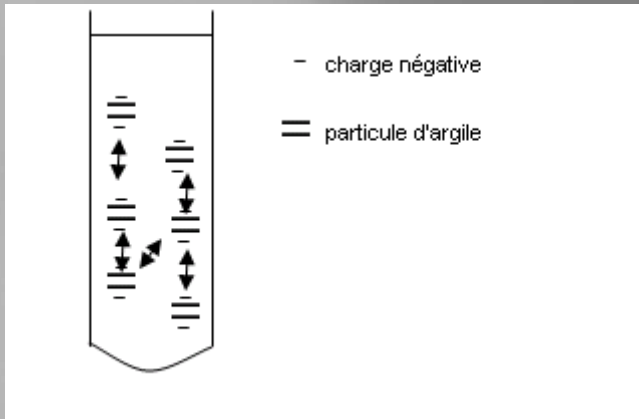


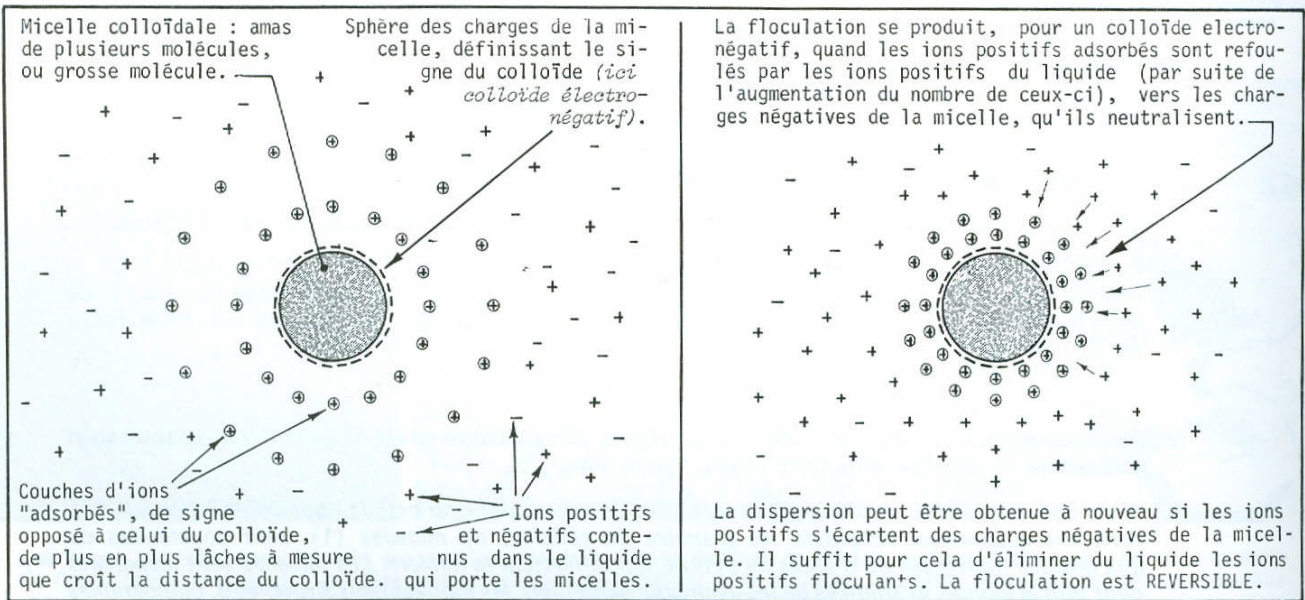
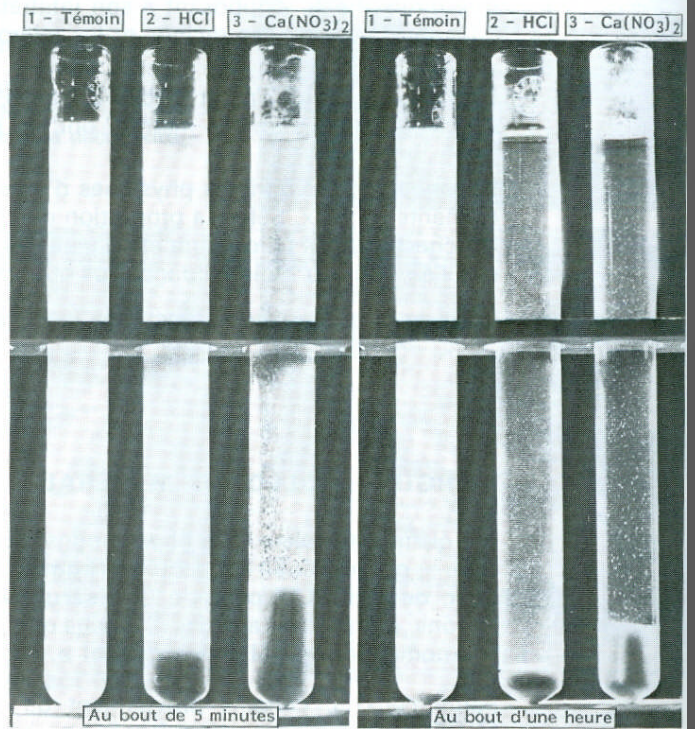
CHAPITRE III : LES CONSTITUANTS SOLIDES DU SOL

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, sables grossiers	<u>Matière organique fraîche :</u> ➤ constituants des tissus végétaux cellulose, hémicellulose, tanins,.. ➤ 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^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} ,...	<u>Constituants de l'air : O_2, N_2, CO_2</u> <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> Gravier, Cailloux, Pierres, Blocs	<u>Matières humiques :</u> matières organiques transformées		

TERRE FINE	ARGILE	particules de moins de 2µm
	LIMONS FINS	2 à 20 µm
	LIMONS GROSSIERS	20 à 50 µm
	SABLES FINS	50 µm à 200 µm
	SABLES GROSSIERS	200 µm à 2mm
ELEMENTS GROSSIERS	GRAVIERS	2 à 20 mm
	CAILLOUX	2 à 7,5 cm
	PIERRES	7,5 à 20 cm
	BLOCS	>20 cm



EXPERIENCE DE FLOCCULATION DE L'ARGILE par un acide et par un sel de calcium.



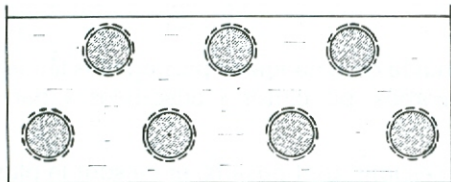
— REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DE LA DISPERSION ET DE LA FLOCCULATION DES MICELLES COLLOIDALES DANS UN LIQUIDE

L'ARGILE A L'ETAT DISPERSÉ...

