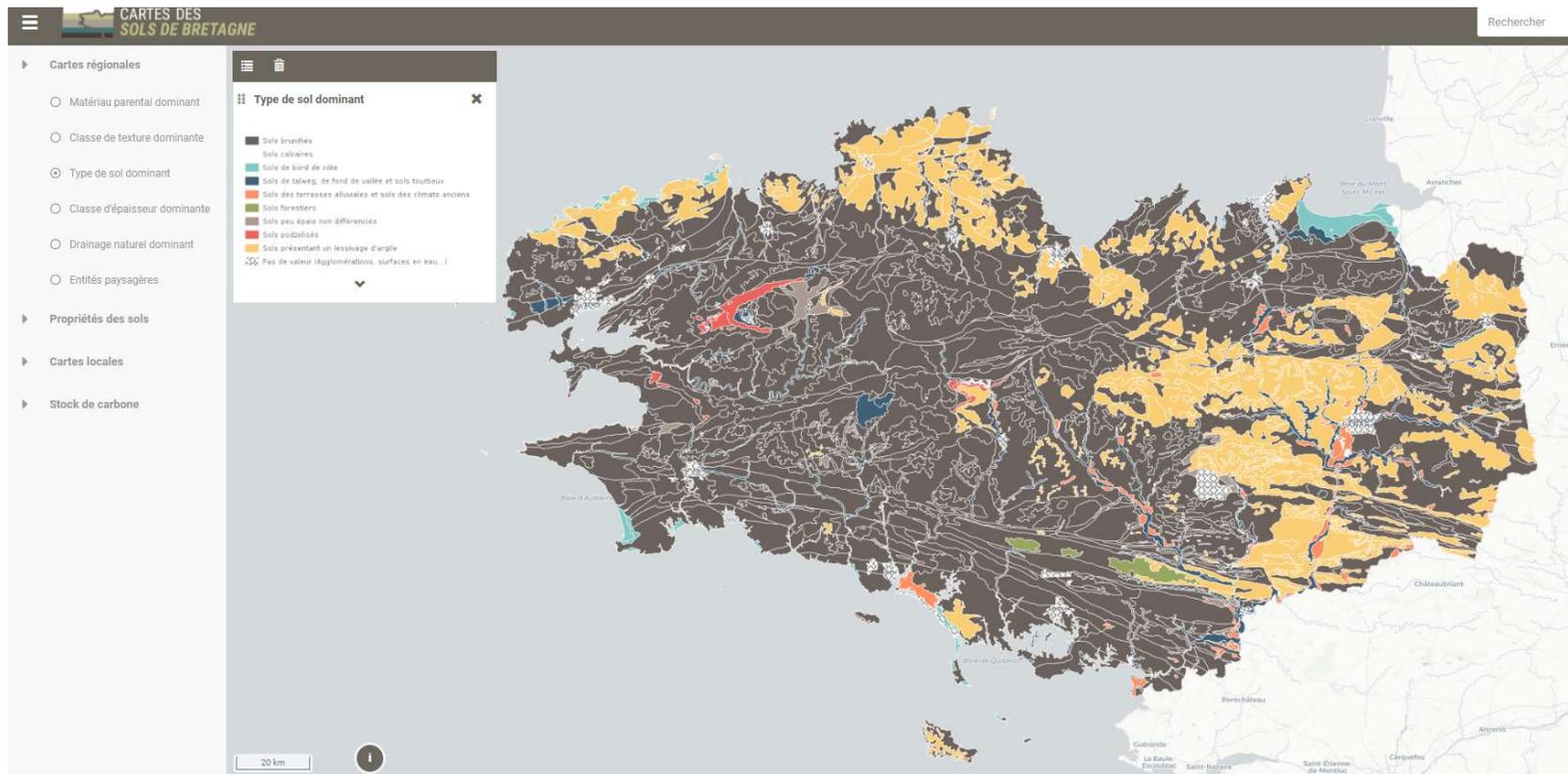


BG-B Les sols



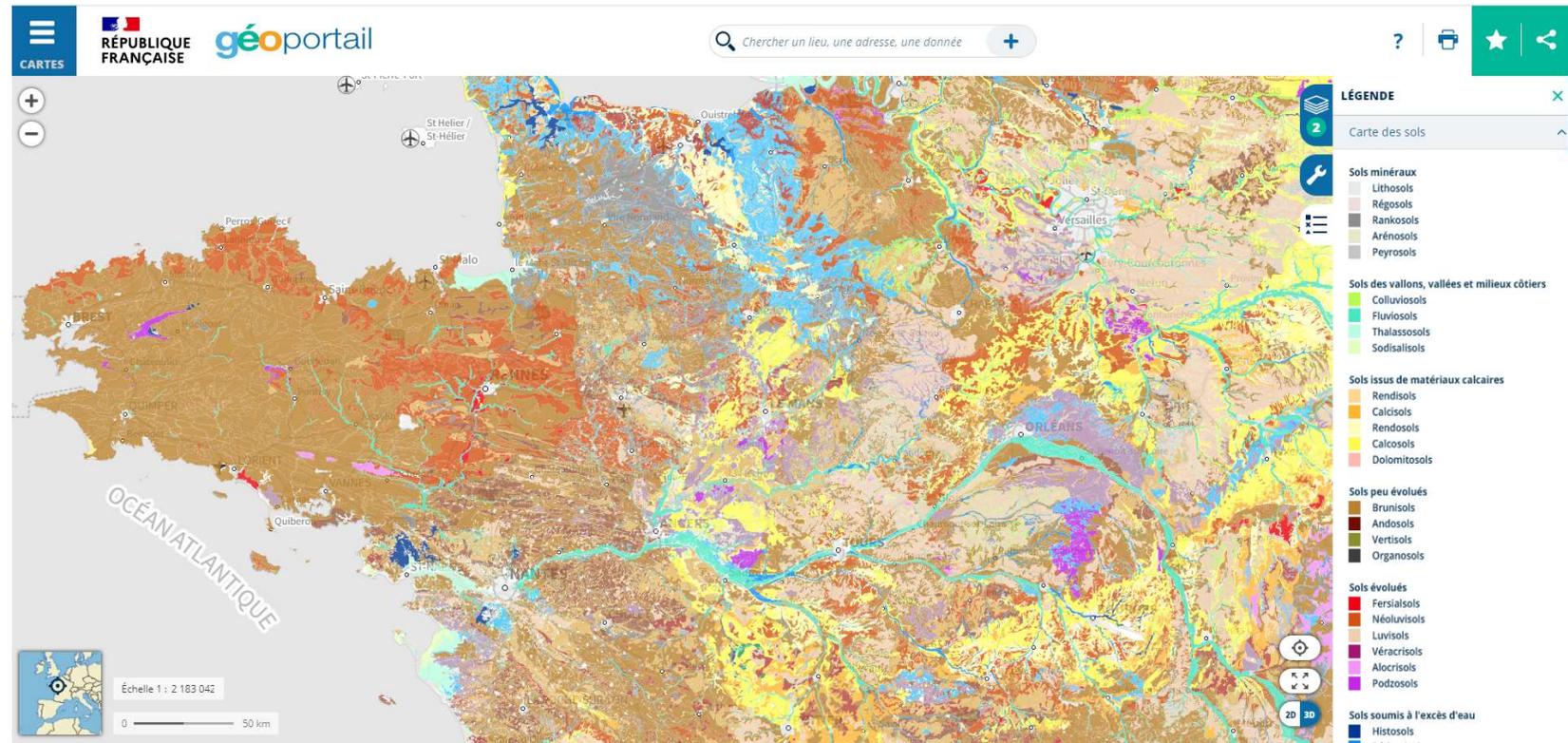
Diversité des sols : consulter <http://geowww.agrocampus-ouest.fr/solsdebretagne/#>



OU géoportail :

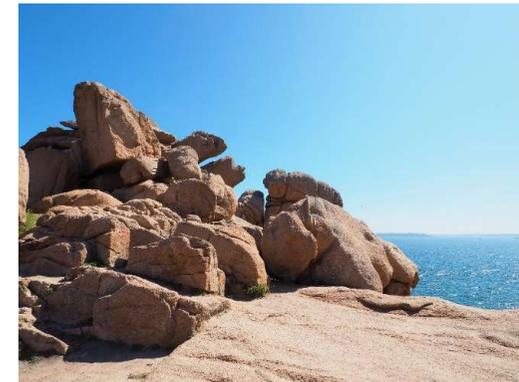
<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>

Carte de sol



1.1- Le sol : un système écologique complexe

a. Le sol : interface hydrosphère, atmosphère, lithosphère : l'exemple d'un sol brun (brunisol)



Profil d'un sol brun typique (brunisol)

- Horizon O : organique
Surtout Oh
- Horizon A : humifère
- Horizon S : minéral
- Horizon C : roche mère



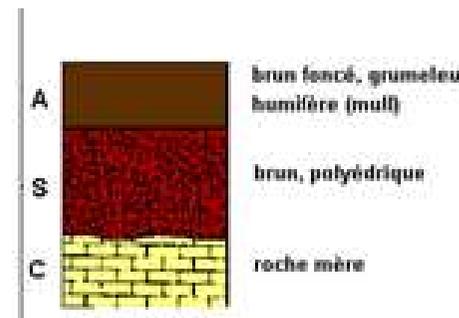
Rappel TP : horizon type A / S (=B) / C

Horizon O : humus type mull

Horizon A : Ils sont constitués d'un mélange de matière organique et de matière minérale. Ils sont situés à la partie supérieure de la couverture végétale, sous l'horizon O s'il existe. Les horizons A sont structurés par l'activité biologique (faune, racines...) qui contribuent à la formation de complexes argilo-humiques.

