)</li> <li>➤ ions dans l'eau du sol : <math>Ca^{++}</math>, <math>Mg^{++}</math>, <math>K^+</math>, <math>Na^+</math>, <math>NO_3^-</math>, <math>PO_4^{3-}</math>, ...</li> </ul>	<p><b><u>Constituants de l'air :</u></b> <math>O_2</math>, <math>N_2</math>, <math>CO_2</math></p> <p><b><u>Gaz issus de l'activité des animaux du sols et des processus de décomposition :</u></b> <math>CO_2</math>, <math>H_2</math>, <math>CH_4</math>,...</p>
<p><b><u>Éléments grossiers :</u></b> Graviers, Cailloux, Pierres, Blocs</p>	<p><b><u>Matières humiques :</u></b> matières organiques transformées</p>		

Nous étudierons dans ce chapitre les constituants solides du sol, les autres fractions seront abordées dans les chapitres suivants.

## **PREMIERE PARTIE :** **LES CONSTITUANTS MINERAUX 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. A la suite d'une convention internationale, les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre :

<b>TERRE FINE</b>	ARGILE	particules de moins de 2 $\mu$ m
	LIMONS FINS	2 à 20 $\mu$ m
	LIMONS GROSSIERS	20 à 50 $\mu$ m
	SABLES FINS	50 $\mu$ m à 200 $\mu$ m
	SABLES GROSSIERS	200 $\mu$ m à 2mm
<b>ELEMENTS GROSSIERS</b>	GRAVIERS	2 à 20 mm
	CAILLOUX	2 à 7,5 cm
	PIERRES	7,5 à 20 cm
	BLOCS	>20 cm

L'ensemble formé par les argiles, les limons et les sables forment 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. LES ELEMENTS 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.

## 2. LES SABLES GROSSIERS

Ceux-ci :

- 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.

## 3. LES LIMONS ET SABLES FINS

Ils rendent le sol « battant » : le sol a tendance à se tasser en surface sous l'effet des pluies et à former des croûtes (glaçage en surface).

Ils ont tendance à retenir l'eau en s'opposant à son infiltration en profondeur : le sol est imperméable en surface, asphyxiant pour les racines.

## 4. LES FRACTIONS COLLOIDALES MINÉRALES OU ARGILE PÉDOLOGIQUE

Les éléments sableux que nous venons d'étudier sont enrobés d'une sorte de pâte, une sorte de « colle », qui les réunit en petits agrégats. Tout comme un édifice, le sol est donc construit, il possède une structure, dont la forme et la solidité dépendent, nous le verrons, du pourcentage des éléments qui le constituent mais surtout de la nature de cette pâte que l'on nomme « les colloïdes du sol ». Parmi ceux-ci, on distingue les **colloïdes organiques (substances composant l'humus)** des **colloïdes minéraux**.

Classés d'après leurs propriétés minéralogiques, les constituants de l'argile pédologique se répartissent comme suit :

- argiles minéralogiques ;
- silice amorphe (colloïdale) et silice cristallisée ;
- sesquioxides cristallisés ou amorphes ;
- minéraux résiduels.

## 4.1. LES ARGILES MINÉRALOGIQUES

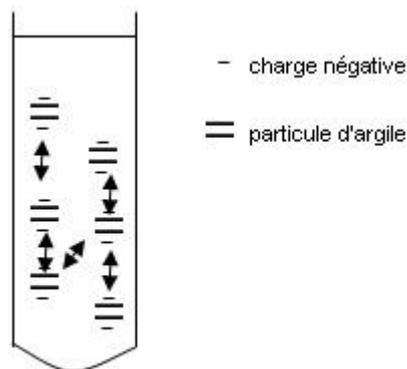
**4.1.1. Généralités :** voir cours de géologie.

### **4.1.2. Propriétés physico-chimiques des argiles :**

#### A) 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 (voir figure 1 ci-dessous).

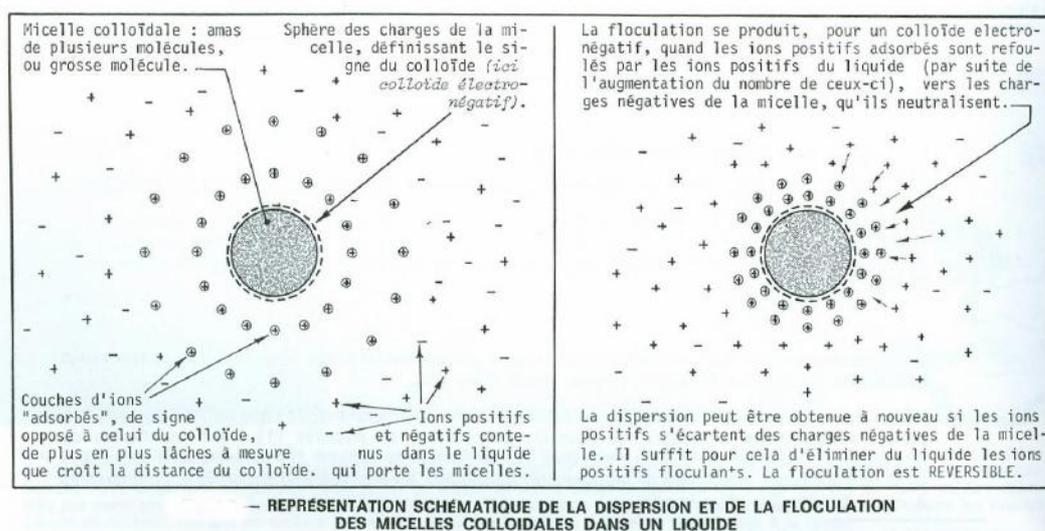
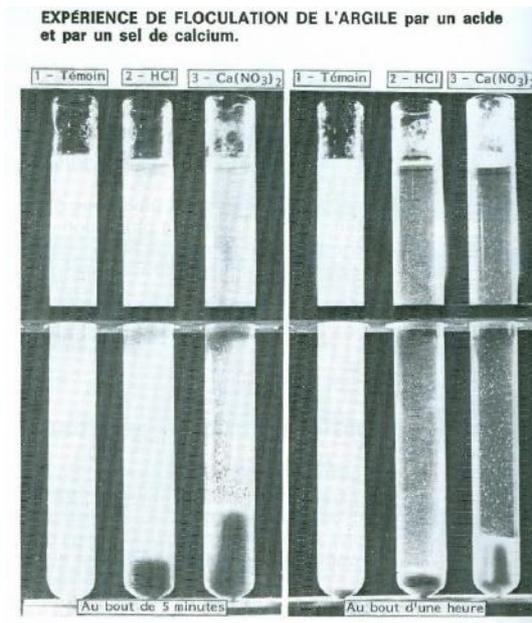
A ce moment, les argiles restent en suspension (appelée suspension colloïdale), à l'état dispersé (ou peptisé). Il n'y a pas de précipitation et les particules d'argiles sont animées d'un mouvement résultant de la répulsion électrostatique entre particules.



**Figure 1 :** Les particules d'argiles 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  $H^+$ , ou un sel de calcium (figure 2 ci-dessous) qui libère des cations  $Ca^{++}$ , 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.



Les micelles d'argile sont entourées d'une couche dense de charges électriques négatives. Cette couche est elle-même entourée d'un nuage de plus en plus lâche de charges de signe contraire, constitué d'ions positifs adsorbés (adsorbé = fixé sur), le plus souvent ions H<sup>+</sup> et cations métalliques Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Dans l'état de dispersion (ou peptisation), le nuage d'ions entourant les micelles est très lâche, les ions sont très peu nombreux. Les charges électriques de même signe (négatif) entourant les micelles les contraignent à se repousser et se disperser dans tout le liquide. Celui-ci est trouble, car l'argile et l'eau, en mélange homogène, ne peuvent se séparer. Mais si l'on introduit un acide, qui libère des ions H<sup>+</sup>, ou un sel de calcium, qui libère des ions Ca<sup>++</sup>, ces ions positifs repoussent vers les micelles les ions positifs qui les entouraient. Ceux-ci, venant s'y accoler, neutralisent les charges négatives des micelles, qui peuvent alors s'agglutiner et se déposer. C'est la flocculation, ou précipitation : les micelles argileuses se regroupent et se séparent aisément de l'eau. A l'inverse, un apport de bases libère des ions OH<sup>-</sup>, et provoque la dispersion, car ces ions négatifs éloignent les cations des micelles, qui de nouveau se repoussent mutuellement. Ces deux états, dispersion et flocculation, sont donc réversibles. L'argile flocculée peut se disperser à nouveau, si elle perd ses ions flocculants.

**Figure 2 :** Flocculation et dispersion des argiles (tiré de SOLTNER, 1992)

## B ) Flocculation et dispersion des argiles en conditions de laboratoire :

a) Action des acides et des bases :

- les acides, libérant des ions  $H^+$ , provoquent la flocculation 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 micelles, qui de nouveau se repoussent mutuellement.

On peut résumer tout ceci par l'équation :



Si apport d'acides ( $H^+$ ), l'équilibre se déplace vers la droite : il y a flocculation.

Si apport d' $OH^-$ , ces derniers se combinent aux  $H^+$  pour former des molécules d' $H_2O$ . Suite à la diminution de concentration en  $H^+$ , l'équilibre va se déplacer vers la gauche : il y aura dispersion (peptisation).

b) Influence de la nature des ions sur la flocculation :

- $K^+$ ,  $H^+$ ,  $Na^+$  n'ont qu'un faible pouvoir flocculant.
- $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  et  $Al^{+++}$  flocculent bien les argiles.

Le pouvoir flocculant 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 flocculation des argiles de ces boues, qui vont alors sédimenter.

## C. Pouvoir flocculant ou dispersant de certains cations sur le terrain :

**a) Le calcium Ca :** c'est l'ion flocculant par excellence (employé d'ailleurs pour cette propriété dans les chaulages ou amendements calcaires).

**b) Le magnésium Mg :** souvent associés au calcium, il aura une action analogue, bien que moins énergétique.

**c) L'ion Al :** alors que  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  sont les principaux ions flocculants en milieu neutre ou faiblement basique (  $PH = 7$  à  $8$  ), les ions  $Al^{+++}$  ( ou sous forme d'hydroxydes ) exerce de façon prépondérante leur action flocculante en milieu acide (  $PH$  inférieur à  $5,5$  ).

Les ions  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Al}^{+++}$  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' $\text{Al}^{+++}$  et pas encore assez de  $\text{Ca}^{++}$  : le risque de déstructuration et de compaction est très fort.

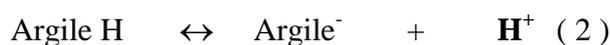
Cependant, concernant les milieux acides, il est important d'apporter la nuance suivante : lorsque le sol est très acide, caractérisé par des moder ou des mor, la matière organique se biodégrade lentement et produit des substances organiques de faible valeur ou défavorables pour la structure du sol, ce qui contrarie l'action floculante des ions  $\text{Al}^{+++}$ . Il se produit alors dans ces conditions, une dégradation de la structure du sol.

**d) L'ion  $\text{H}^+$  :** en laboratoire, les ions  $\text{H}^+$  floculent assez bien l'argile. Mais en sols acides (riches en  $\text{H}^+$ ), 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.

**e) Le sodium Na :**

En présence d'eau salée, l'argile flocule. **Mais** en présence d'eau douce ( pluie ), l'argile sodique est fortement dissociée (  $\text{Na}^+$  tend à s'écarter des micelles ). Le sodium va alors agir sur l'eau pour former avec les ions  $\text{OH}^-$ , une base forte NaOH. Le PH du sol va alors augmenter ( jusqu'à 8-9 ). NaOH étant une base forte, la dissociation en ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{OH}^-$  est complète ( 1 ). Les  $\text{OH}^-$  auront tendance à se recombinaer aux  $\text{H}^+$  pour former des molécules d'eau ( 3 ). Afin de faire face à la diminution d' $\text{H}^+$  dans la solution du sol, les argiles vont perdre progressivement ceux qui sont situés à leur surface : l'argile se disperse alors ( 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 (sylvinite, nitrate de soude) en sols argileux.

**f) Le potassium K :**

Cet ion a un pouvoir floculant 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 floculant par un autre ion au pouvoir floculant plus faible).

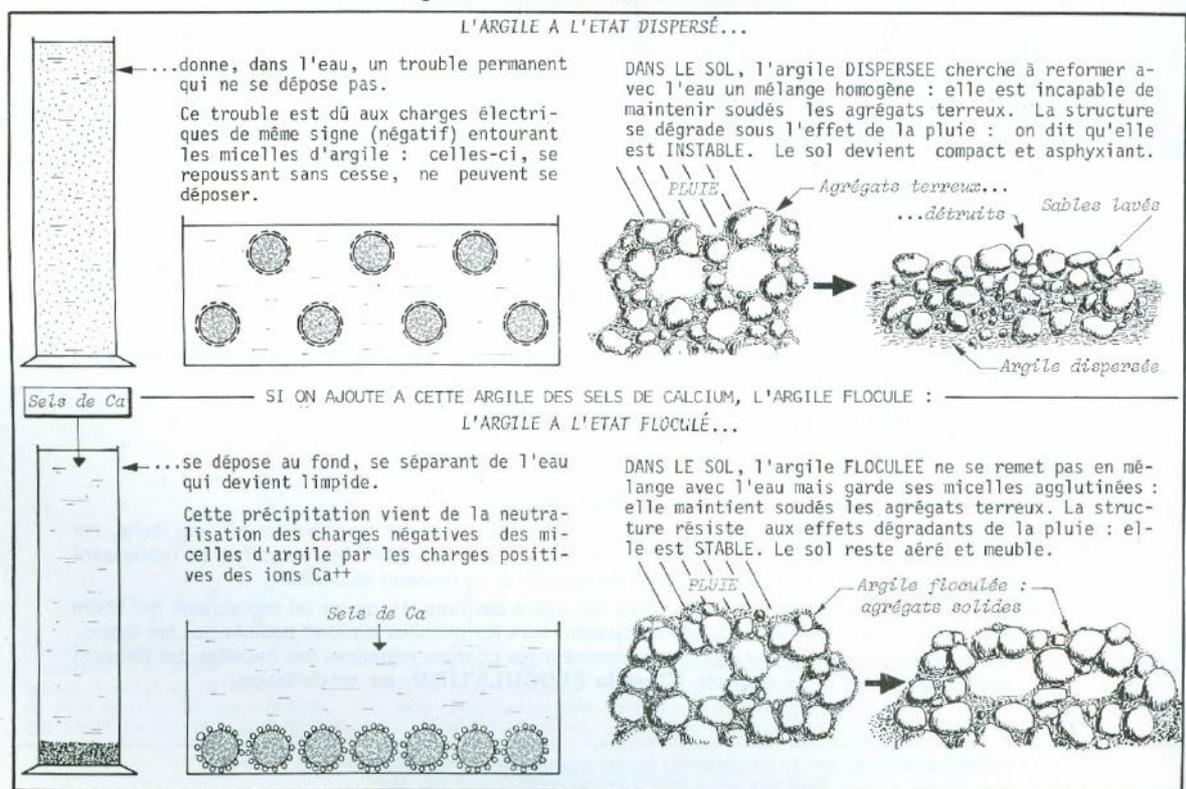
#### D ) Propriétés de l'argile :

L'argile est **hydrophile**, c'est-à-dire l'aptitude de fixer l'eau (entoure les micelles ou y pénètre).