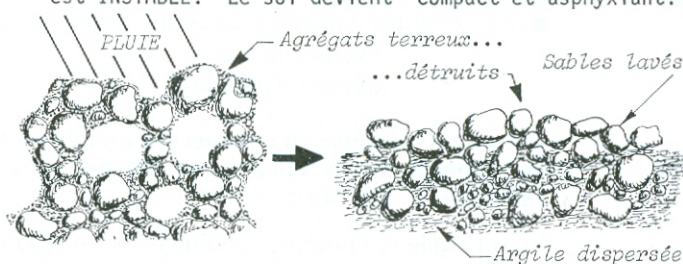


...donne, dans l'eau, un trouble permanent qui ne se dépose pas.

Ce trouble est dû aux charges électriques de même signe (négatif) entourant les micelles d'argile : celles-ci, se repoussant sans cesse, ne peuvent se déposer.



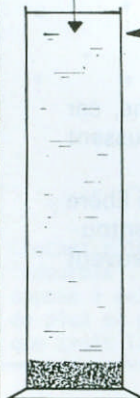
DANS LE SOL, l'argile DISPERSÉE cherche à reformer avec l'eau un mélange homogène : elle est incapable de maintenir soudés les agrégats terreux. La structure se dégrade sous l'effet de la pluie : on dit qu'elle est INSTABLE. Le sol devient compact et asphyxiant.



Sels de Ca

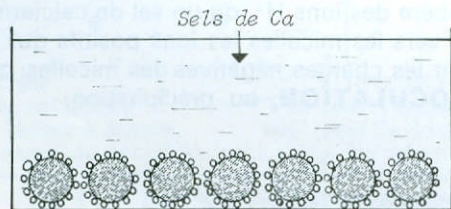
SI ON AJOUTE A CETTE ARGILE DES SELS DE CALCIUM, L'ARGILE FLOCULE :

L'ARGILE A L'ETAT FLOCULÉ...

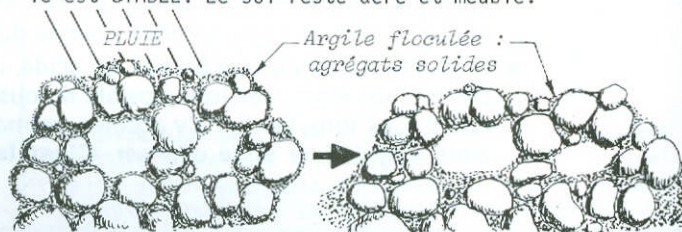


...se dépose au fond, se séparant de l'eau qui devient limpide.

Cette précipitation vient de la neutralisation des charges négatives des micelles d'argile par les charges positives des ions Ca^{++}



DANS LE SOL, l'argile FLOCULÉE ne se remet pas en mélange avec l'eau mais garde ses micelles agglutinées : elle maintient soudés les agrégats terreux. La structure résiste aux effets dégradants de la pluie : elle est STABLE. Le sol reste aéré et meuble.



DEUXIEME PARTIE : LA MATIERE ORGANIQUE

1. GENERALITES

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

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,...

**Composition moyenne de la retombée en forêt ardennaise
(hêtraie-chênaie)**

Feuilles	75 %
Brindilles	10 %
Fruits	10 %
Ecailles de bourgeons	4 %
Fleurs	1 %

Quantités de matières végétales retournées au sol (en tonnes/ha/ an de matières sèches)

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

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

3. LES AGENTS DE L'HUMIFICATION :

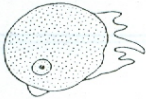

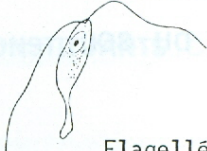
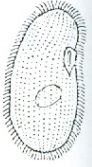



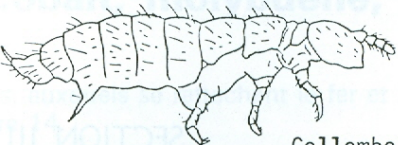
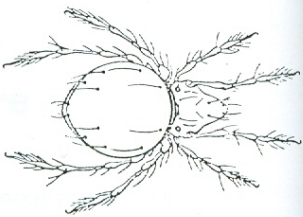
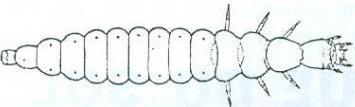



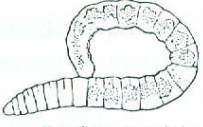
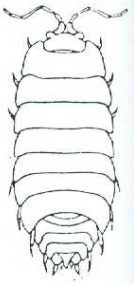
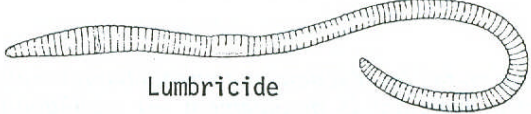
A. La microflore du sol :

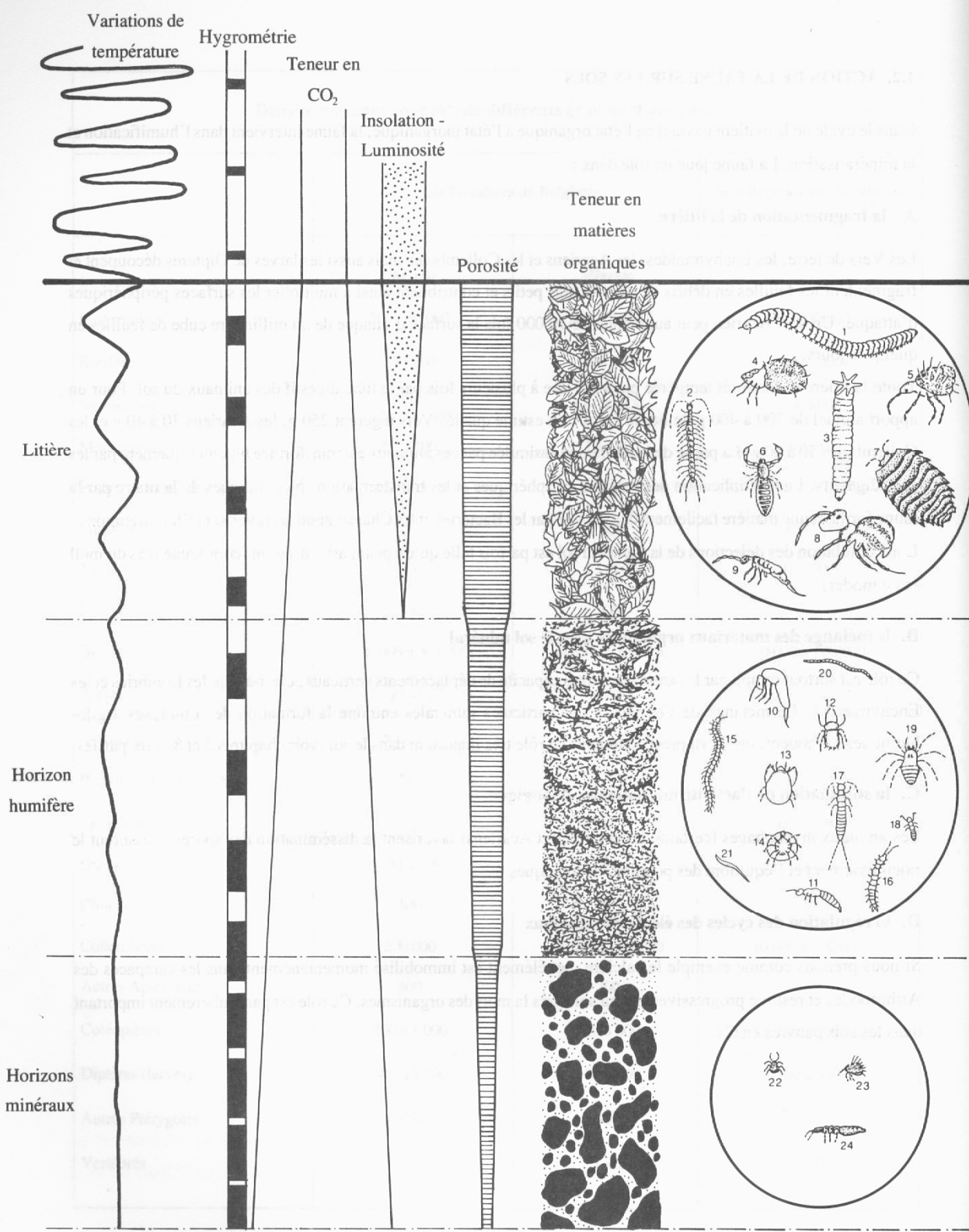
- a) Les algues
- b) Les bactéries
- c) Actinomycètes
- d) Champignons