Horizon S : ils sont formés par l'altération des minéraux primaires (hydrolyses, oxydation, décarbonatation...) qui libèrent notamment des argiles et des oxy-hydroxydes de fer. Ils correspondent aux horizons B des anciennes classifications.

Profil d'un sol figure 3



Sol : un carrefour multifonctionnel

Atmosphère

Biosphère



Hydrosphère

Lithosphère

b. Les composants minéraux du sol Désagrégation physique et / ou altération.

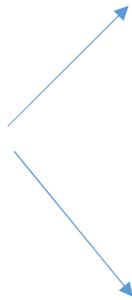
Lien sup : altération des roches



Argiles

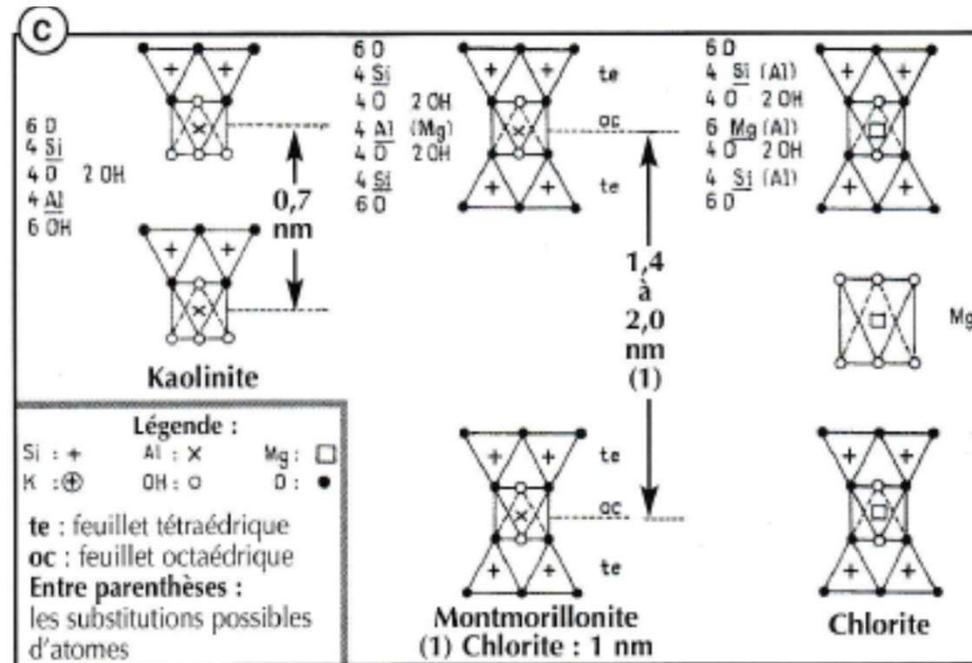
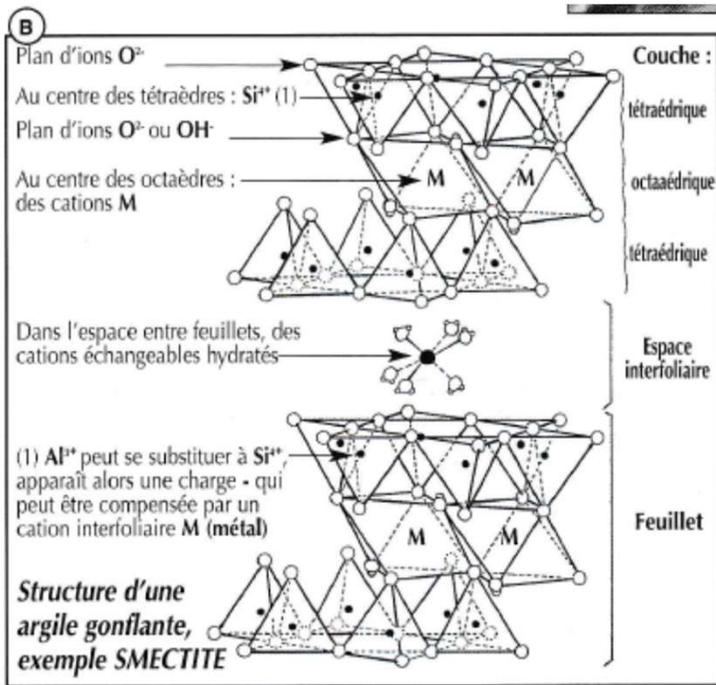
Deux sens possibles