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, Ca,... Signalons en outre, que l'argile peut également fixer des ions négatifs par l'intermédiaire des hydroxydes d'Al ou de Fe ou par l'intermédiaire des charges positives qu'elle porte (voir cours de géologie).



**Figure 3 :** Les deux états de l'argile : flocculé ou dispersé

L'argile peut être à **l'état dispersé ou flocculé** (figure 3) :

- à **l'état dispersé** : l'argile dispersée 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 asphyxiante pour les racines.
- à **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 la vie des racines et de la microflore du sol.

## ***2. LES SESQUIOXYDES***

Ce sont les oxydes et hydroxydes de fer et d'alumine. Au début de leur formation, ils sont amorphes, mais évoluent rapidement vers des formes cristallisées. Ils proviennent de l'altération des minéraux silicatés.

Ce sont des colloïdes positifs et jouent un rôle dans la capacité de fixation anionique du sol.

## ***3. LA SILICE***

L'altération des minéraux silicatés peut libérer de la silice colloïdale se présentant sous forme de gel. Sous cet état, la silice est un colloïde négatif.

## **DEUXIEME PARTIE : LA MATIERE ORGANIQUE**

### **1. GENERALITES**

La transformation par décomposition des débris organiques (d'origine végétale ou animale) abandonnés sur le sol ou enfouis dans le sol conduit à l'apparition de matières humiques.

L'ensemble de la matière organique des sols comporte donc :

- des produits frais ou peu évolués (peu transformés) : ce sont **les matières organiques fraîches** ( M.O.F. ).
- des produits évolués : ce sont **les matières humiques** ( M.H. ). Elles constituent l'humus au sens strict du terme.

L'ensemble ( M.O.F. et M.H. ) constitue **l'humus au sens large** ( Mull, Moder, Mor ).

L'**humification** est le terme servant à désigner la transformation de la M.O.F. en M.H. dans des conditions écologiques « normales », c'est-à-dire d'aération et de richesse chimique suffisante. En conditions anaérobies, il y a **putréfaction** ou **tourbification**.

La **minéralisation** concerne l'ultime phase de la transformation des substances organiques. Elle se traduit par la libération dans l'atmosphère et le sol de produits minéraux tels l'eau, le gaz carbonique, acide nitrique, ammoniac, sels minéraux solubles ( $K^+$ , ...).

### **2. LES MATIERES ORGANIQUES GENERATRICES D'HUMUS**

Les substances végétales interviennent pour la presque totalité (99 %) dans l'élaboration de l'humus.

La matière organique fraîche se compose :

- de sucres, d'amidons et d'autres hydrates de carbone solubles dans l'eau ;
- d'hémicelluloses ;
- de cellulose, polysaccharide provenant de la condensation de molécules de glucose ;
- de lignines, qui sont des produits de condensation de polyphénols ;
- de tanins ;
- de graisses, de cires, d'huiles,...
- de protéines et dérivés ;
- de constituants minéraux (cendres) : P, S, K, Ca,...

Pour fixer les idées sur l'importance des quantités de matières organiques fraîches arrivant au sol en forêt, les deux tableaux ci-dessous livrent quelques chiffres intéressants :

<b>Quantités de matières végétales retournées au sol (en tonnes/ha/ an de matières sèches)</b>	
Forêts feuillue tempérée	3-9 t/ha/an
Forêts résineuses tempérées	3-6 t/ha/an
Forêt subtropicale	20 t/ha/an
Forêt équatoriale	25 t/ha/an

<b>Composition moyenne de la retombée en forêt ardennaise (hêtraie-chênaie)</b>	
Feuilles	75 %
Brindilles	10 %
Fruits	10 %
Ecailles de bourgeons	4 %
Fleurs	1 %

La composition quantitative des matières organiques végétales oscille entre les limites suivantes :

Cellulose : 20 à 50 %  
 hémicelluloses : 10 à 28 %  
 lignines : 10 à 30 %  
 tanins : 1 à 8 %  
 protéines : 1 à 15 %  
 cendres : 1 à 6 %

Certaines matières organiques sont faciles à décomposer et servent surtout d'aliments énergétiques et plastiques aux micro-organismes (bactéries,...) et disparaîtront très vite : ce sont les sucres, la cellulose, les hémicelluloses, etc.

D'autres seront attaquées plus lentement et moins complètement, laissant d'important résidus : ce sont la lignine, les matières grasses, les résines, les tannins, etc.

A ce titre, le tableau ci-dessous établit une comparaison entre la composition des tissus végétaux et celle de l'humus :

	<b>Tissus végétaux ( % de la matière sèche )</b>	<b>Humus %</b>
<b>Cellulose</b>	20 à 50	2 à 10
<b>Hémicellulose</b>	10 à 28	2 à 20
<b>Lignine</b>	10 à 30	35 à 55
<b>Protéines et matières aminées</b>	1 à 15	15 à 45
<b>Divers : graisses, tanins, cires.</b>	1 à 8	1 à 8

### 3. LES AGENTS DE L'HUMIFICATION :

La flore du sol (bactéries, champignons) et la pédofaune, fragmentent et transforment les résidus végétaux et animaux. Agents de l'humification, ils interviennent tour à tour dans un réseau trophique complexe et encore peu connu jusqu'à nos jours.

Le tableau ci-dessous donne une idée de la répartition des organismes édaphiques en nombre (Coyne M., 1999 in Calvet R, 2003.).

Organismes	Nombre par litre de sol
Protozoaires	$1,0 \cdot 10^9$
Nématodes	$3 \cdot 10^4$
Acariens	$2,0 \cdot 10^3$
Lombricides	2
Collemboles	$1,0 \cdot 10^3$
Arthropodes (dont insectes), Myriapodes	100

Les uns (lombrics, enchytraeides, myriapodes) fragmentent les débris végétaux, lesquels sont ensuite transformés par les bactéries.

D'autres animaux (acariens, collemboles) ne fragmentent que les débris « prédigérés » par la microflore.

Nous nous bornerons dans ce qui suit à donner quelques indications sommaires sur les rôles de la faune et de la microflore du sol.

#### A. La microflore du sol :

##### a) Les algues :

Les algues autotrophes (possèdent de la chlorophylle) abondent surtout dans les deux premiers centimètres du sol. Certaines espèces sont cependant hétérotrophes et vivent dans des couches plus profondes, dégradant les matières organiques.

Les algues fabriquent un mucilage qui les entoure et qui **héberge de nombreuses bactéries.**

##### b) Les bactéries :

Leur rôle est très important dans les processus d'humification. Du point de vue pédologique, une des principales distinctions à faire entre bactéries est leur répartition entre organismes aérobies et anaérobies.

Les **bactéries aérobies** interviennent de manière prépondérante dans l'**humification** proprement dite. On ne peut cependant exclure l'activité des bactéries anaérobies durant les périodes humides de l'année ou dans les microsites mal aérés d'un sol « normal ».

Les **bactéries anaérobies** interviennent surtout dans les processus de **tourbification** et de **putréfaction.**

Les bactéries aérobies prolifèrent dans les milieux les plus riches en azote, et peu acides ; elles sont surtout abondantes autour des racines de certaines plantes (graminées, légumineuses), au sein de la Rhizosphère. La plupart d'entre elles sont **hétérotrophes** et saprophytes, **elles décomposent les celluloses, les sucres**, qui constituent des sources d'énergie, et sont pour la plus grande part, minéralisées sous forme de gaz carbonique. Certaines bactéries, plus spécialisées, sont **autotrophes** : elles tirent leur énergie de l'oxydation de certains composés (soufre, ammoniac, fer ferreux ,...) et assimilent le carbone du CO<sub>2</sub>.

Comme nous le verrons dans les prochains chapitres, **les bactéries jouent un rôle important dans le cycle des éléments fondamentaux du sol** : N, S, Fe, Mn.

#### c) Actinomycètes :

Intermédiaires entre bactéries et champignons, les actinomycètes jouent un rôle important dans la décomposition des litières d'une part, dans l'humification d'autre part. Ils semblent jouer un grand rôle dans la transformation de certains composés organiques et minéraux du sol, mais ce rôle est encore mal connu : ils seraient susceptibles de décomposer les composés de la M.O.F. tels que la lignine et certains tannins, et d'élaborer certains acides humiques.

Les actinomycètes ont aussi d'autres fonctions : certaines espèces, en particulier *Frankia alni*, forment des nodosités avec les racines des aulnes, et sont à l'origine d'une fixation active d'azote atmosphérique qui explique le rôle améliorant de cette espèce.

#### d) Champignons :

Ils résistent mieux que les bactéries à la sécheresse et à l'acidité, et constituent la microflore quasi exclusive de certains sols secs et acides. Mais à la différence des bactéries, ils sont toujours hétérotrophes et aérobies; et ne prolifèrent pas dans les milieux mal aérés.

Leur rôle dans le sol est considérable et très varié : il exerce surtout dans la phase de **décomposition de la M.O.F.**, qui précède l'humification : **la plupart sont aptes à décomposer la cellulose, certains sont capables de décomposer des composés phénoliques plus résistants tels que la lignine et les tannins.**

Les **pourritures brunes** ou molles décomposent les celluloses préférentiellement aux composés phénoliques : la lignine, libérée est peu transformée. Les **pourritures blanches**, au contraire, s'attaquent à la lignine et aux tannins, libérant des composés phénoliques, à petites molécules, donc solubles (appelés souvent « précurseurs » des composés humiques).

Certains champignons sont associés aux racines des plantes et des arbres, en formant des **mycorhizes**, à vie symbiotique, qui facilitent la croissance et la nutrition des espèces concernées (voir cours de Botanique de deuxième année).

## **B. La faune du sol :**

Elle est divisée suivant la taille des organismes, en micro-, méso- et macrofaune (figure 4) :

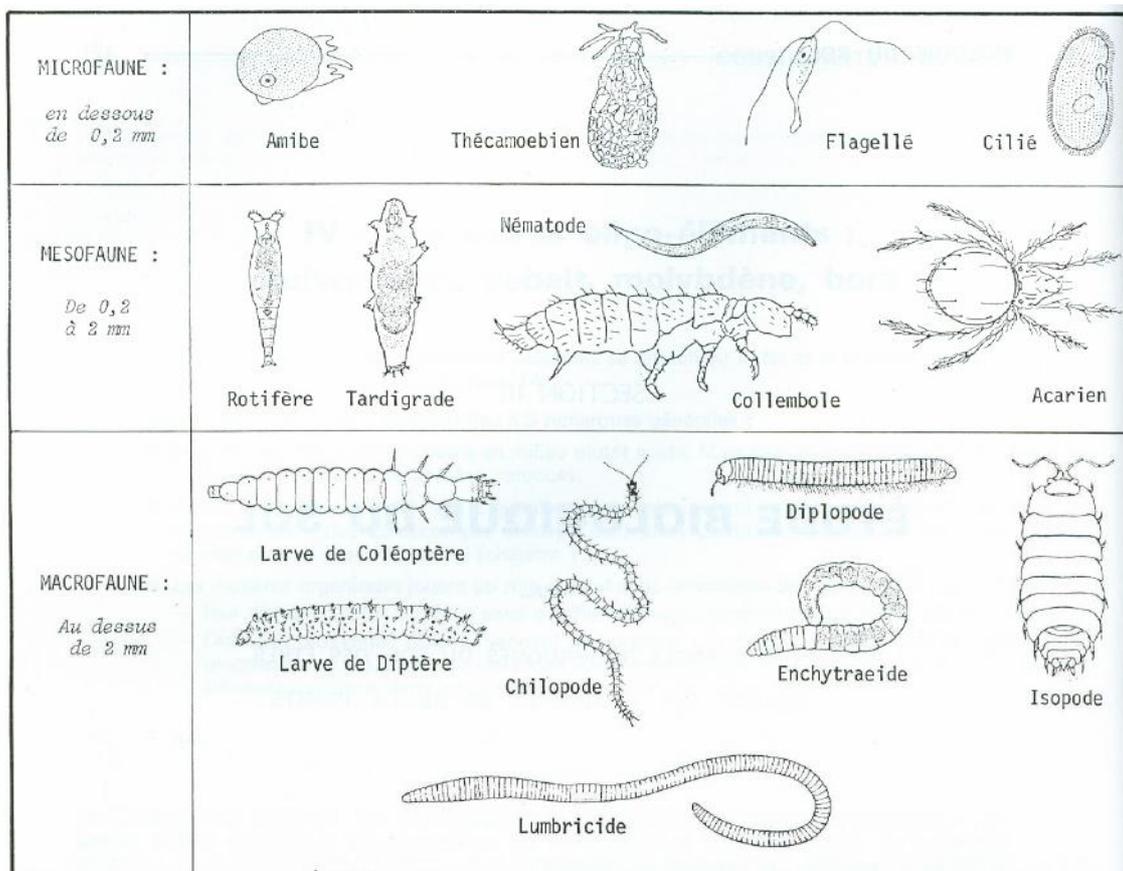
**Microfaune ( moins de 0,2 mm ) :** constituée essentiellement de protozoaires et de nématodes : ils sont abondants dans les milieux très humides et s'attaquent à la flore bactérienne et aux actinomycètes.

**Mésafaune ( 0,2 mm à 2-4mm ) :** Acariens et Collemboles qui caractérisent surtout les milieux acides. On y trouve aussi des nématodes.

**Macrofaune ( taille supérieure à 2-4 mm ) :** on y trouve :

- les lombrics qui jouent un rôle essentiel dans la structuration des horizons A des mull actifs et peu acides.
- les enchytraéides, qui caractérisent surtout les milieux acides.
- les larves d'insectes (diptères, coléoptères) : plus abondants dans les milieux acides et secs (moder).

**Mégafaune :** mammifères (taupes, mulots,...).



**Figure 4 :** La faune du sol (tiré de Soltner, 1992)

Voyons en quelques mots le rôle des représentants les plus importants de la faune du sol :

a) Protozoaires :

Ces organismes sont très nombreux dans le sol. Leur pullulation exige l'existence d'un haut degré d'humidité. Ils s'enkystent par sécheresse. Ils se nourrissent surtout de bactéries. A ce titre, ils jouent un rôle important dans la composition et les activités microbiologiques du sol.

b) Nématodes ( Vers inférieurs, embranchement des Némathelminthes ) :

Ce sont des petits vers ronds de taille variant entre 0,5 et 2 mm. Ils sont nombreux dans le sol et dans les litières : après les protozoaires, ce sont les plus abondants colonisateurs du sol.

Ils s'enkystent dès que l'humidité du sol devient insuffisante.

On distingue parmi les nématodes plusieurs espèces se différenciant par leur mode d'alimentation, on distingue en effet des espèces :

- parasites de végétaux (problèmes bien connus en agriculture et en horticulture) ;
- saprophages : interviennent dans la décomposition des débris végétaux et animaux ;
- prédateurs : se nourrissent de protozoaires ;
- bactériophages ;
- mycétophages : se nourrissent de mycéliums.

Les nématodes bactériophages et mycétophages exercent donc un certain contrôle sur la microflore.

c) Mollusques :

Un certain nombre de gastéropodes pulmoné (limaces et escargots) vivent dans les litières forestières ou dans les anfractuosités du sol, toujours en milieu humide. Beaucoup sont herbivores ou saprophages. Ils exercent une certaine activité de décomposition (cellulose) et de brassage de la matière organique.

d) Les Annélidés (embranchement) :

Ce sont des agents très actifs d'humification, surtout en ce qui concerne certaines familles appartenant à la classe des Oligochètes.