B. La faune du sol :

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

- a) Protozoaires
- b) Nématodes (Vers inférieurs, embranchement des Némathelminthes) :
- c) Mollusques :
- d) Les Annélidés (embranchement)
 - ♠ Les Enchytraéides
 - ♠ Les Lombricidés
- e) Les Arthropodes
- f) Les Mammifères

<p>MICROFAUNE :</p> <p><i>en dessous de 0,2 mm</i></p>	 <p>Amibe</p>  <p>Thécamoebien</p>  <p>Flagellé</p>  <p>Cilié</p>
<p>MESOFAUNE :</p> <p><i>De 0,2 à 2 mm</i></p>	 <p>Rotifère</p>  <p>Tardigrade</p>  <p>Nématode</p>  <p>Collembole</p>  <p>Acarien</p>
<p>MACROFAUNE :</p> <p><i>Au dessus de 2 mm</i></p>	 <p>Larve de Coléoptère</p>  <p>Larve de Diptère</p>  <p>Chilopode</p>  <p>Diplopode</p>  <p>Enchytraeide</p>  <p>Isopode</p>  <p>Lumbricide</p>



Facteurs abiotiques du sol et distribution de la pédofaune (d'après Coineau).

1. Iule ; 2. Lithobie ; 3. Larve de Tipule ; 4. et 5. Acariens Oribates ; 6. Pseudoscorpion ; 7. Cloporte ; 8. et 9. Collemboles ; 10. et 11. Collemboles ; 12. et 13. Acariens Oribates ; 14. Acarien Uropode ; 15. Géophile ; 16. Symphyle ; 17. Campodé ; 18. Protoure ; 19. Opilion ; 20. Enchytraeide ; 21. Nématoide ; 22. et 23. Acariens ; 24. Collembole