♠Les Enchytraéides : Ce sont des vers minuscules (de 5 à 15 mm), de couleur généralement blanchâtre et abondants dans les litières. Ils se nourrissent essentiellement de petits débris végétaux peu décomposés. Ces vers sont les principaux agents d'humification dans les milieux forestiers acides (moder ou mor).

Leurs déjections sont à l'origine de la formation des boulettes fécales constituant l'horizon OH. Ils ne forment que peu de complexes organo-minéraux (car ils ne possèdent pas de gésier comme les lombrics) : on aura alors dans l'horizon de transition caractérisant les moder, qu'une simple juxtaposition entre matière organique et matière minérale (mélange entre ces deux types de matières mais peu ou pas de liaisons).

▲ Les Lombricidés (figure 5) : Ils réagissent rapidement aux modifications du milieu. Leur présence est donc un excellent reflet des conditions écologiques.

En effet, les conditions favorables à leur développement sont :

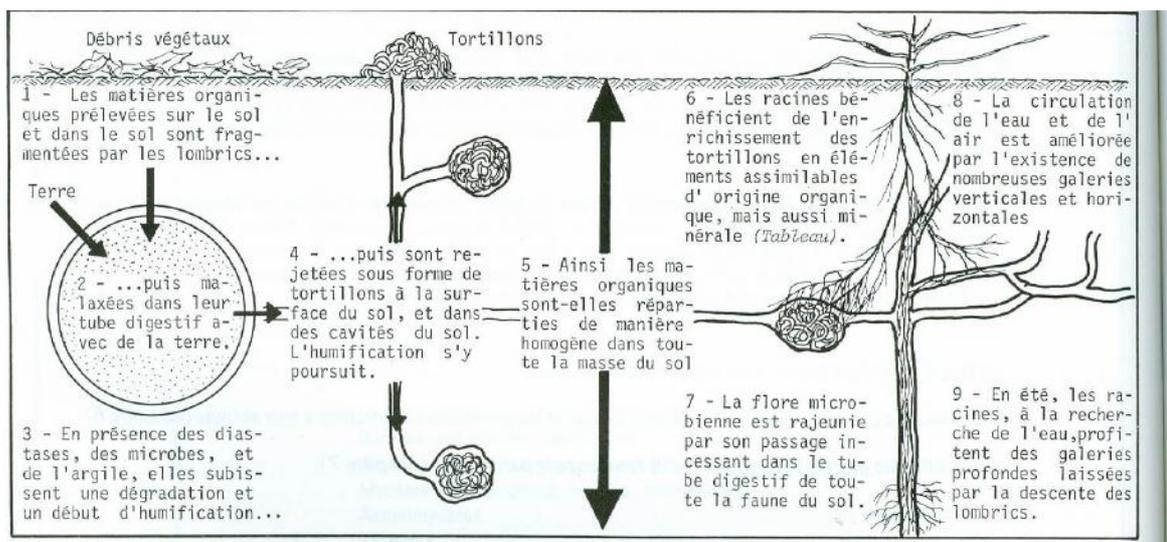
- une humidité modérée ;
- une bonne aération ;
- un PH voisin de 6-7.

Les lombrics jouent un rôle essentiel dans la structuration des horizons A des mull actifs et peu acides. Ils décomposent la litière (ils sont saprophages et coprophages) et l'incorporent au sol minéral. Par leur transit digestif, ils facilitent la formation de complexes organo-minéraux (liens entre argile et humus notamment) et assurent leur cohésion. Les lombrics sont donc importants pour la structure du sol (grumeleuse).

Les lombrics ont besoin de calcium pour le fonctionnement de leur glandes, ils ne peuvent donc vivre dans les milieux à PH trop acides (PH inférieur à 4,2).

Certains d'entre-eux (dits anectiques) descendent profondément dans les horizons minéraux et ramènent en surface une partie des argiles et des ions ( $Ca^{++}$ , ... ) entraînés.

Par ailleurs, par leurs galeries, les lombrics assurent une bonne aération du sol.



**Figure 5 :** Les rôles des Lombricides dans le sol (tiré de Soltner, 1992)

### e) Les Arthropodes :

On regroupe ici les insectes, les arachnides, les crustacés (cloportes,...) et les myriapodes (voir planches d'illustrations en annexe).

Ils peuvent être assez nombreux dans les sols. Ils vivent surtout dans les litières qu'ils fragmentent et ingèrent. Ils produisent des boulettes fécales.

Certaines espèces se nourrissent également de champignons (mycétophages), de bactéries et d'algues (microphytophages), de déjections animales (coprophages), de proies vivantes (prédateurs ou parasites).

Contrairement aux vers de terre, ils ne mélangent pas à la terre minérale les aliments qu'ils ingèrent. En revanche, ils fragmentent ceux-ci plus finement, augmentant ainsi la surface d'attaque pour l'action des champignons et bactéries.

Les larves d'insectes et d'arthropodes supérieurs sont plus abondantes dans les milieux acides et secs (moder).

f) Les Mammifères : taupes, mulots, etc. Ils ont un rôle mécanique.

## **SYNTHESE SUR LES ROLES DE LA FAUNE DU SOL :**

### **a) Action mécanique : formation d'agrégats stables et amélioration de la porosité**

La faune du sol **fragmente les matières organiques** : à la division sommaire des vers de terre, succède le broyage microscopique des myriapodes puis des collemboles, des acariens et des nématodes. L'augmentation de surface qui en résulte favorise l'attaque bactérienne et enzymatique.

Puis le **brassage** énergique que subissent ces fragments dans le tube digestif des lombrics, les mélange aux éléments minéraux et aux micro-organismes qui y trouvent des conditions favorables à leur prolifération. **Ce malaxage par les vers de terre contribue profondément à la construction d'agrégats stables.**

En effet, ces animaux mettent parfaitement en contact d'une part la terre qu'ils ingèrent, d'autre part les substances organiques qui la cimenteront en agrégats ou les débris végétaux qui donneront naissance à ces substances. Il suffit d'ailleurs pour s'en convaincre d'observer la résistance à la dégradation des tortillons des lombrics.

Ce malaxage s'accompagne aussi **d'un transport des matières organiques dans tout le profil**. Plus que tout travail mécanique du sol par les instruments de culture, celui des vers de terre permet la dissémination parfaite des matières organiques.

A **l'augmentation de porosité** qui résulte de cette formation d'agrégats, s'ajoute la **meilleure circulation de l'eau et de l'air** au travers des galeries verticales des lombrics.

### **b) Action chimique : lutte contre le lessivage et enrichissement en minéraux assimilables**

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

Mais le plus important encore semble leur rôle d'intermédiaire entre le sol et la plante : leurs déjections en effet sont considérablement plus riches en potassium, phosphore et magnésium assimilables. On peut penser que cet enrichissement vient de l'attaque de minéraux par les enzymes digestifs, et de la décomposition des matières organiques incorporées.

### **c ) Une action biologique : stimulation de la flore microbienne des sols.**

Tous les animaux du sol sont microphytophages, c'est-à-dire consomment des bactéries, algues et champignons. Agissant ainsi, ils opèrent une sélection qui rajeunit et stimule la flore microbienne. Ce rôle semble indispensable à l'humification : on remarque que les matières organiques contenues dans les déjections des animaux du sol s'humifient plus facilement que les autres débris végétaux : leur passage dans le tube digestif semble avoir fait proliférer une flore humifiante, et éliminer une flore destructrice des matières organiques.

### **d) Place de la faune au sein de la dynamique forestière :**

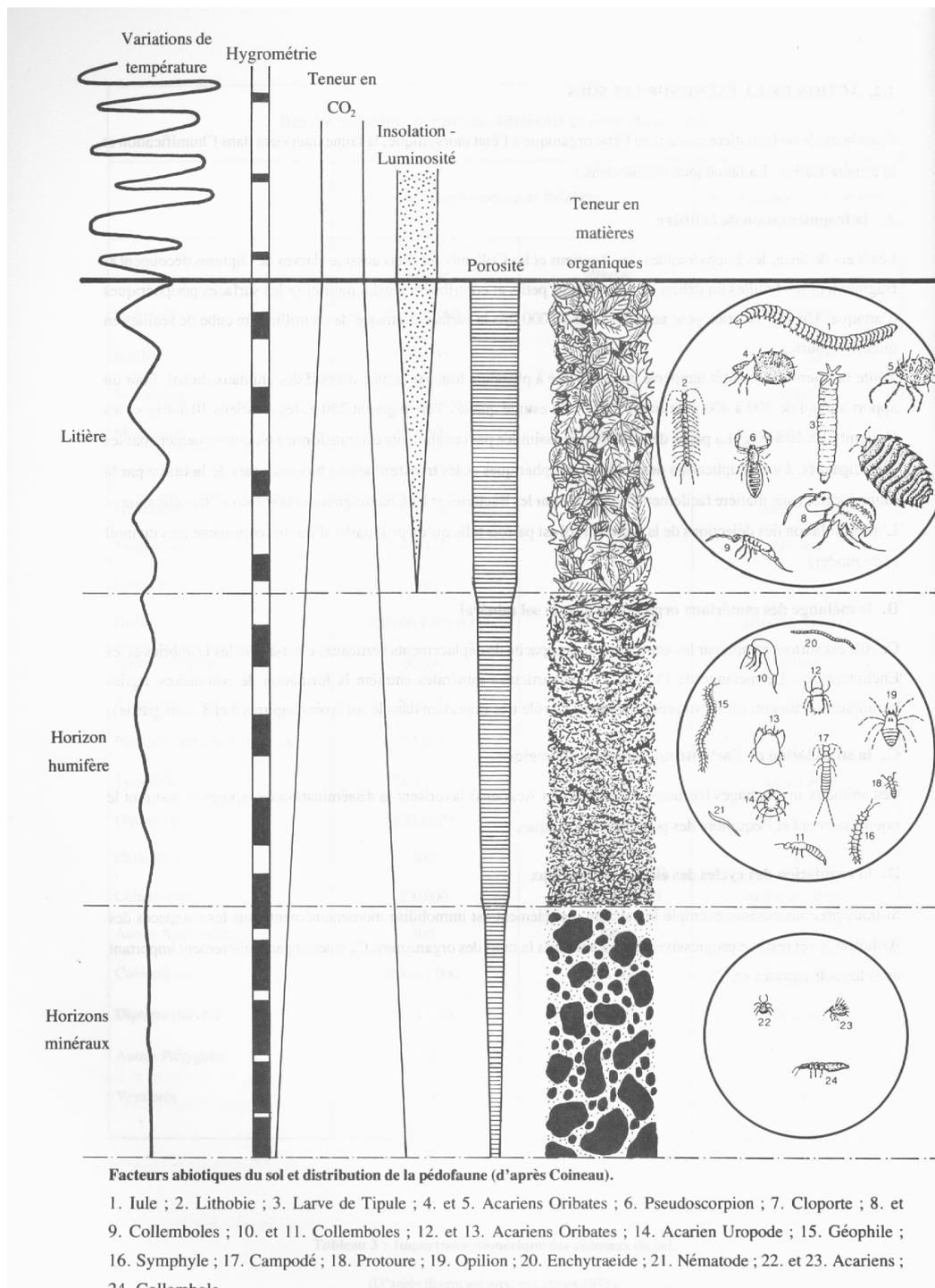
La formation de l'humus dépend essentiellement de l'activité animale, même si climat, microflore, végétation et sol interviennent en amont. Les conséquences pour le renouvellement naturel de la forêt (régénération naturelle) peuvent être importantes : l'installation du jeune semis peut avoir lieu ou pas, selon les conditions édaphiques présentes dans l'entourage de la jeune racine au moment de la germination, parallèlement aux autres exigences de la plantes (climatiques, hydriques, etc ). La croissance des arbres est également affectée par l'activité animale du sol, via la formation de l'humus. Malgré cette importance de la faune du sol, il convient d'admettre que l'étude de ses effets directs sur les racines, nutritionnels ou autres (toxicité) n'ont pratiquement pas été étudiés jusqu'à ce jour.

Enfin, pour terminer ce paragraphe sur la faune du sol, nous dirons quelques mots dans les lignes qui suivent sur la répartition des groupes d'animaux dans les différents types d'humus.

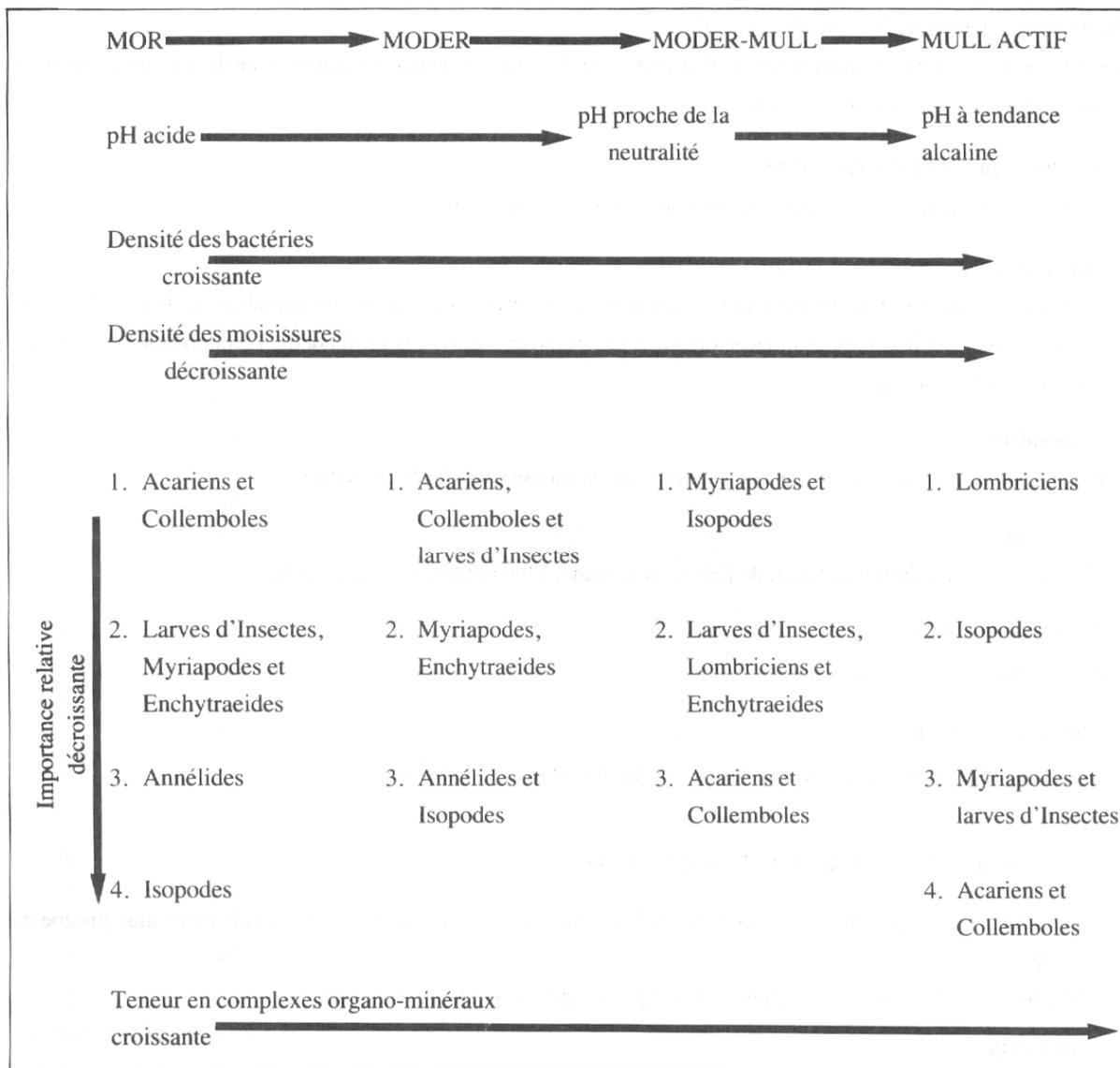
Comme le montre les figures 6 et 7, l'abondance des groupes et leur diversité dépend de la profondeur à laquelle on se situe dans le sol, mais aussi de la qualité de l'humus. LEBRUN (1971) a montré que dans les mull, la répartition des différents groupes d'animaux était très équilibrée, chaque espèce étant représentée par un petit nombre d'individus (la chaîne trophique est complexe mais stable), alors que dans les moder, la variété était faible, mais la densité forte ( la chaîne trophique est simple mais fragile et instable ).

Ceci est conforme aux lois générales de la biocénologie (Thienemann ( 1920 ), Franz (1973 ), Berthelin et Toutain ( 1979 ) ) et qui disent en résumé que :

- plus les conditions de vie sont variables dans un milieu biologique, plus grand est le nombre d'espèces de la communauté vivante qui le caractérise.
- plus les conditions de vie d'un biotope s'écarte des conditions optimales de la plupart des animaux, plus la biocénose devient pauvre en espèces, plus elle devient caractéristique et plus la densité des quelques espèces présentes s'élève.
- plus les conditions de milieu sont favorables, plus la communauté est riche en espèces et plus elle est équilibrée et stable.



**Figure 6 :** Facteurs abiotiques du sol et distribution de la pédofaune (COINEAU Y., 1974)

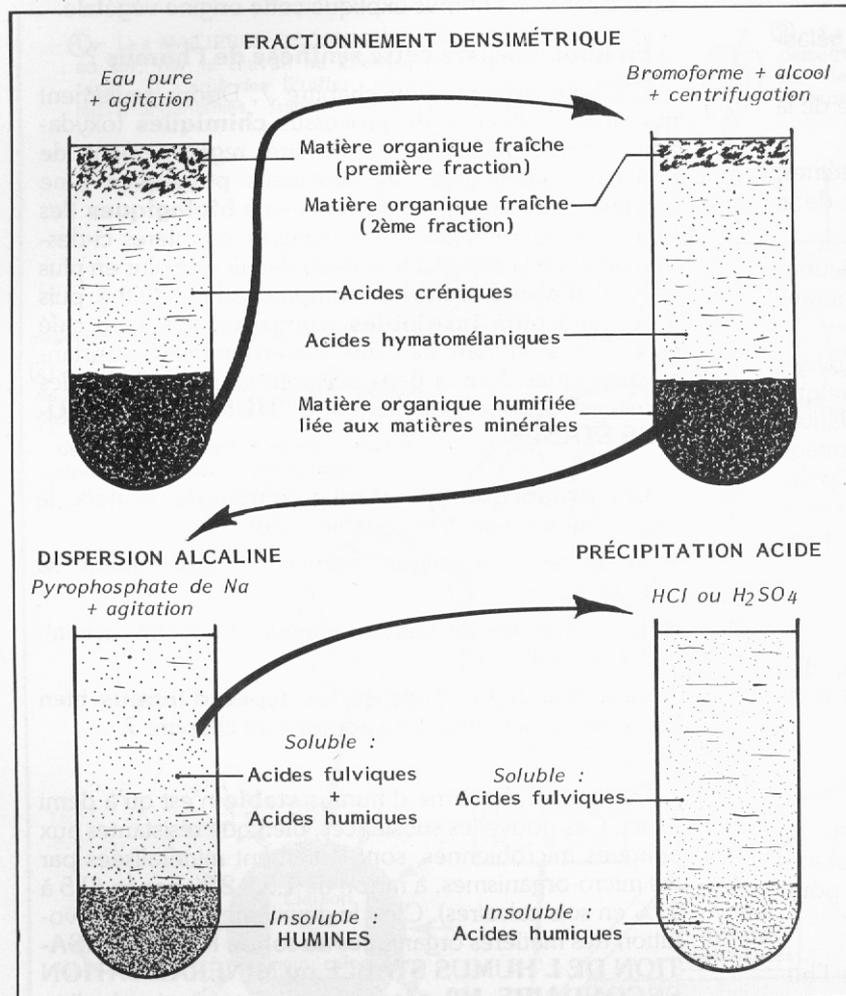


**Figure 7:** Relations entre la composition de la pédofaune et divers types d'humus forestiers

## 4. COMPOSITION DE L'HUMUS :

### A) Les différentes fractions de l'humus :

Une méthode permettant d'analyser la composition des substances organiques constituant l'humus, consiste à réaliser un fractionnement chimique par solubilisation différentielle dans des réactifs divers. Cette méthode est illustrée dans la figure 8.



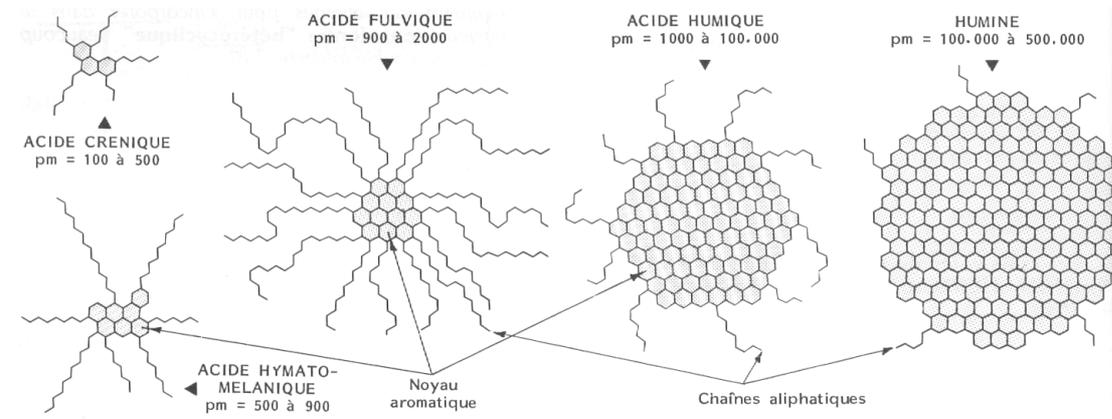
**Figure 8 :** Les différents composés humiques : extractions par différence de densité et par solubilisation dans différents solvants (tiré de Soltner, 1992)

Par différence de densité, d'abord dans l'eau, puis dans un mélange alcool + bromoforme (densité 1,8), on sépare la matière organique fraîche de la matière humique.

Par une série de solvants, on isole ensuite les différentes fractions de l'humus :

- les **acides créniques** : solubles dans l'eau ;
- les **acides hymatomélaniques** : solubles dans l'alcool ;
- les **acides fulviques** : solubles dans le pyrophosphate de Na ainsi que dans les acides HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- les **acides humiques** : solubles dans le pyrophosphate de Na mais insolubles dans les acides HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- l'**humine** : insoluble dans tous les solvants.

Tous ces constituants humiques se distinguent par leur degré de polymérisation, c'est-à-dire la grosseur de leur molécule. Celle-ci augmente depuis les acides créniques vers les humines (figure 9).



**Figure 9 :** Les composés humiques (tiré de Soltner, 1992)

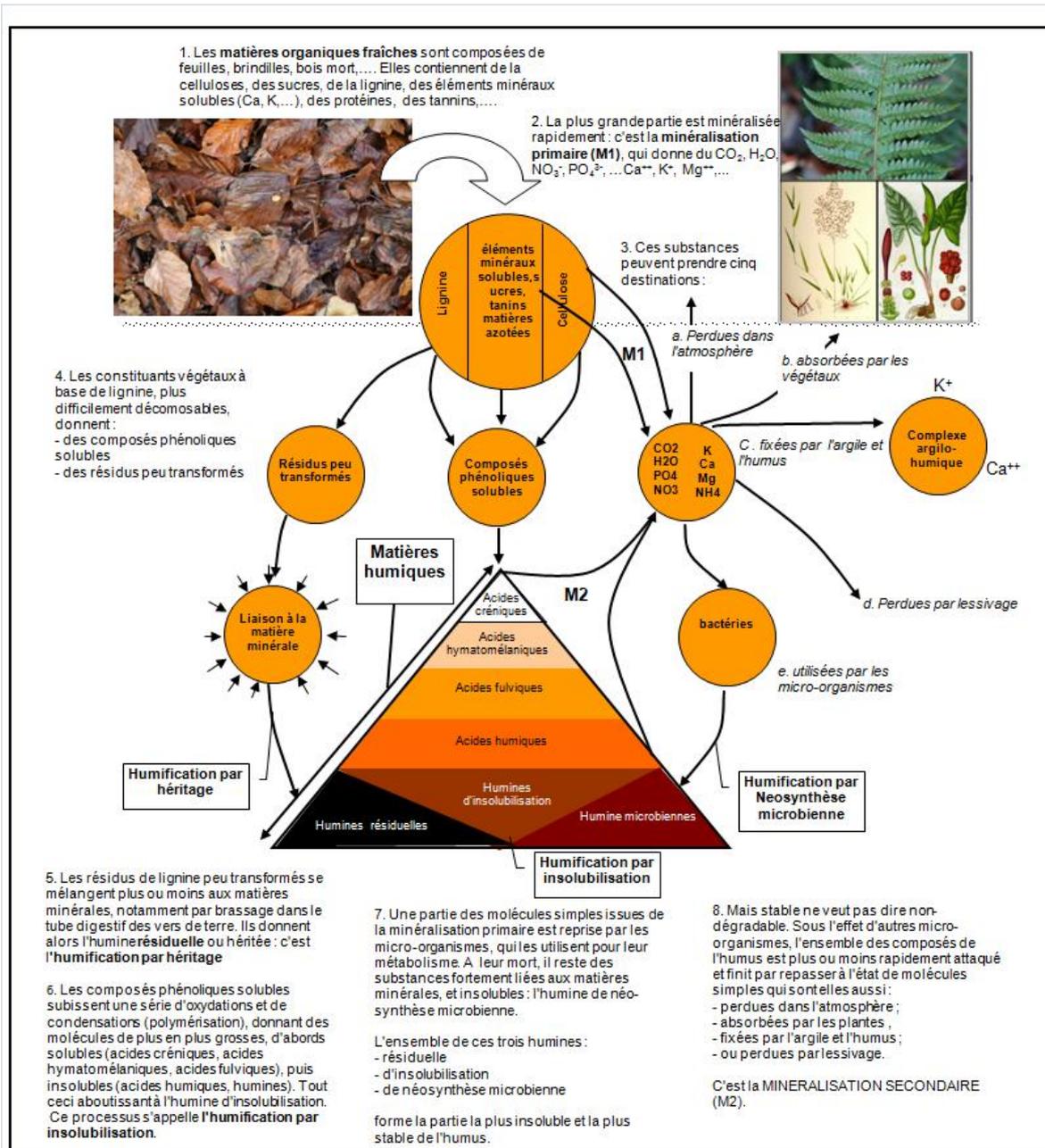
Nous expliquerons par la suite comment se forment ces molécules. Disons seulement dès à présent que les éléments de base servant à la synthèse de l'humus sont des molécules assez semblables à noyau aromatique (phénolique ou quinonique).

## **B) Evolution générale des matières organiques dans le sol : de la M.O.F. aux substances humiques.**

Nous avons vu précédemment que la matière organique fraîche est composée de diverses substances qui diffèrent par leur vitesse de décomposition : Certaines, faciles à décomposer, serviront surtout d'aliments énergétiques et plastiques aux bactéries, et disparaîtront très vite, avec production importante de CO<sub>2</sub> et d'eau, d'énergie et de corps microbiens : ce sont les sucres, la cellulose et les protéines. D'autres au contraire seront attaquées plus lentement et moins complètement, laissant d'importants résidus : il s'agit de la lignine, des matières grasses, des résines, des tannins, etc.

Sitôt leur arrivée au sol, ces substances sont attaquées par des animaux (vers, insectes, protozoaires,...) et par la microflore qui leur font parcourir toute une série de décompositions et transformations successives (figure 10)

La plus grande partie de la M.O.F. se décompose et se minéralise rapidement : c'est la **minéralisation primaire** qui donne des **molécules simples** : CO<sub>2</sub>, eau, nitrates, phosphates, sulfates, etc.



**Figure 10 :** Evolution générale des matières organiques dans le sol (tiré et modifié de Soltner, 1992)

Ces molécules simples peuvent ensuite prendre cinq destinations :

- perdues dans l'atmosphère ;
- absorbées par les plantes ;
- fixées par l'argile et l'humus (colloïdes négatifs) ;
- perdues par lessivage ;
- reprises par des micro-organismes.

Les constituants végétaux ne subissant pas la minéralisation primaire peuvent donner :

- des composés phénoliques solubles ;
- des résidus peu transformés (cas des constituants riches en lignine).

Ensuite, on arrive à **l'étape de l'humification** c'est-à-dire de l'élaboration des différentes matières humiques. Les matières premières de la synthèse de l'humus sont :

- des résidus de lignine plus ou moins transformée par oxydation ;
- des composés phénoliques solubles, issus de la décomposition de la lignine, de la cellulose et des sucres solubles ;
- des matières azotées (protéines, acides aminés, ammoniac) ;
- des éléments minéraux qui se lient aux molécules des constituants humiques.

Parmi les composés humiques formés lors de l'humification, on distingue plusieurs types d'humines :

♠ **L'humine d'insolubilisation** : elle se forme à partir de molécules semblables qui s'associent les une aux autres. Ces unités de base, les composés phénoliques solubles ont la propriété :

- de se souder les uns aux autres pour constituer un noyau de plus en plus gros ;
- de fixer à la périphérie de ce noyau des chaînes carbonées allongées dites « chaînes aliphatiques ».

Ainsi on peut représenter sous forme d'une pyramide les composés humiques qui se forment des plus solubles, simples et à faible poids moléculaire (les acides créniques) au plus insolubles, complexes et à poids moléculaire élevé (humine).

L'humine qui se forme par polymérisation ou polycondensation est appelée humine d'insolubilisation.

♠ **L'humine par héritage** : l'humification par héritage consiste en une conservation intacte de molécules complexes de lignine peu ou pas transformées. Ces résidus donnent alors l'humine résiduelle ou héritée.

♠ **L'humine microbienne** : l'humification par néosynthèse microbienne, par laquelle certains microbes ont la faculté de synthétiser, à partir de molécules très simples libérées par la décomposition et la minéralisation des M.O.F. , donne des substances complexes appelées « humines microbiennes ».

L'ensemble de ces trois humines (résiduelle, d'insolubilisation et de néosynthèse microbienne) forme la partie la plus insoluble et la plus stable de l'humus : l'humine. Cependant, le terme d'humus stable n'est qu'à demi-exact. ces nouvelles substances, bien que résistantes aux attaques microbiennes, sont lentement minéralisées par les micro-organismes à raison de 1,5 à 2 % par an ( 0,5 à 1 % en sol calcaire ). Cette minéralisation de l'humus s'appelle la **minéralisation secondaire**, qui est un processus très lent mais régulier.

## c) Propriétés générales des différents composés humiques :

### 1. Les acides humiques :

Ce sont de gros édifices moléculaires constitués par un noyau grossièrement sphérique composé de cycles phénols et quinones entourés de chaînes périphériques aliphatiques. Ce noyau relativement dense, provenant de la condensation de composés phénoliques, est bien développé dans les acides humiques bruns et atteint une taille maximum dans les acides humiques gris.