MOR → MODER → MODER-MULL → MULL ACTIF

pH acide → pH proche de la neutralité → pH à tendance alcaline

Densité des bactéries croissante

Densité des moisissures décroissante

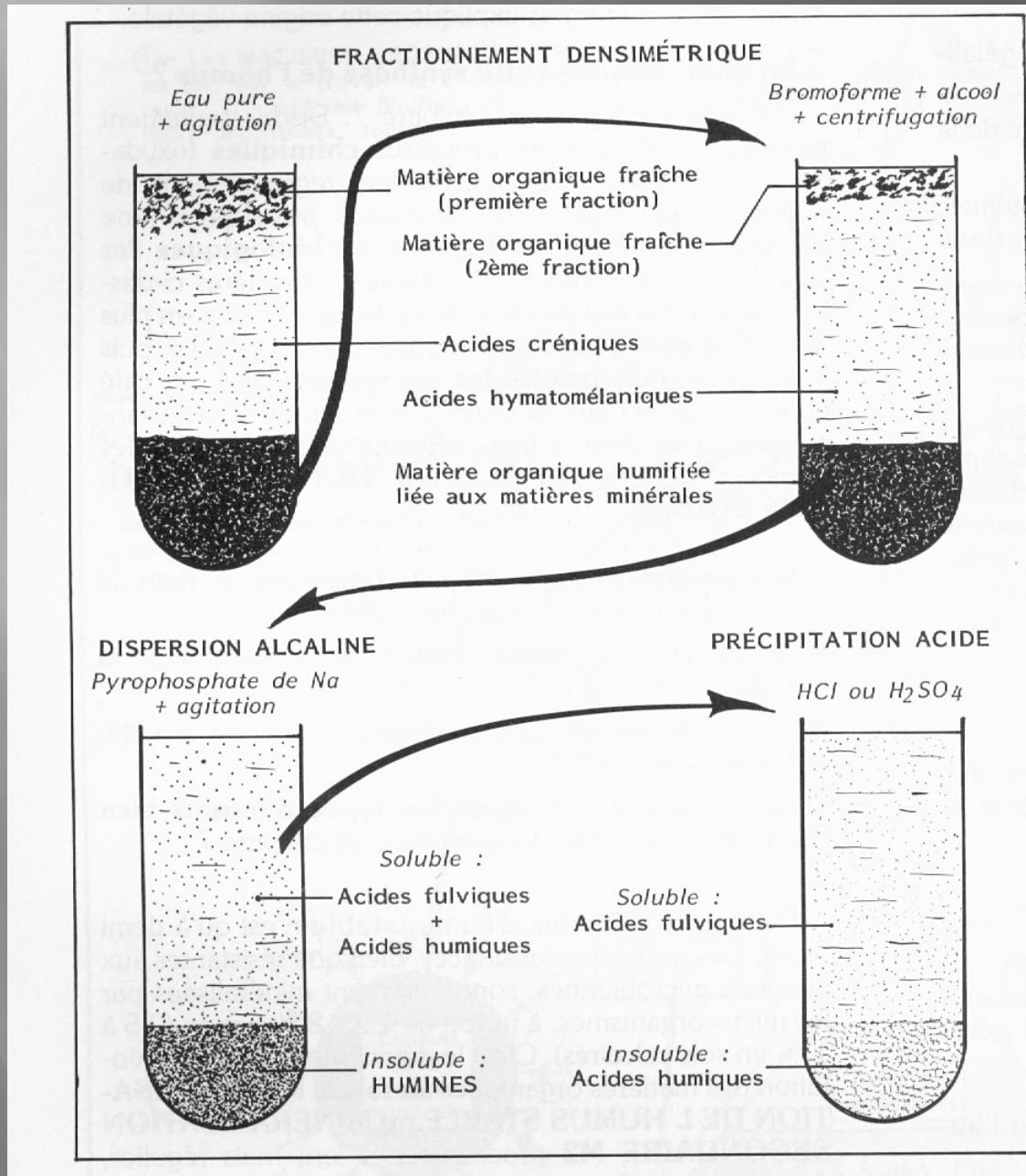
Importance relative décroissante ↓

1. Acariens et Collemboles	1. Acariens, Collemboles et larves d'Insectes	1. Myriapodes et Isopodes	1. Lombriciens
2. Larves d'Insectes, Myriapodes et Enchytraeides	2. Myriapodes, Enchytraeides	2. Larves d'Insectes, Lombriciens et Enchytraeides	2. Isopodes
3. Annélides	3. Annélides et Isopodes	3. Acariens et Collemboles	3. Myriapodes et larves d'Insectes
4. Isopodes			4. Acariens et Collemboles

Teneur en complexes organo-minéraux croissante

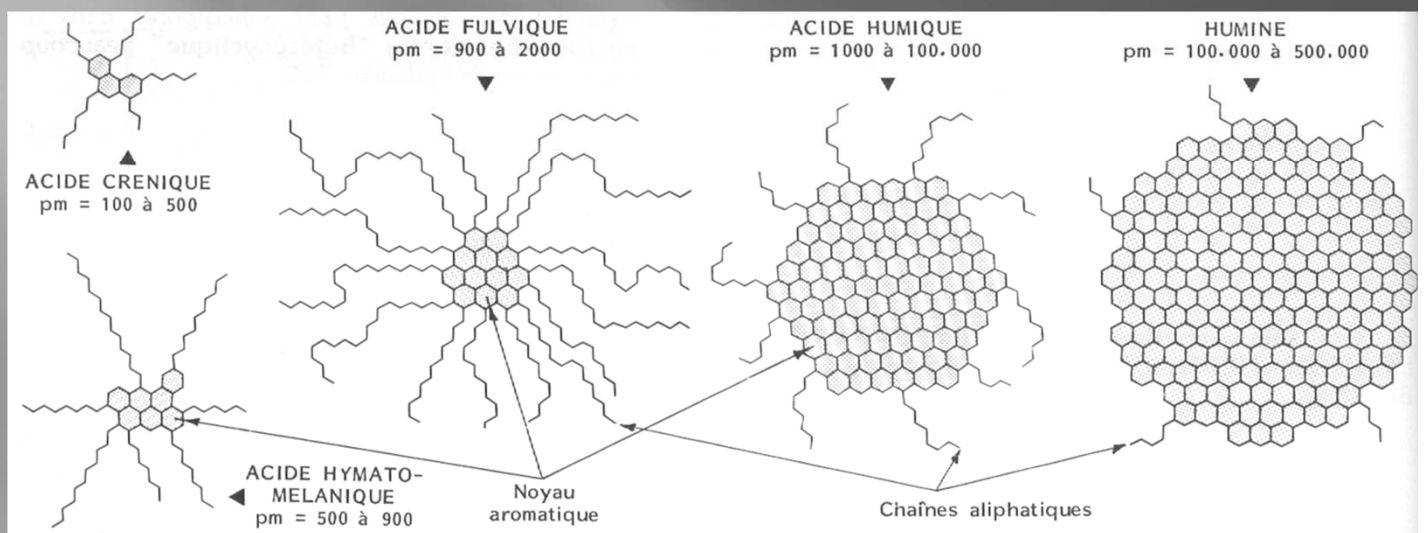
4. COMPOSITION DE L'HUMUS :

A) Les différentes fractions de l'humus



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 H₂SO₄.
- les **acides humiques** : solubles dans le pyrophosphate de Na mais insolubles dans les acides HCl ou H₂SO₄.
- l'**humine** : insoluble dans tous les solvants.



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

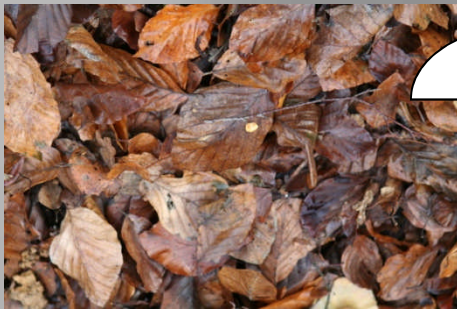
Ainsi on peut représenter sous forme d'une pyramide les composés humiques qui se forment des plus solubles, simples et à faible poids moléculaire (les acides créniques) au plus insolubles, complexes et à poids moléculaire élevé (humine).
L'humine qui se forme par polymérisation ou polycondensation est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

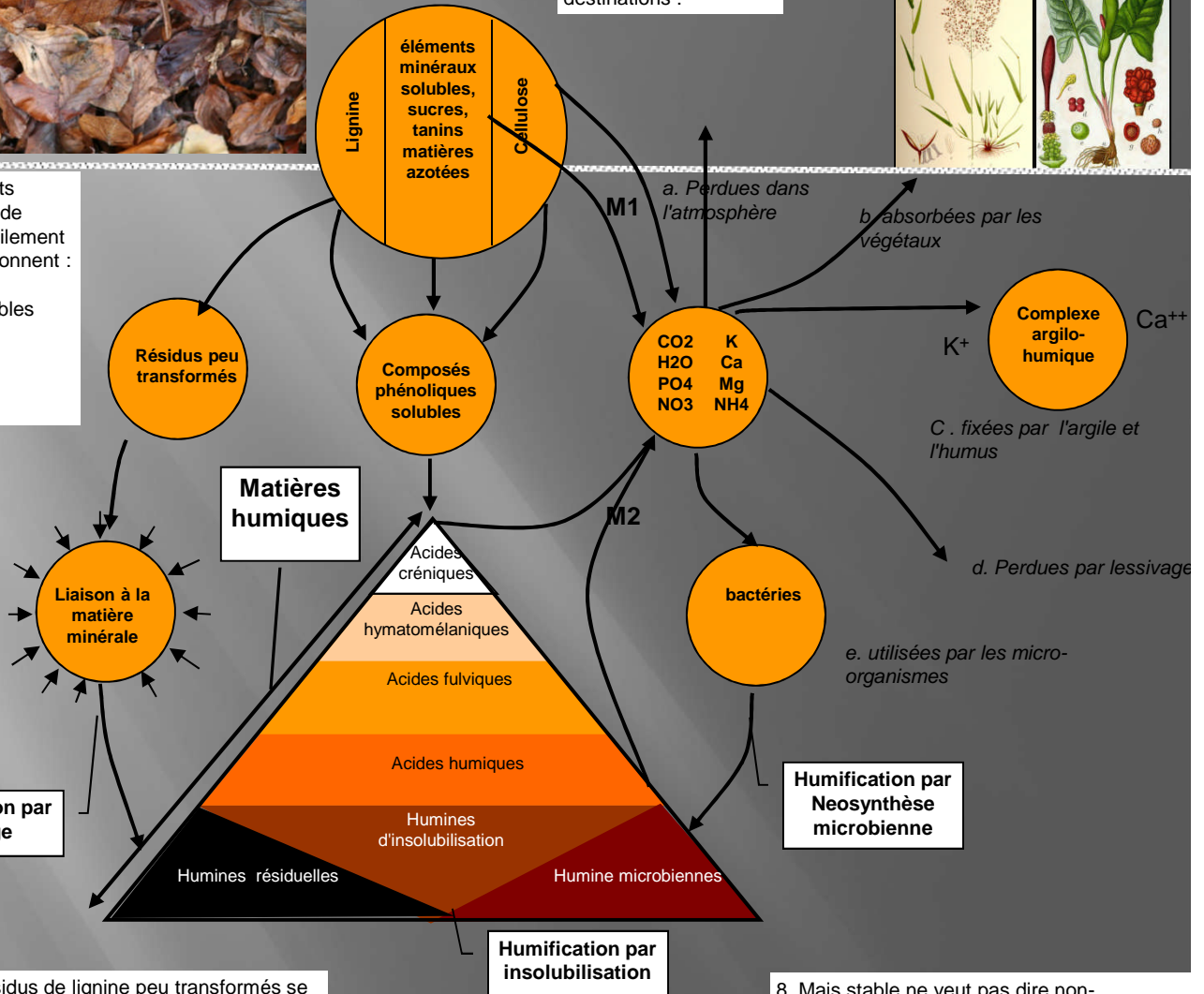
1. Les **matières organiques fraîches** sont composées de feuilles, brindilles, bois mort,.... Elles contiennent de la celluloses, des sucres, de la lignine, des éléments minéraux solubles (Ca, K,...), des protéines, des tannins,....