Les acides humiques bruns sont peu colorés, à molécule de taille moyenne et peu condensés. Ils se lient difficilement avec l'argile pour former des complexes argilo-humiques peu stables et flocculent lentement par le calcium à concentration élevée.

Les acides humiques gris sont très foncés, à grosse molécule, très condensés et forment avec l'argile un complexe argilo-humique très stable. Ils flocculent aisément par le calcium à faible concentration.

### 2. Les acides fulviques :

Sous ce terme, on range conventionnellement toute une catégorie de substances solubles ou peptisables dans l'eau ou dans les réactifs utilisés pour le fractionnement de l'humus et non flocculables par l'ion  $H^+$ .

Ils peuvent comprendre des acides organiques, des polysaccharides, des dérivés phénoliques, des acides aminés, etc.

Les acides fulviques possèdent un noyau de faible dimension mais les chaînes aliphatiques sont très développées.

Leur comportement dans le sol diffère selon les conditions du milieu qui en règle également la composition.

- En conditions défavorables et spécialement en milieu très acide (mor), les acides fulviques sont très acides, agressifs, mobiles, capables de se complexer (se lier) aux sesquioxydes (Fer ou Aluminium) dont ils provoquent la migration (voir processus de podzolisation au chapitre VI).
- En milieu moins défavorable, la propriété de former des complexes mobiles avec les sesquioxydes tend à disparaître. Il y a flocculation réciproque (polycondensation). Par contre, ils exercent une influence notable sur la migration des argiles (lessivage : voir chapitre VI).
- En conditions favorables, la production d'acides fulviques peut demeurer considérable. Mais en général, ils évoluent rapidement soit par condensation pour donner naissance aux

gros édifices humiques, soit par liaison aux acides humiques déjà formés, soit par biodégradation rapide.

### 3. Les humines :

Sous ce terme, se rangent un groupe complexe de substances humiques fortement évoluées qui résistent aux réactifs de solubilisation ou de peptisation de l'humus.

Il existe deux raisons principales pour lesquelles une matière humique devient peu attaquable aux réactifs :

- fort degré de condensation ;
- liaisons énergiques avec les colloïdes minéraux.

L'humine qui représente 50 à 70 % de la matière organique totale se divise en :

- **humine héritée** : proche de la M.O.F. est constituée de lignine peu transformée incorporée au sol par action mécanique et ne réalise avec l'argile que des liaisons peu stables.
- **humine d'insolubilisation** : provient de la précipitation irréversible de précurseurs solubles. Elle réalise avec l'argile des liaisons stables.
- **humine microbienne** : résulte d'une néoformation par les micro-organismes du sol dans des milieux biologiquement actifs. Elle forme avec l'argile des complexes stables mais labiles (qui ne dure pas longtemps) qui se détruisent par biodégradation de l'humus (minéralisation rapide).

## **5. LES PHASES DE L'HUMIFICATION**

La distinction entre différentes phases d'humification est conventionnelle pour une large part. Des processus très divers interviennent, qu'il n'est pas possible de distinguer l'un de l'autre d'une manière rigide, ni dans le temps, ni dans l'espace. Toutefois, pour les nécessités de l'exposé, on peut envisager les phases suivantes :

### **A ) Phase du lessivage physique :**

Les débris organiques non encore décomposés ( M.O.F. ) sont privés par simple solubilisation dans l'eau ( pluie ) de composés aisément mobilisables tels que les sucres, les sels minéraux ( Na , K,... ), des acides aminés, des composés phénoliques solubles, etc.

### **B ) Phase de désagrégation physique :**

Principalement sous l'action de la faune du sol, les débris organiques sont fragmentés, désagrégés, pulvérisés. La surface d'attaque microbienne est considérablement augmentée (jusqu'à 3000 ou 4000 fois ).

### **C ) Phase de la biodégradation ou bioréduction :**

Il s'agit d'une phase essentiellement microbienne. Il y a aussi action des enzymes digestifs des animaux.

On observe des processus de cellulolyse, hémicellulolyse, protéolyse et lignolyse.

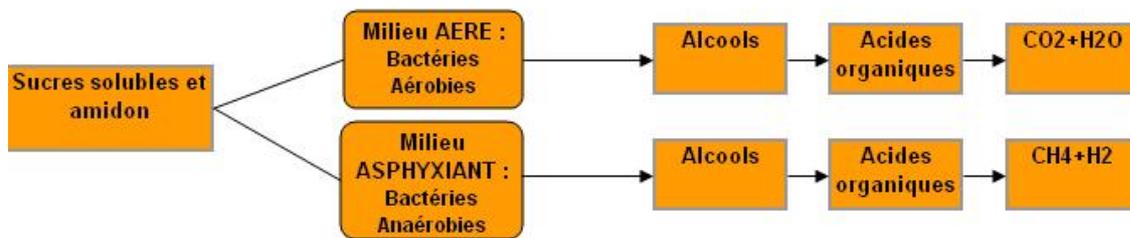
Cette phase se caractérise par des processus biologiques de décomposition dont les principaux sont :

#### **a) Décomposition des sucres solubles et de l'amidon :**

Attaqués les premiers, ils sont une source d'énergie très accessible aux micro-organismes qui les oxydent rapidement :

- En milieu aéré, les levures et les bactéries leur font subir des fermentations alcooliques avec production d'alcools et d'acides, et dégagement de gaz carbonique.
- En milieu anaérobie, ils sont décomposés jusqu'à la transformation en méthane et en hydrogène gazeux.

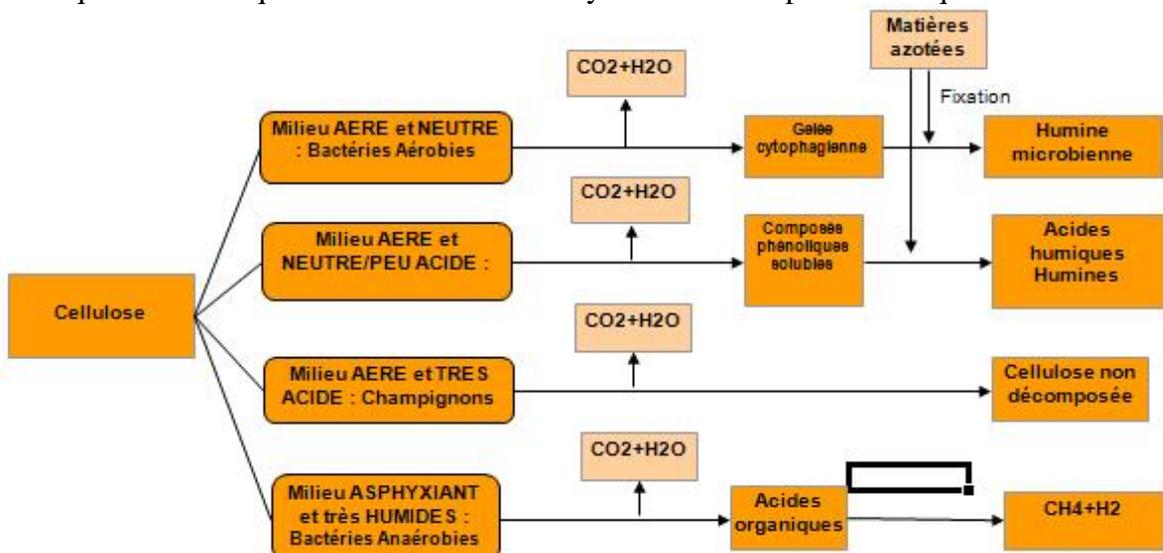
Cette première dégradation active énormément la vie microbienne et provoque la multiplication des bactéries qui vont s'attaquer aux hémicelluloses et celluloses.



**b ) Décomposition de la cellulose :**

Cette attaque est très sensible à la richesse en azote et en calcium du milieu, ainsi qu'à son oxygénation :

- ♠ En milieu aéré mais très acide, seuls certains champignons acidiphiles sont actifs. Mais leur action est lente et peu efficace : la cellulolyse reste faible, et la cellulose non décomposée s'accumule ;
- ♠ En milieu anaérobie, certaines bactéries anaérobies dégradent la cellulose, d'abord en acides organiques puis en gaz : gaz carbonique, hydrogène, méthane. Dans ces conditions, la cellulose ne servira pas à la construction de l'humus ;
- ♠ En milieu neutre et aéré, comme en milieu riche en calcaire, la cellulose est rapidement hydrolysée en sucres solubles. Les glucides ainsi formés ont alors trois destinations possibles :
  - la majeure partie sert d'aliment énergétique aux micro-organismes du sol, avec production élevée de CO<sub>2</sub> et d'H<sub>2</sub>O. ;
  - une seconde partie sert d'aliment plastique aux bactéries qui vont synthétiser de longues chaînes aliphatiques : les polysaccharides microbiens (ou polyuronides). Ces substances forment une sorte de gelée brune appelée « gelée cytophagienne ». Cette gelée ou colle aux remarquables propriétés agglutinantes constitue l'humine microbienne ;
  - une faible partie de la cellulose est transformée par certains champignons en composés phénoliques solubles qui serviront ensuite à la synthèse de composés humiques.



### c ) Les composés phénoliques solubles :

Dans les cellules végétales, celles des feuilles, des tiges, des racines, se trouvent de multiples substances solubles. Sous l'effet des pluies d'automne, ces substances solubles sont les premières entraînées hors des tissus végétaux, dans les premiers centimètres du sol. En forêt, on nomme « pluvolessivats » cette sorte de « tisane de feuilles » qui s'échappe des débris végétaux, sitôt la chute des feuilles, et pénètre dans les premières couches du sol<sup>1</sup>.

Ces substances solubles sont composées, nous l'avons vu plus haut, de sucres solubles, d'acides aminés, de sels minéraux, mais aussi de composés phénoliques solubles. Ces composés phénoliques libérés lors de la décomposition de la M.O.F. et dont nous avons déjà abordé la nature chimique, peuvent en réalité avoir trois origines :

- certains existaient déjà dans les tissus végétaux ;
- d'autres proviennent de la dégradation de la lignine ;
- d'autres enfin peuvent être synthétisés par des micro-organismes à partir de la dégradation de la cellulose.

Ces composés phénoliques solubles sont la principale matière première des composés humiques. Cependant, il est important de distinguer les composés phénoliques solubles ( C. P. ) « mélanisants », des C. P. « tannants » :

- les C.P. mélanisant (du grec mélanos, noir, soulignant le rôle humifère de ces composés) se forment sous végétation dite « améliorante » assez riche en azote ( C/N de la M.O.F. inférieure à 20 ). Ils peuvent se polymériser et sont favorables à la formation de composés humiques.
- les C.P. « tannants » au contraire, au lieu de se polymériser, restent solubles et ne donneront pas d'humus. De plus, ils bloquent la biodégradation des protéines. les C.P. tannants se forment sous végétation « acidifiante », pauvre en azote ( C / N de 50 à 80 ) : résineux, bruyères, etc.

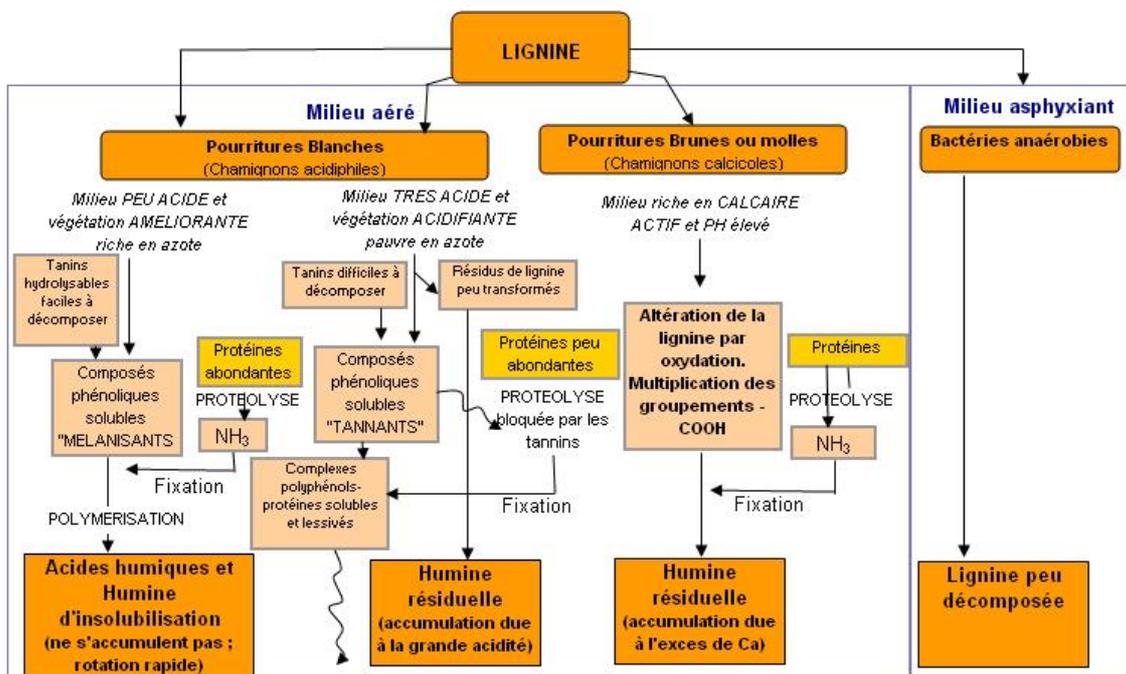
---

<sup>1</sup>MANGENOT et al ont signalé que les espèces végétales neutrophiles et nitrophiles telles l'ortie ( *Urtica dioïca* ) et le compagnon rouge ( *Melandrium rubrum* ) perdent par pluvolessivage des composés phénoliques riches en azote se polymérisant rapidement et donnant dans le sol des composés noirs proches des acides humiques.

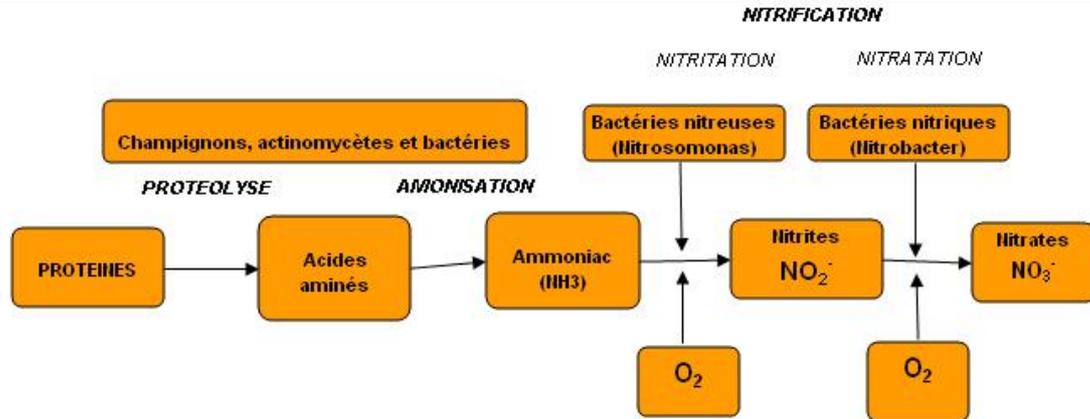
d) La décomposition de la lignine ou ligninolyse :

Alors que la cellulose est formée de molécules en chaînes, les molécules de lignine sont formées de nombreux noyaux aromatiques agglutinés, polymérisés. Leur décomposition est donc plus difficile, sauf en conditions très favorables, conditions qui dépendent comme pour la cellulose de l'aération et de l'acidité du milieu :

- **en milieu aéré, peu acide et riche en azote**, des champignons basidiomycètes (pourritures blanches) dégradent très rapidement la lignine avec formation de **composés phénoliques solubles**. Ces derniers, associés à ceux de **tannins facilement hydrolysables** libérés par une **végétation riche en azote**, serviront efficacement à l'édification des composés humiques insolubles, surtout à base d'acides humiques et d'humine d'insolubilisation. La ligninolyse est active et complète ;
- **en milieu aéré mais très acide, sous végétation « acidifiante »**, pauvre en azote, les pourritures blanches (champignons acidiphiles) attaquent également la lignine, la solubilisant en composés phénoliques solubles. Mais cette décomposition est rapidement bloquée par l'excès d'acidité et de composés tannants, et la lignine peu décomposée s'accumule. Elle donnera naissance à **de l'humine héritée ou résiduelle**. De plus, ces composés phénoliques, associés à ceux de tannins condensés issus de la végétation acidifiante, bloquent la décomposition des matières azotées.
- **en milieu aéré et basique, riche en calcaire actif** (fragments calcaires de taille inférieure à celle du limon), les champignons dominants donnent des « pourritures brunes ou molles ». Au lieu de solubiliser la lignine, ils se contentent de l'altérer en produits plus ou moins sombres mais insolubles. C'est une simple transformation des molécules de lignine en molécules d'humus, un humus à base d'humine héritée ou résiduelle. Mais nous verront plus tard que le calcaire en excès bloque rapidement cette transformation : la lignine peu transformée et l'humus qui en résulte sont bientôt recouverts d'une **gangué calcaire cristallisée**.



e ) La décomposition des protéines ou protéolyse :



D ) Phase de l'humogénèse proprement dite :

Il s'agit de la phase d'élaboration des composés humiques (acides fulviques, acides humiques et humines).

Deux phénomènes peuvent être observés :

- élaboration de produits de synthèse et de déchets de métabolismes (activités des bactéries notamment) ;
- condensations (polymérisations) purement chimiques.

E ) Phase de complexation :

Lorsque les substances humiques à petites ou à grosses molécules sont mise en contact interne avec les colloïdes minéraux, il peut s'établir des liaisons de types variés entre les deux groupes de substances pour donner des complexes organo-minéraux.

Leur formation est grandement favorisée par l'action exercée par les vers de terre.

Les complexes organo-minéraux interviennent surtout comme ciment colloïdal pour assurer la cohésion des agrégats du sol.

Toutefois, en milieux acides, il se forme également des complexes de chélation qui sont responsables de la migration en profondeur des colloïdes argileux et des sesquioxydes.

F ) Phase de minéralisation secondaire :

Il s'agit, comme nous l'avons déjà vu, de la minéralisation lente des composés humiques.

## SYNTHESE

Le tableau ci-dessous résume les phases de l'humification

Phases	Agents	Actions, effets
Lessivage physique	Eau de pluie	Dissolution de composés solubles : sels minéraux, sucres simples, acides aminés,...
Dégradation physique	Faune du sol	Fragmentation des débris organiques
Bioréduction	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bactéries, Champignons</li><li>• Enzymes du tube digestif des animaux du sol</li></ul>	Cellulolyse, protéolyse, lignolyse, etc. Oxydation plus ou moins complète des produits formés (jusqu'à minéralisation). Production de substances « préhumiques » (composés phénoliques solubles)
Humogénèse	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bactéries</li><li>• Processus purement chimiques</li></ul>	Elaboration de produits de synthèse et de déchets de métabolisme Condensations purement chimiques Formations d'acides humiques et d'humines
Complexation	Vers de terre	Formation de complexes organo-minéraux
Minéralisation secondaire	Bactéries, Champignons	Minéralisation lente des composés humiques

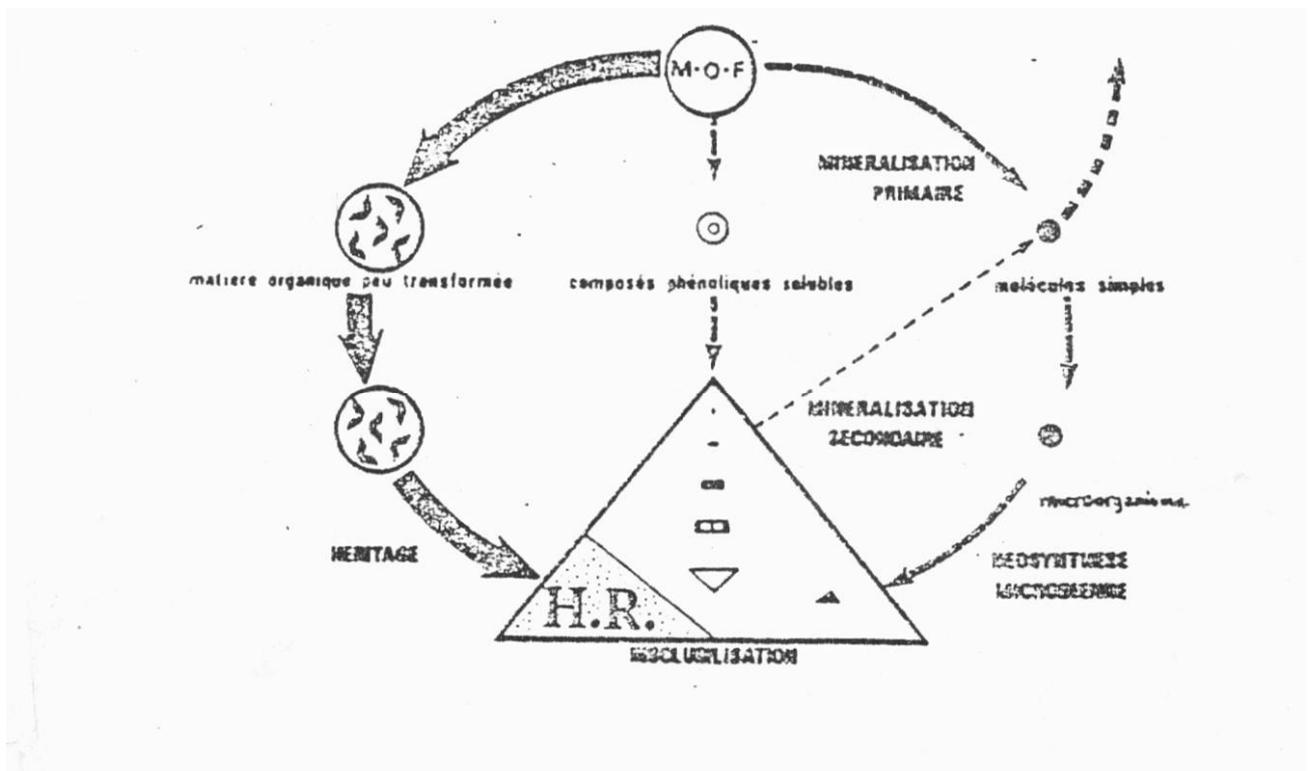
## 6. TYPOLOGIE DES HUMUS FORESTIERS

Nous renvoyons le lecteur au « Guide pratique d'observation des sols » utilisé en T.P. .

## 7. ETUDE COMPARATIVE DU FONCTIONNEMENT DES PRINCIPALES FORMES D'HUMUS

### A. LES TOURBES :

Une tourbe (figure 11) est le résultat de l'accumulation d'une grande quantité de matière organique très peu décomposée. En effet, en milieu asphyxiant, l'activité biologique est très réduite. La minéralisation primaire et la libération de composés phénoliques solubles restent donc très faibles et limitées à la surface du sol plus aérée ; tandis que s'accumule une grande quantité de matière organique peu décomposée, donc **d'humine résiduelle**<sup>2</sup>.



**Figure 11 :** Schéma général de l'évolution de la matière organique dans les tourbes.

<sup>2</sup>Caractéristiques des tourbes : très faible évolution de la matière organique fraîche : anaérobiose presque constante, cellulolyse assez active, ligninolyse inexistante. Les tourbes acides se forment dans des eaux dépourvues de calcium, elles sont très désaturées, PH de 4 à 5 avec un taux de cendres bas ( 2 à 3 % ), C / N de l'ordre de 40. Les tourbes calciques se forment sur substratum calcaire dans des eaux fortement chargées de calcium (taux de cendres de 15 % environ, C / N inférieur à 30 ).

## B. Les humus de forme MOR / MODER :

Ces humus se rencontrent :

- **sous climat très humide** (landes bretonnes par exemple) ;
- **sous climat froid** (alpin ou boréal par exemple) ;
- **sur roches-mères sableuses** (sables, grès quartzeux, arène granitique,... ), pauvres en bases et en fer ( donc acides ), pauvres en argile ( donc incapables de former un complexe argilo-humique ), et filtrantes ( donc favorisant le lessivage ) ;
- **à partir de végétation acidifiante** ou acidiphile à C/ N très élevé.

Le MOR se caractérise par la superposition de la matière organique au-dessus de la matière minérale. Dans le cas du MODER, la décomposition est meilleure, et la matière organique est un peu plus mélangée à la matière minérale, sans pour autant être liée à celle-ci par des liaisons physico-chimiques.

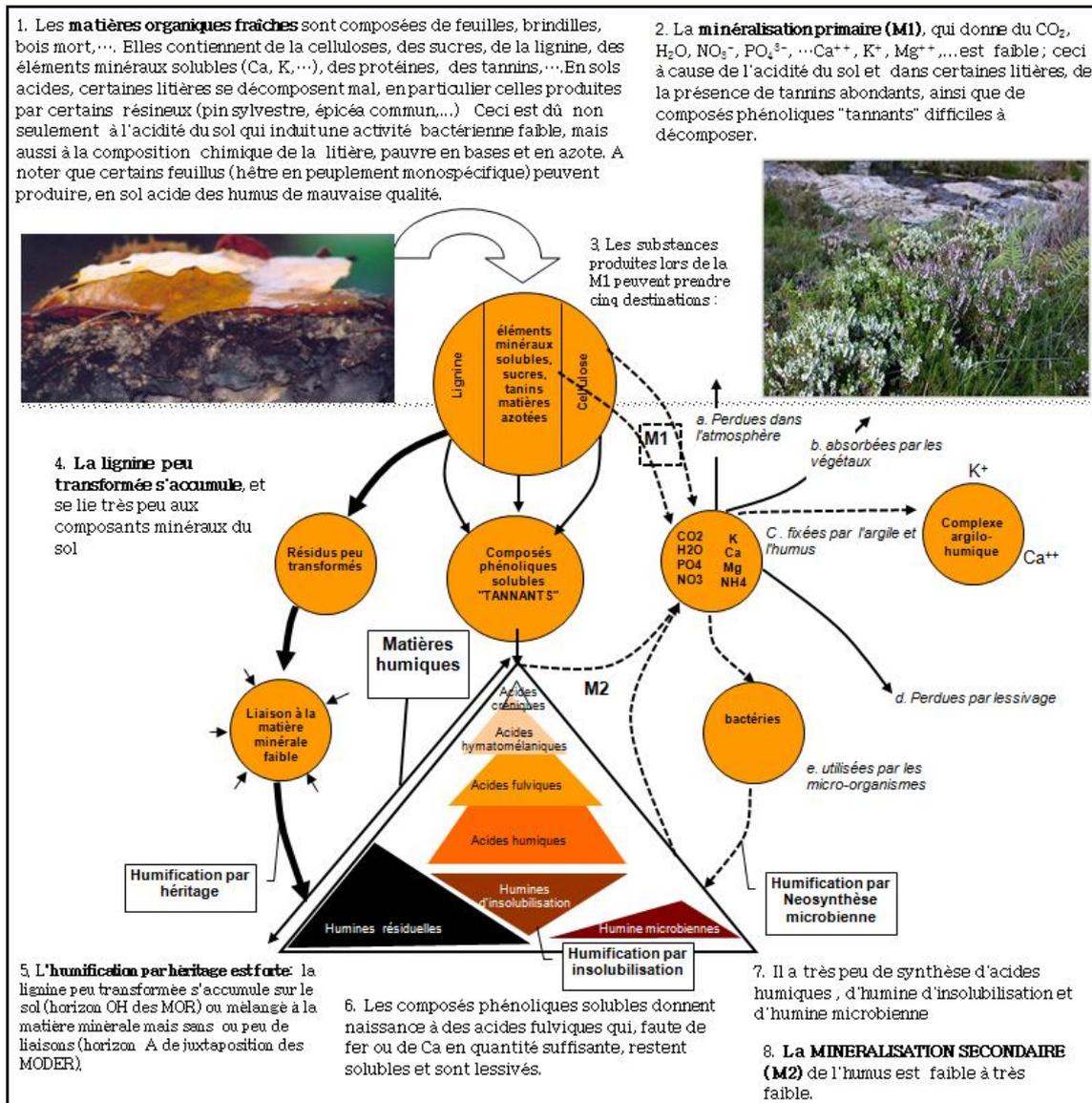
Le schéma d'évolution (figure 12) des matières organiques dans le cas des humus de forme MOR / MODER<sup>3</sup> fait ressortir :

- **une minéralisation primaire faible** : la M.O.F. s'accumule ;
- **une minéralisation secondaire faible** : l'humus s'accumule dans le sol ;
- **une humification par héritage dominante** : la lignine peu transformée s'accumule ;
- **une humification par insolubilisation et par néosynthèse microbienne faibles à très faibles** : les composés phénoliques solubles abondants ( une bonne partie provient directement des tannins abondants dans les végétaux acidifiants ) ne s'insolubilisent pas, faute de Ca et de Fe : les acides fulviques dominent sur les acides humiques et l'humine d'insolubilisation. Pire : dans les mor, les composés phénoliques solubles forment avec le peu de fer et d'Al disponibles des complexes organo-métalliques solubles qui migrent en profondeur, après avoir dégradé les feuillets d'argile. C'est cette « mauvaise influence » qu'exerce le mor sur le sol qui est responsable du processus de podzolisation (voir chapitre VI).

---

<sup>3</sup>Comme nous le verrons dans le chapitre 5, les caractéristiques physico-chimiques des mor et des moder sont les suivantes :

- PH de 3 à 4,5 pour le mor, 4 à 5 pour le moder ;
- C / N de 25 à 30 pour le mor, de 15 à 25 pour le moder ;
- taux de saturation ( S / T ) inférieur à 10 % pour le mor, de 10 à 20 % pour le moder.



**Figure 12 :** Schéma général de l'évolution de la matière organique dans les MOR / MODER (tiré et modifié de SOLTNER, 1992).