2. La plus grande partie est minéralisée rapidement : c'est la **minéralisation primaire (M1)**, qui donne du CO₂, H₂O, NO₃⁻, PO₄³⁻, ...Ca⁺⁺, K⁺, Mg⁺⁺,...



3. Ces substances peuvent prendre cinq destinations :

4. Les constituants végétaux à base de lignine, plus difficilement décomposables, donnent :
- des composés phénoliques solubles
- des résidus peu transformés



Humification par héritage

Humification par Neosynthèse microbienne

Humification par insolubilisation

5. Les résidus de lignine peu transformés se mélangent plus ou moins aux matières minérales, notamment par brassage dans le tube digestif des vers de terre. Ils donnent alors l'humine **résiduelle** ou héritée : c'est l'**humification par héritage**

6. Les composés phénoliques solubles subissent une série d'oxydations et de condensations (polymérisation), donnant des molécules de plus en plus grosses, d'abord solubles (acides créniques, acides hymatomélaniques, acides fulviques), puis insolubles (acides humiques, humines). Tout ceci aboutissant à l'humine d'insolubilisation. Ce processus s'appelle l'**humification par insolubilisation**.

7. Une partie des molécules simples issues de la minéralisation primaire est reprise par les micro-organismes, qui les utilisent pour leur métabolisme. A leur mort, il reste des substances fortement liées aux matières minérales, et insolubles : l'humine de néosynthèse microbienne.

L'ensemble de ces trois humines :
- résiduelle
- d'insolubilisation
- de néosynthèse microbienne

forme la partie la plus insoluble et la plus stable de l'humus.

8. Mais stable ne veut pas dire non-dégradable. Sous l'effet d'autres micro-organismes, l'ensemble des composés de l'humus est plus ou moins rapidement attaqué et finit par repasser à l'état de molécules simples qui sont elles aussi :
- perdues dans l'atmosphère ;
- absorbées par les plantes ;
- fixées par l'argile et l'humus ;
- ou perdues par lessivage.

C'est la **MINERALISATION SECONDAIRE (M2)**.

•c) Propriétés générales des différents composés humiques

• 1. Les acides humiques

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

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 floculation 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

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

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 :

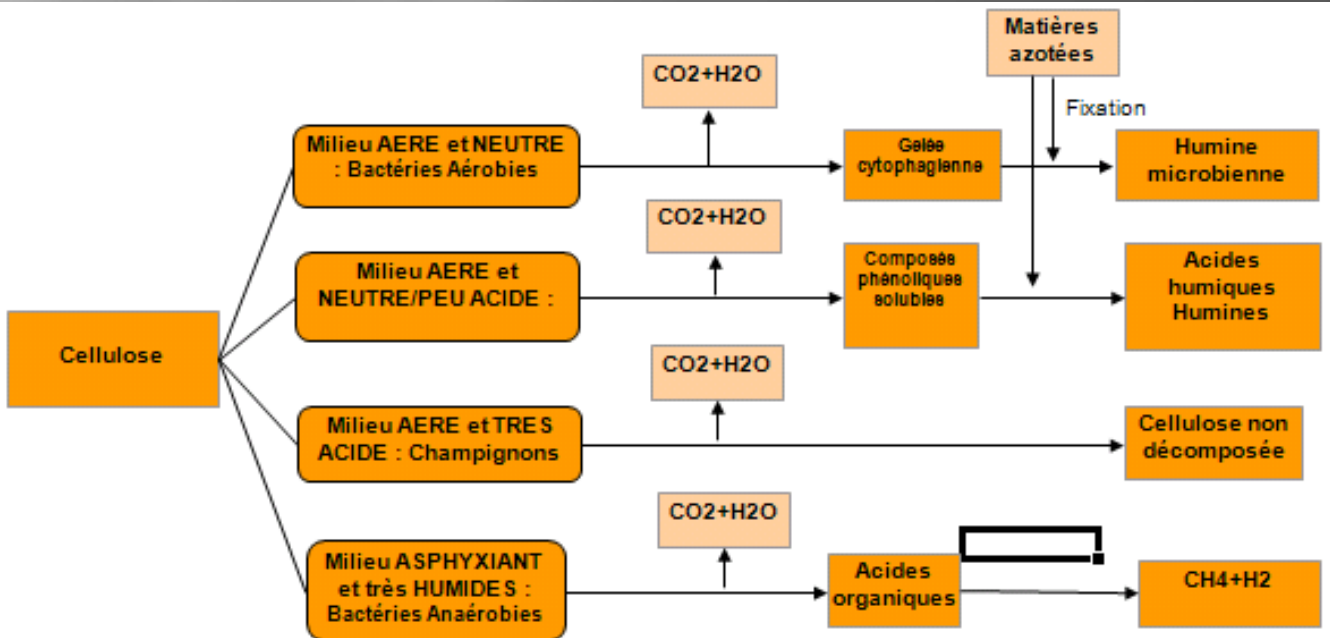
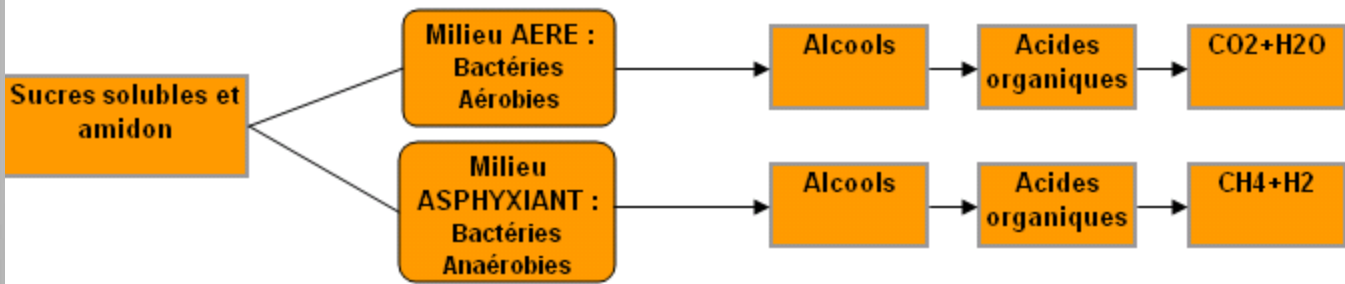
Principalement sous l'action de la faune du sol, les débris organiques sont fragmentés, désagrégés, pulvérisés. La surface d'attaque microbienne est considérablement augmentée (jusqu'à 3000 ou 4000 fois).