### C. MULL ACIDE ET MULL DOUX ( EUMULL, MESOMULL )

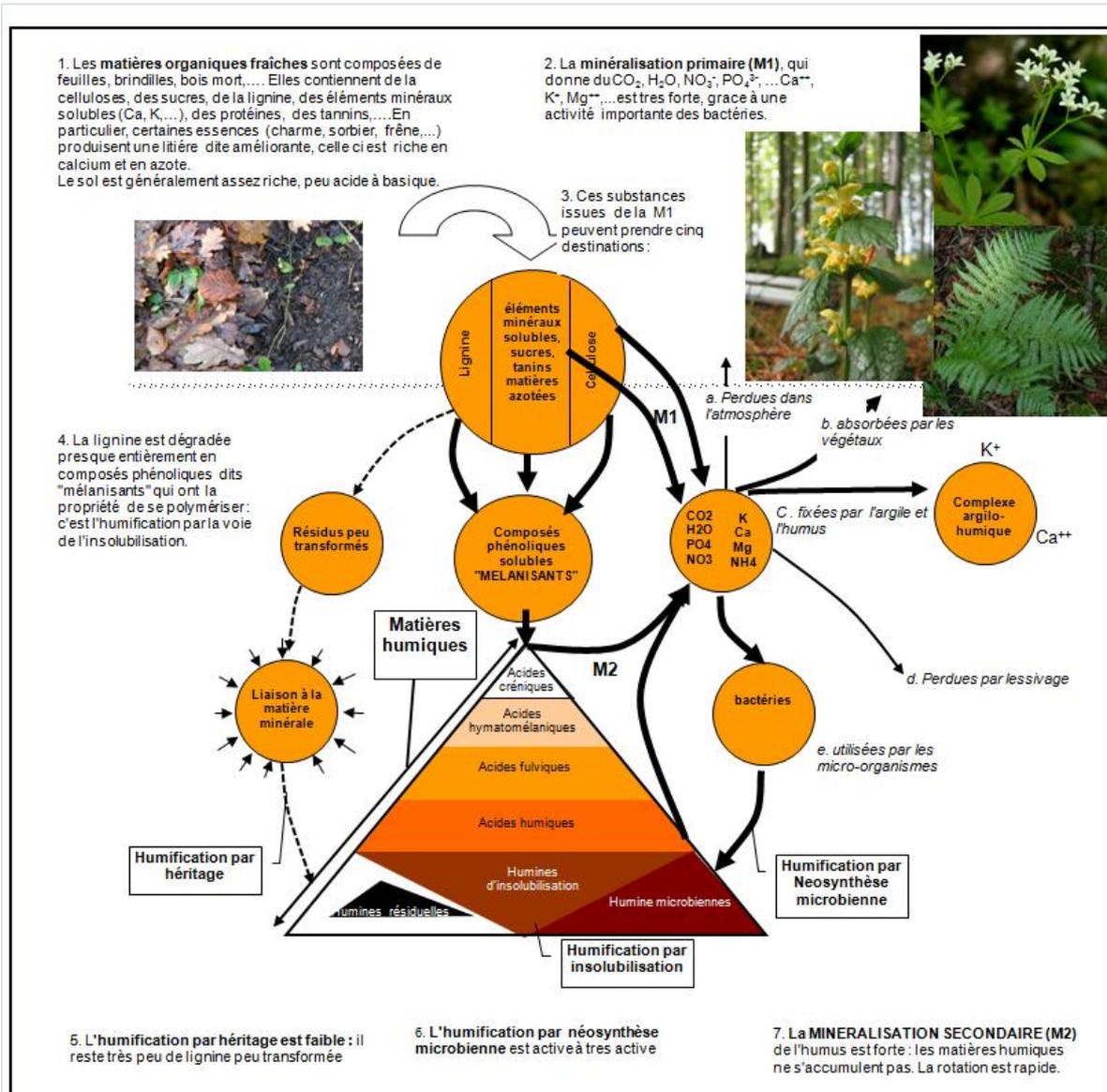
On qualifie de mull les humus formés en présence d'une activité biologique élevée. Mais c'est le seul caractère commun des mull, qui diffèrent selon leur degré d'évolution et la vitesse de leur minéralisation.

Ce qui frappe au premier abord chez le mull acide et surtout dans les mull doux, c'est la minceur de la couche humifère. C'est le signe que la minéralisation primaire des matières organiques fraîches et la minéralisation secondaire de l'humus sont actives.

Mais le schéma de la figure 13 souligne aussi :

- que l'humine héritée est peu représentée dans l'humus : la lignine est complètement décomposée ;
- que l'humification se fait surtout par les deux voies de l'insolubilisation ( humine d'insolubilisation abondante ) et de la néosynthèse microbienne ( l'humine microbienne peut représenter 10 % de l'humine, ce qui est important ).

L'EUMULL est un humus à rotation rapide, qui ne vieillit pas, ou la M.O.F se décompose et se minéralise très rapidement, tout en donnant un complexe argilo-humique suffisamment stable.



**Figure 13 :** Schéma général de l'évolution de la matière organique dans les MULL DOUX (tiré et modifié de SOLTNER, 1992).

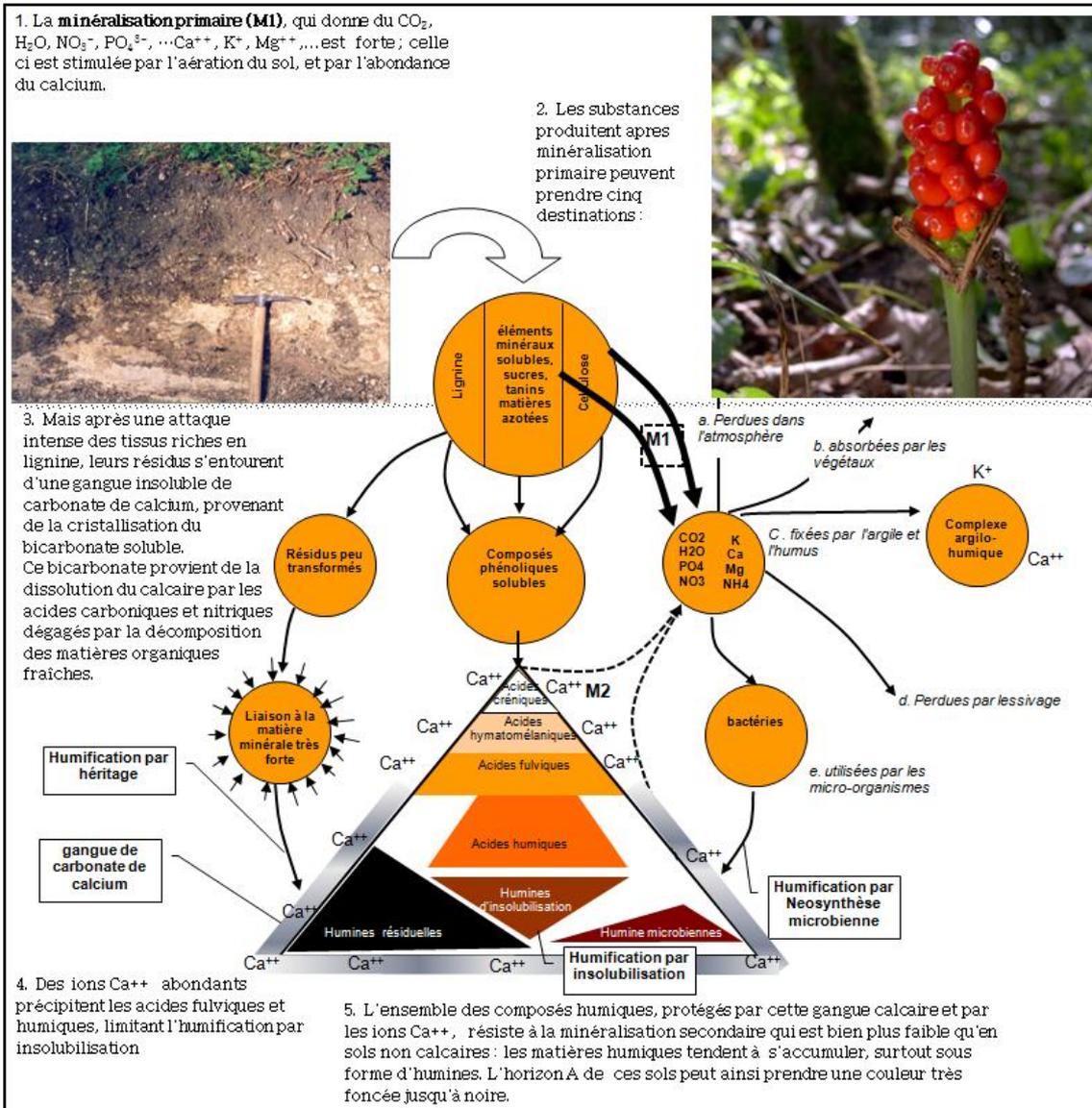
## D. LE MULL CARBONATE :

Le mull carbonaté ou mull calcaire se caractérise sur une coupe dans le sol, par la teinte assez foncée surtout en surface, mais se prolongeant assez profondément ; par l'étonnante structure grumeleuse, traduisant une intense activité des vers de terre mélangeant intimement les matières organiques au sol.

Visiblement, la matière organique s'accumule davantage que dans les mull doux ou acide, mais se mélange intimement au sol contrairement au mor et au moder.

On remarque (voir figure 14) :

- **une minéralisation primaire très accentuée** : l'excellente aération dûe à la structure grumeleuse (elle-même obtenue par la floculation de l'argile par les ions Ca surabondants) favorise l'activité des lombrics et des bactéries ;
- **une attaque incomplète de la lignine** : les champignons responsables des pourritures brunes ou molles transforment les molécules de lignine sans les décomposer : il y a formation d'humine résiduelle ;
- **un blocage rapide de cette humification par incrustation calcaire** : autour des résidus de lignine à demi-décomposée, autour de l'humine (quelque soit son origine ) se dépose une fine pellicule de calcite qui les met hors de portée de l'attaque microbienne : les matières organiques tendent donc à s'accumuler.
- **une humification « par insolubilisation » également bloquée à un stade précoce** : les acides fulviques sont précipités par les ions Ca en excès pour former des fulvates qui n'évoluent plus. Les acides fulviques dominent donc sur les acides humiques et sur l'humine d'insolubilisation.



**Figure 13 :** Schéma général de l'évolution de la matière organique dans les MULL carbonaté (tiré et modifié de SOLTNER, 1992).

## ANNEXES

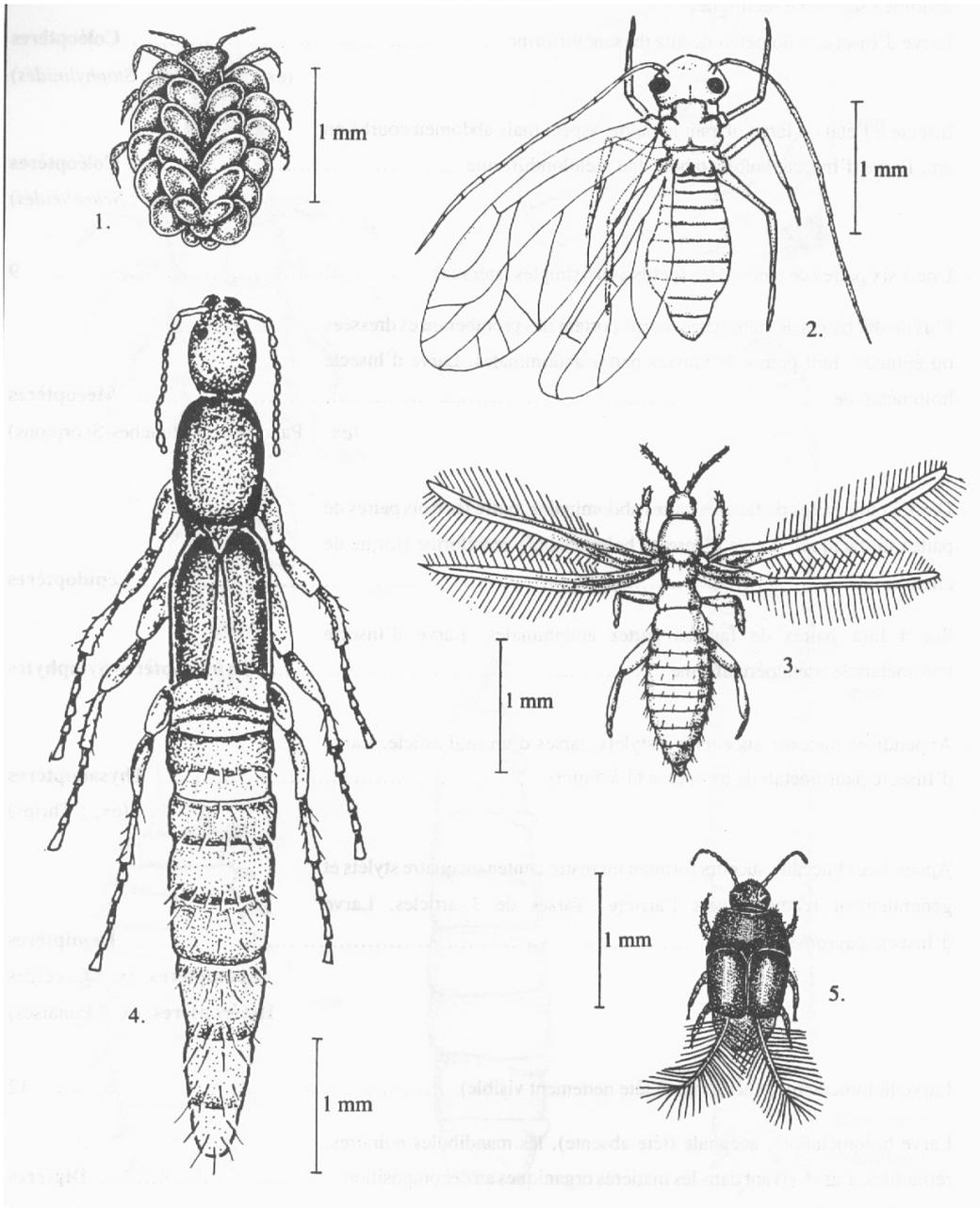
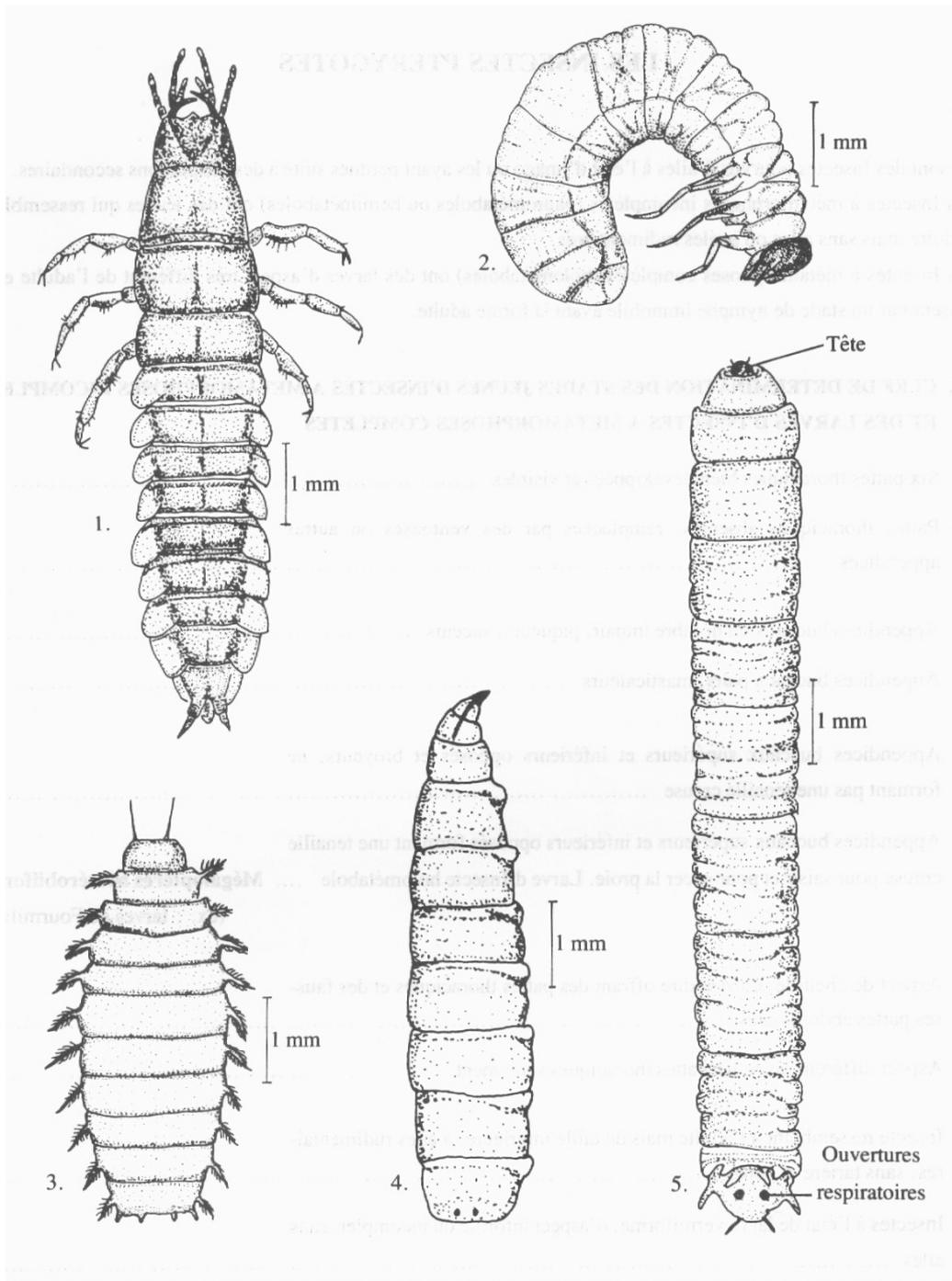


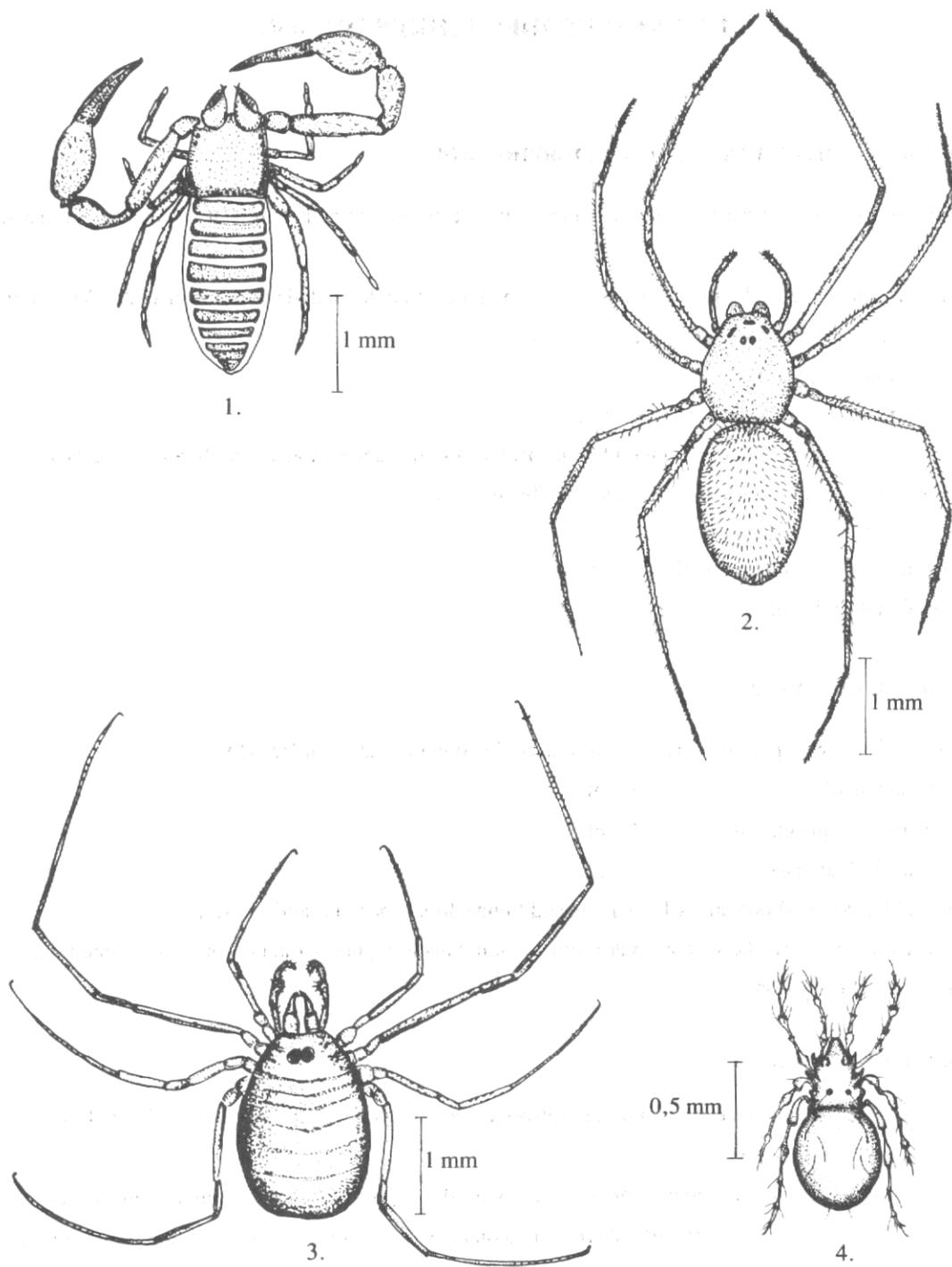
Fig. 28 : Insectes vivant à l'état adulte dans le sol.

1. La Cochenille, *Orthesia urticae* (F. Coccidés) au corps couvert de plaques ciréuses est un Homoptère fréquent dans la litière ;
2. Un Psoque, petit Insecte voisin des Poux mais non parasite ;
3. Un Thrips aux ailes frangées ;
4. et 5. Deux Coléoptères, un Staphylin aux élytres raccourcies (4) et un Insecte aux ailes plumeuses (F. Ptilidés).



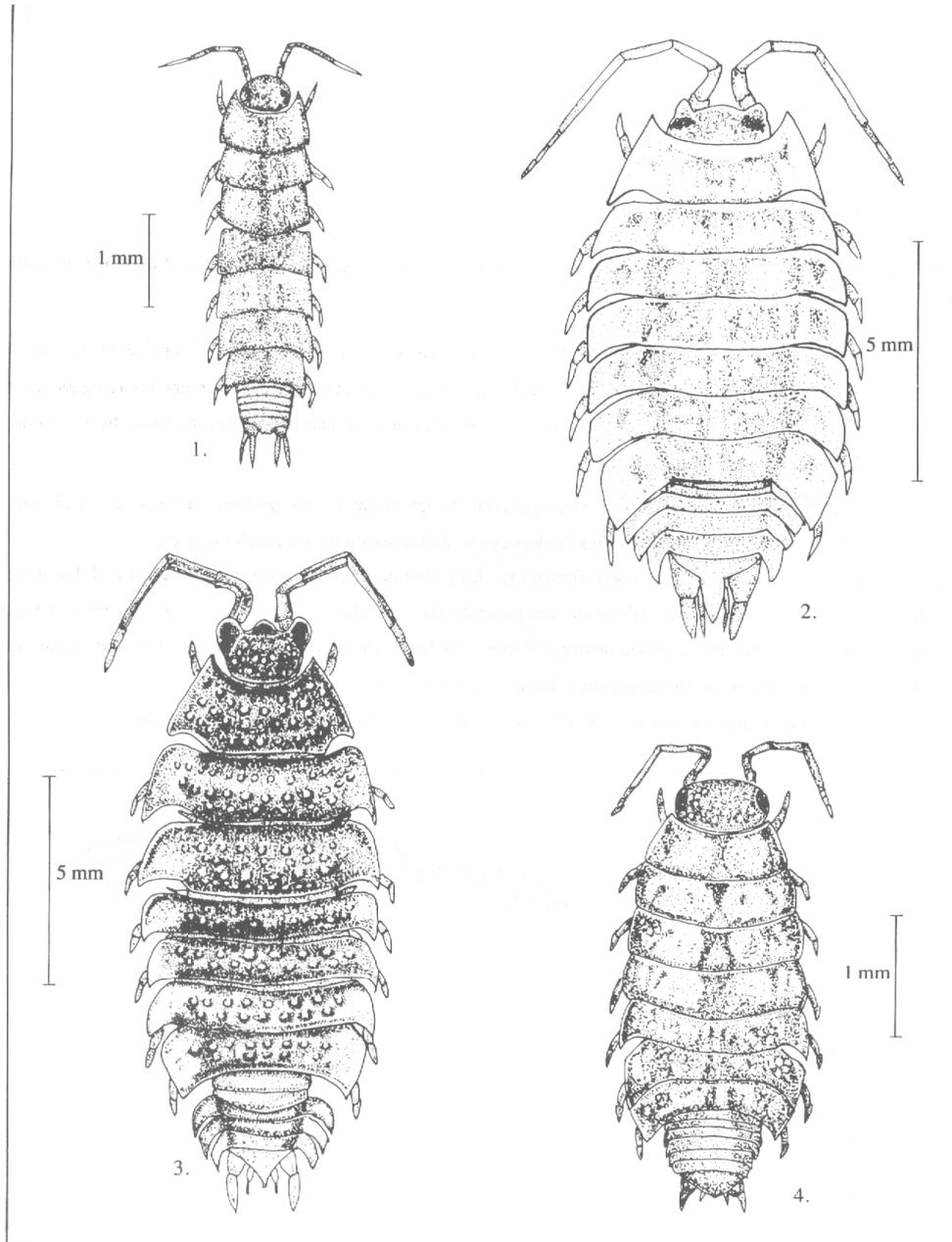
**27 : Larves d'Insectes à métamorphoses complètes (holométaboles).**

1. et 2. Larves de Coléoptères (corps segmenté, tête distincte avec mandibules, thorax avec 3 paires pattes), larves de *Carabidé* (1) au corps rectiligne, larve de *Scarabéidé* (2) au corps courbé ;
3. et 4. Larves de Diptères sans tête (acéphales), larve de *Fannia* sp. et Asticot de la *F. Rhagionidés* ;
5. Larve de Diptère à tête rétractile, Tipule.



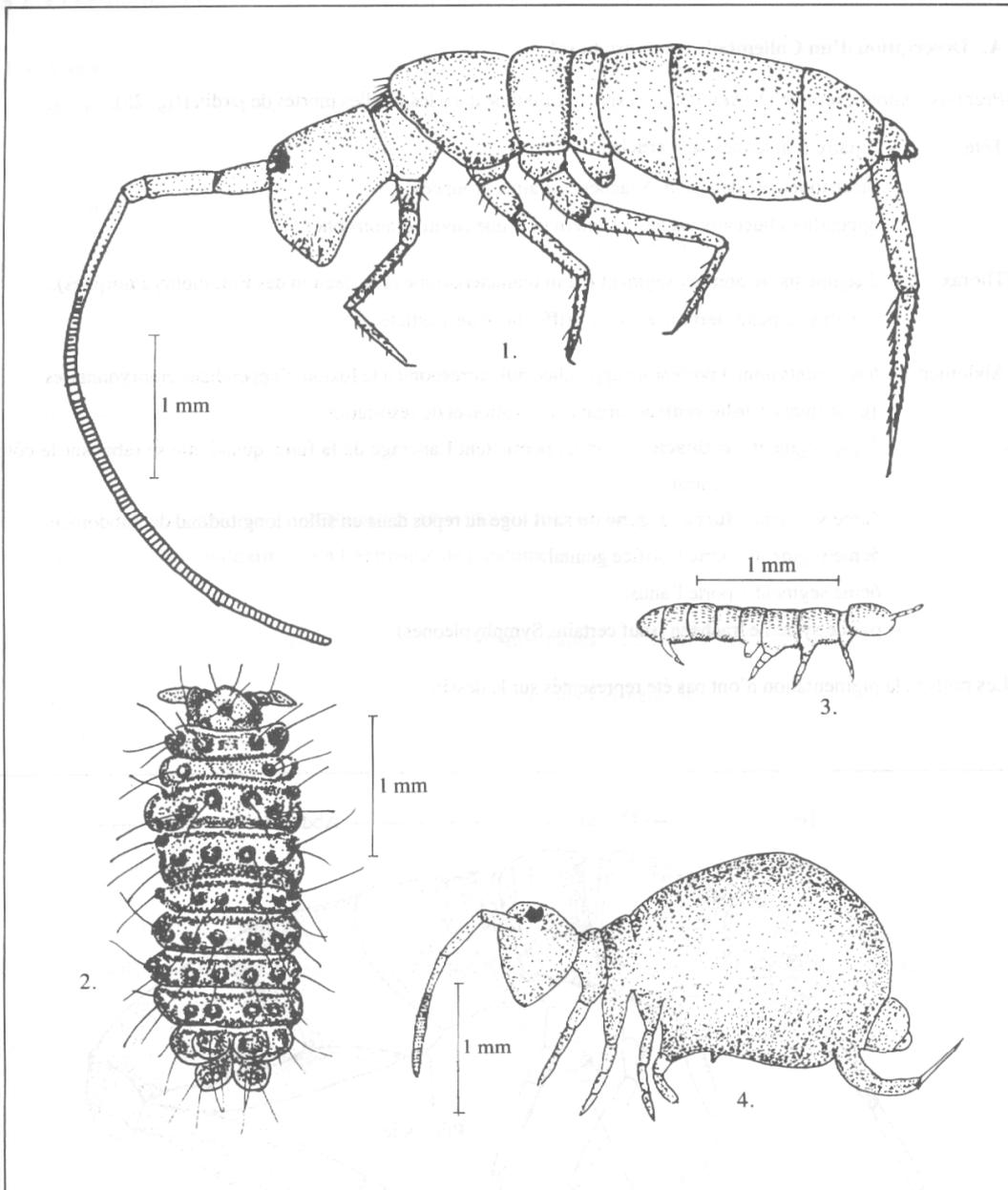
**Fig. 19 : Arachnides.**

1. Un Chernète ou Pseudoscorpion (*Neobisium sp.*) ;
2. Une Araignée ;
3. Un Opilion (*Platybunus sp.*) ;
4. Un Acarien (Oribate).



**Fig. 33 : Cloportes.**

1. Le Cloporte de l'humus (*Trichoniscus pusillus*) ;
2. Le Cloporte gris (*Oniscus asellus*) ;
3. Le Cloporte noir (*Porcellio scaber*) ;
4. Le Cloporte de la mousse (*Philoscia muscorum*).



**Fig. 26 : Collemboles.**

- . Collemboles au corps allongé et segmenté (Arthropléones) :
  1. Grand Collembole brun de la litière (*F. Tomocéridés, Tomocérus sp.*) ;
  2. Collembole de la litière, gris bleu, couvert de verrues (*F. Néanuridés, Neanura sp.*) ;
  3. Petit Collembole de l'humus, blanc et à furca réduite (*F. Isotomidés, Folsomia sp.*).
- . Collemboles au corps globuleux et non segmenté (Symphypléones) :
  4. Collembole de la litière, en forme de «petit ours» (*F. Sminthuridés, Sminthurus sp.*).