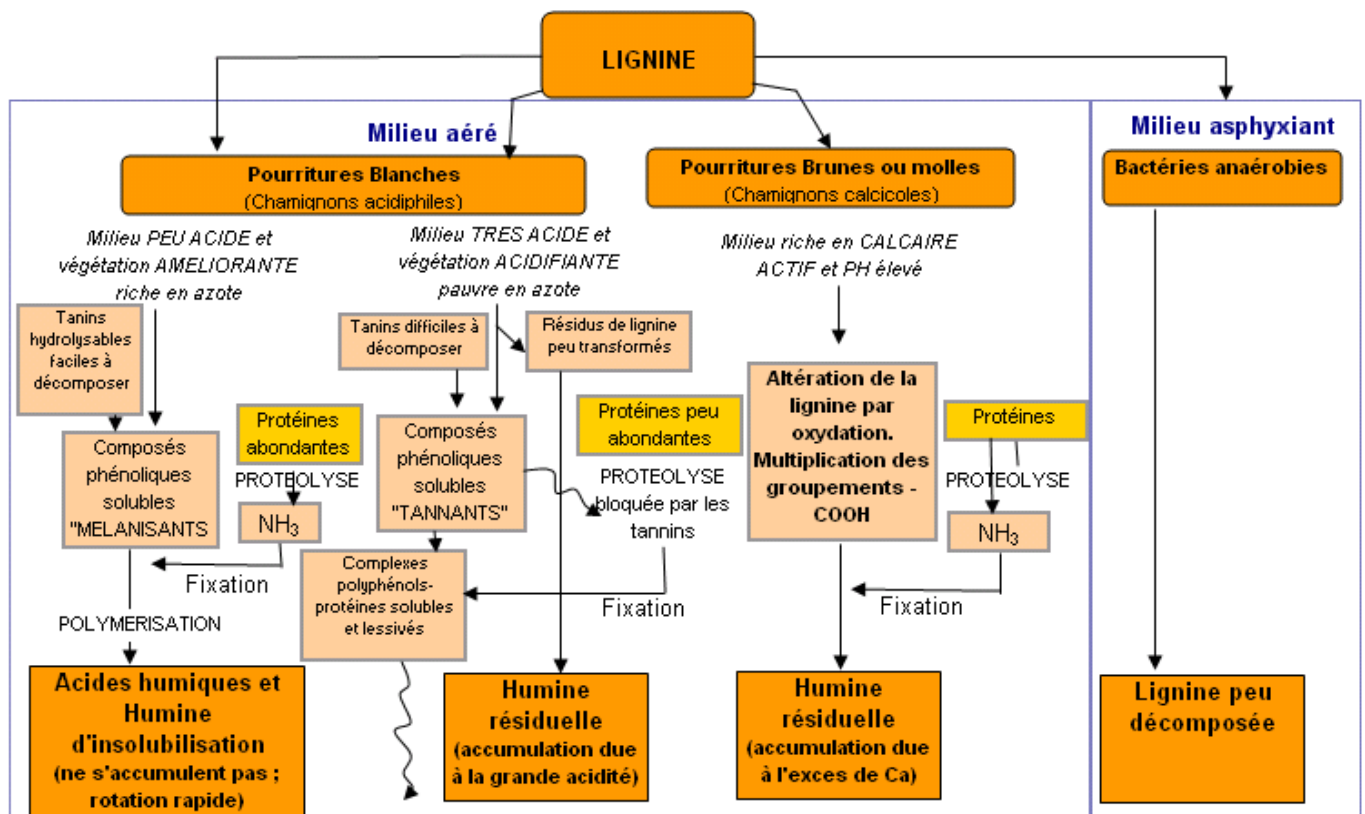
C) Phase de la biodégradation ou bioréduction :

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 :





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">• Bactéries, Champignons• Enzymes du tube digestif des animaux du sol	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">• Bactéries• Processus purement chimiques	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

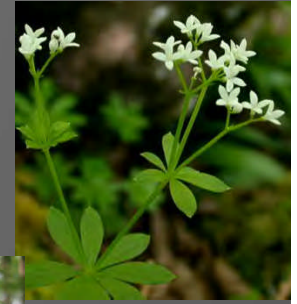
Nous renvoyons le lecteur au « Guide pratique d'observation des sols » utilisé en T.P. .

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

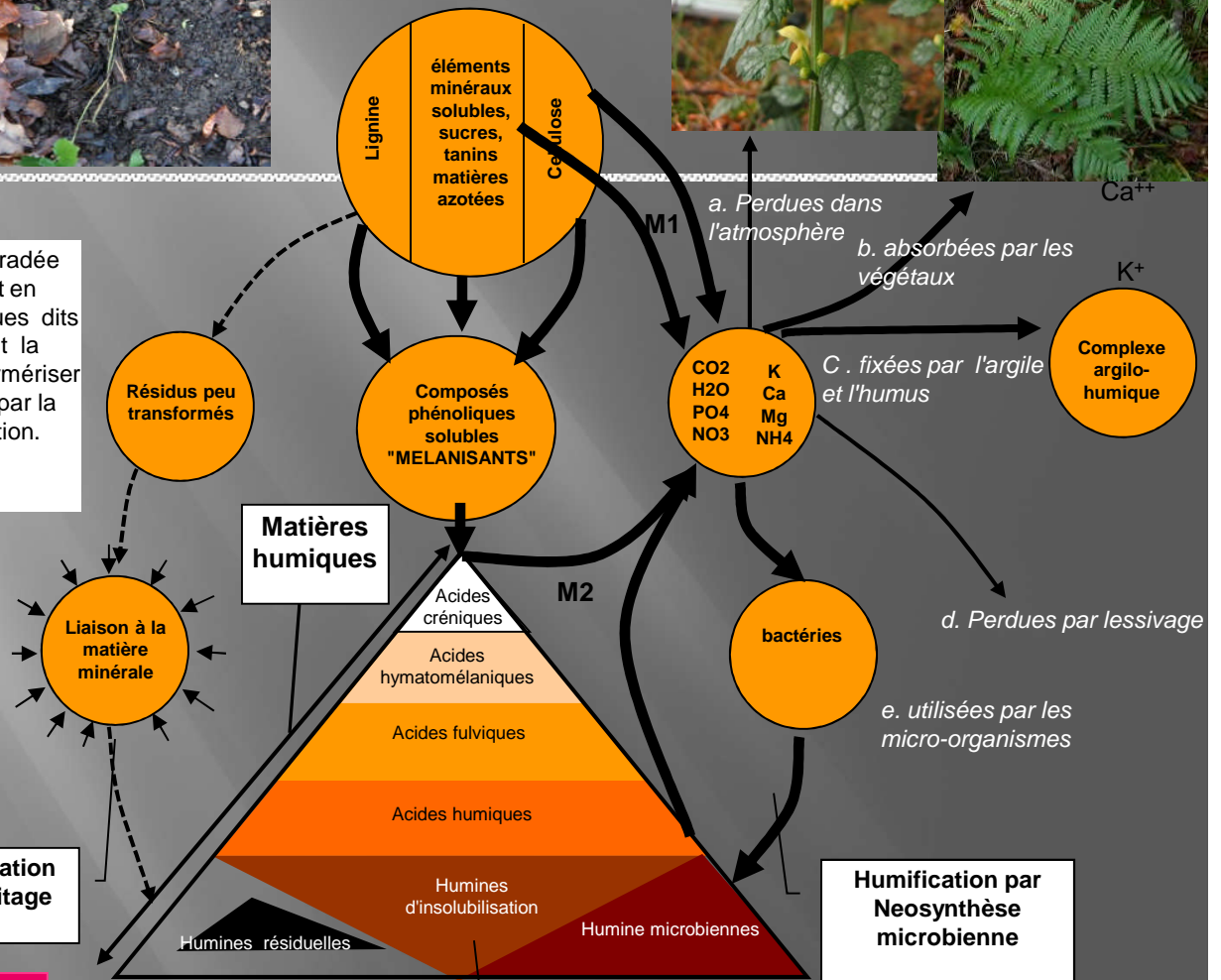
1. Les **matières organiques fraîches** sont composées de feuilles, brindilles, bois mort,... Elles contiennent de la cellulose, des sucres, de la lignine, des éléments minéraux solubles (Ca, K,...), des protéines, des tannins,... En particulier, certaines essences (charme, sorbier, frêne,...) produisent une litière dite améliorante, celle-ci est riche en calcium et en azote. Le sol est généralement assez riche, peu acide à basique.

2. La **minéralisation primaire (M1)**, qui donne du CO_2 , H_2O , NO_3^- , PO_4^{3-} , ... Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} ,... est très forte, grâce à une activité importante des bactéries.

3. Ces substances issues de la M1 peuvent prendre cinq destinations :



4. La lignine est dégradée presque entièrement en composés phénoliques dits "mélanisants" qui ont la propriété de se polymériser : c'est l'humification par la voie de l'insolubilisation.



MULL DOUX

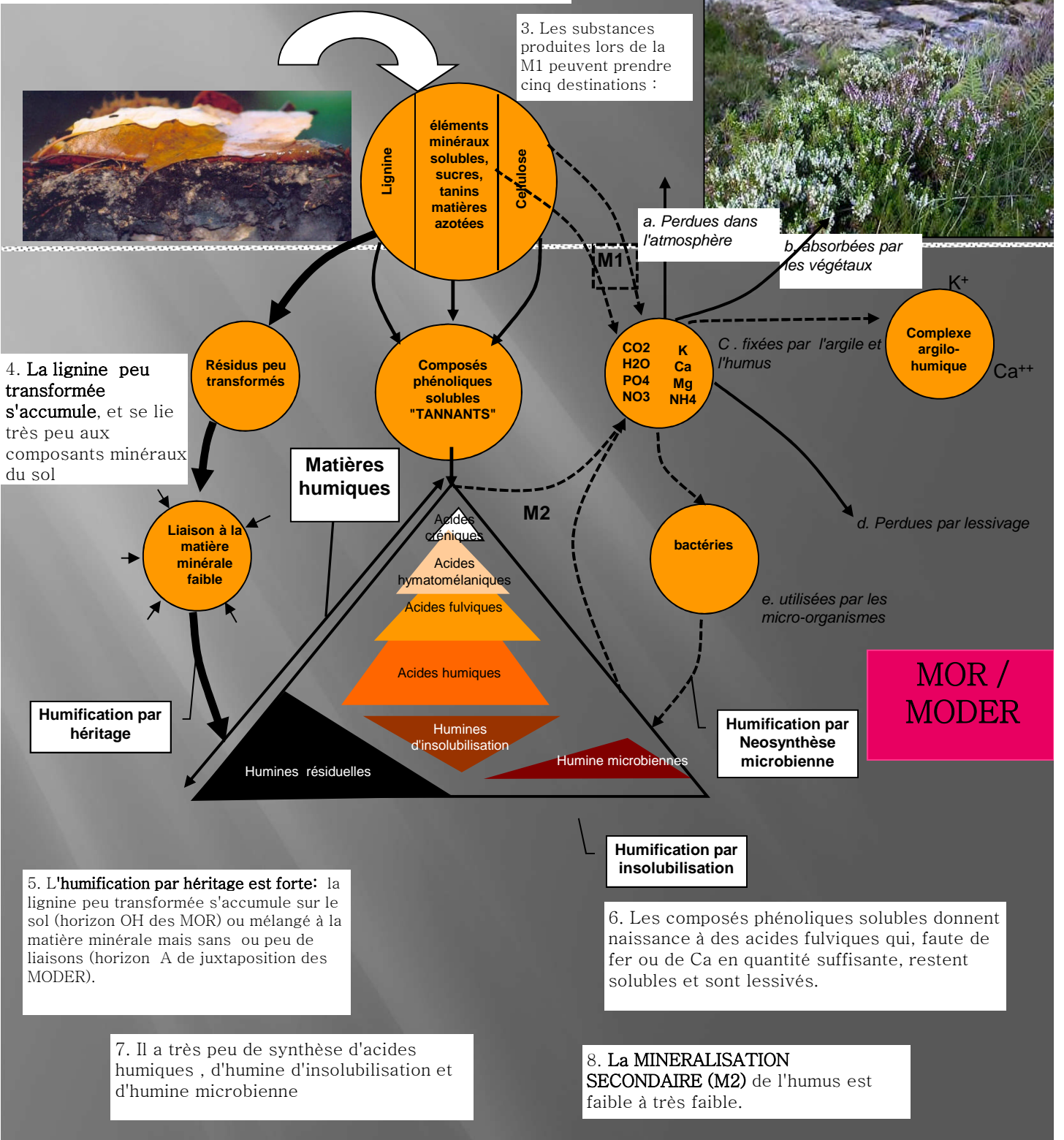
5. L'humification par héritage est faible : il reste très peu de lignine peu transformée

6. L'humification par néosynthèse microbienne est active à très active

7. La **MINÉRALISATION SECONDAIRE (M2)** de l'humus est forte : les matières humiques ne s'accumulent pas. La rotation est rapide.

1. Les **matières organiques fraîches** sont composées de feuilles, brindilles, bois mort, ... Elles contiennent de la cellulose, des sucres, de la lignine, des éléments minéraux solubles (Ca, K, ...), des protéines, des tannins, ... En sols acides, certaines litières se décomposent mal, en particulier celles produites par certains résineux (pin sylvestre, épicéa commun, ...) Ceci est dû non seulement à l'acidité du sol qui induit une activité bactérienne faible, mais aussi à la composition chimique de la litière, pauvre en bases et en azote. A noter que certains feuillus (hêtre en peuplement monospécifique) peuvent produire, en sol acide, des humus de mauvaise qualité.

2. La **minéralisation primaire (M1)**, qui donne du CO_2 , H_2O , NO_3^- , PO_4^{3-} , ... Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , ... est faible ; ceci à cause de l'acidité du sol et dans certaines litières, de la présence de tannins abondants, ainsi que de composés "tannants" difficiles à décomposer.



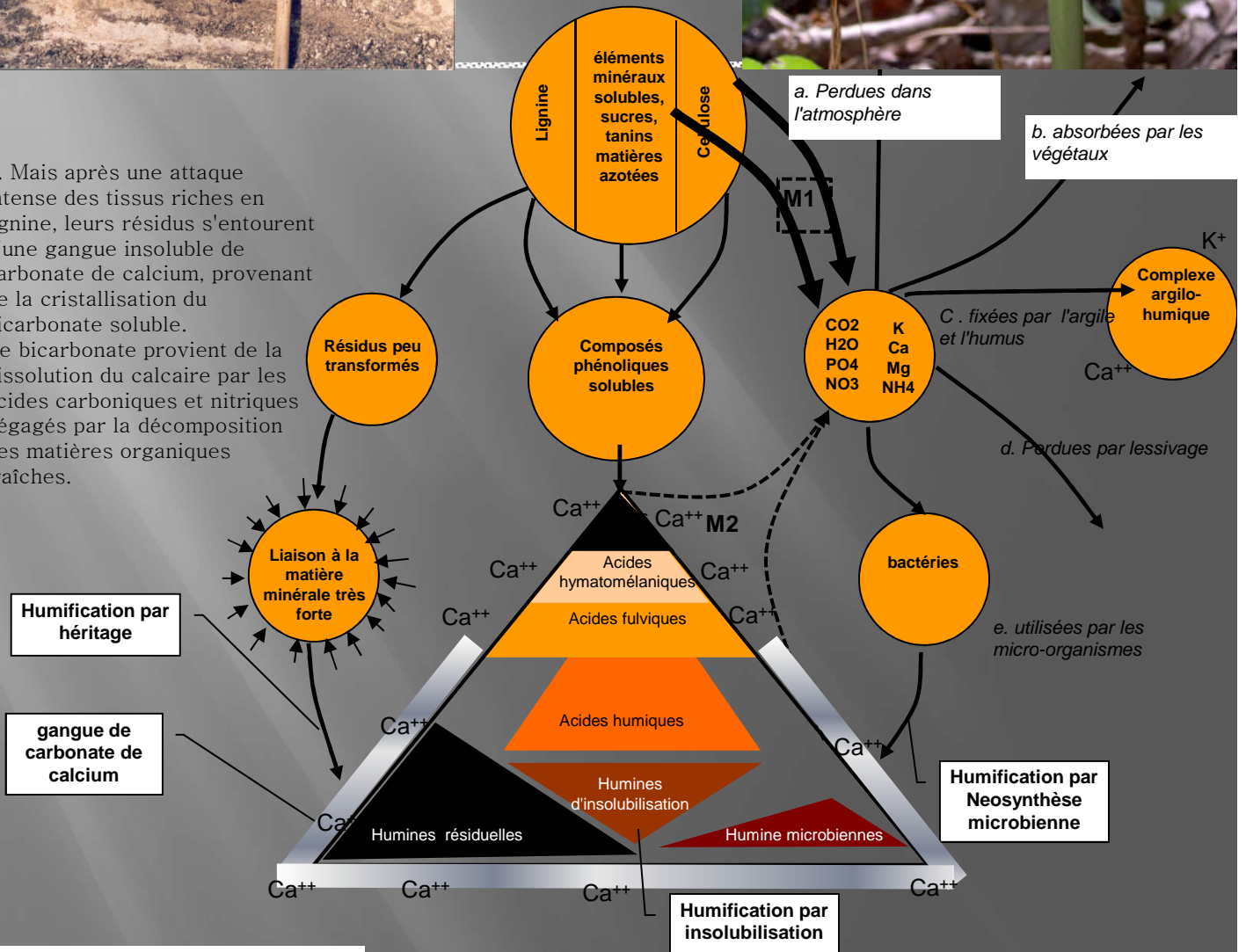
MULL CARBONATE

1. La **minéralisation primaire (M1)**, qui donne du CO_2 , H_2O , NO_3^- , PO_4^{3-} , ... Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} , ...est forte ; celle ci est stimulée par l'aération du sol, et par l'abondance du calcium.

2. Les substances produites après minéralisation primaire peuvent prendre cinq destinations :



3. Mais après une attaque intense des tissus riches en lignine, leurs résidus s'entourent d'une gangue insoluble de carbonate de calcium, provenant de la cristallisation du bicarbonate soluble. Ce bicarbonate provient de la dissolution du calcaire par les acides carboniques et nitriques dégagés par la décomposition des matières organiques fraîches.



4. Des ions Ca^{++} abondants précipitent les acides fulviques et humiques, limitant l'humification par insolubilisation

5. L'ensemble des composés humiques, protégés par cette gangue calcaire et par les ions Ca^{++} , résiste à la minéralisation secondaire qui est bien plus faible qu'en sols non calcaires : les matières humiques tendent à s'accumuler, surtout sous forme d'humines. L'horizon A de ces sols peut ainsi prendre une couleur très foncée jusqu'à noire.