Argiles pour le géologue : phyllosilicates en feuillet

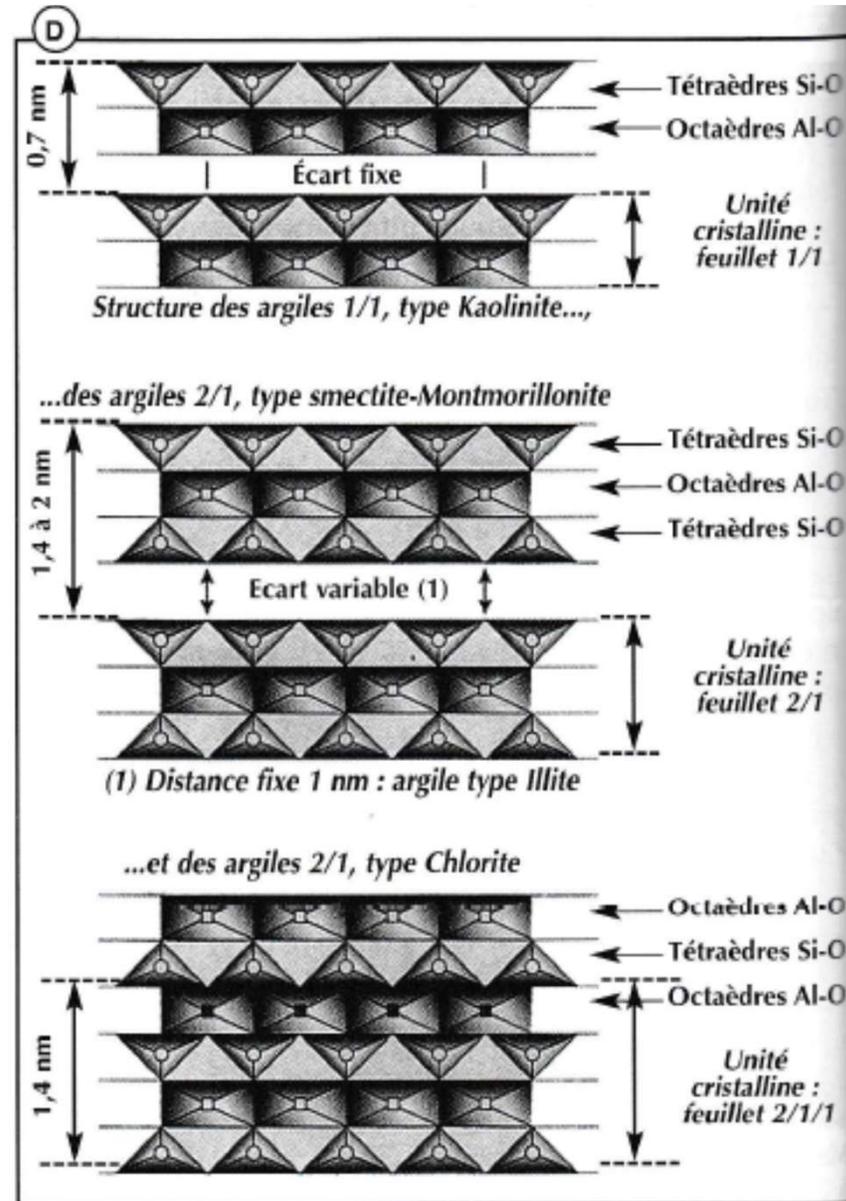


Argiles pour le pédologue : particule minérale de taille $< 2 \mu\text{m}$
(donc un quartz $< 2 \mu\text{m}$ est une particule argileuse pour le pédologue...)

Rappel argiles : complément 2



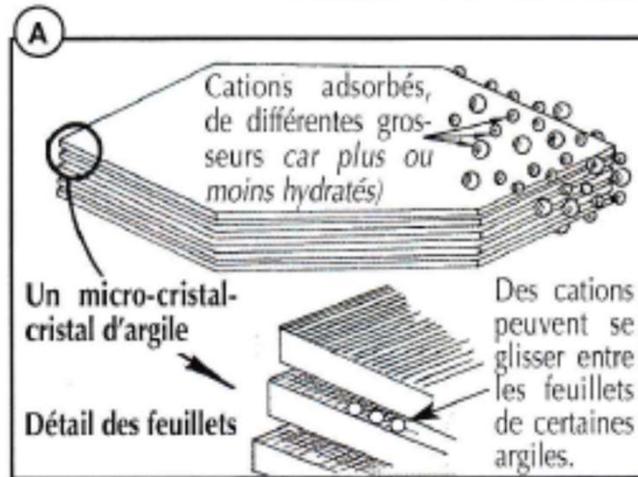
Rappel argiles



Feuillet argileux et gonflement / retrait

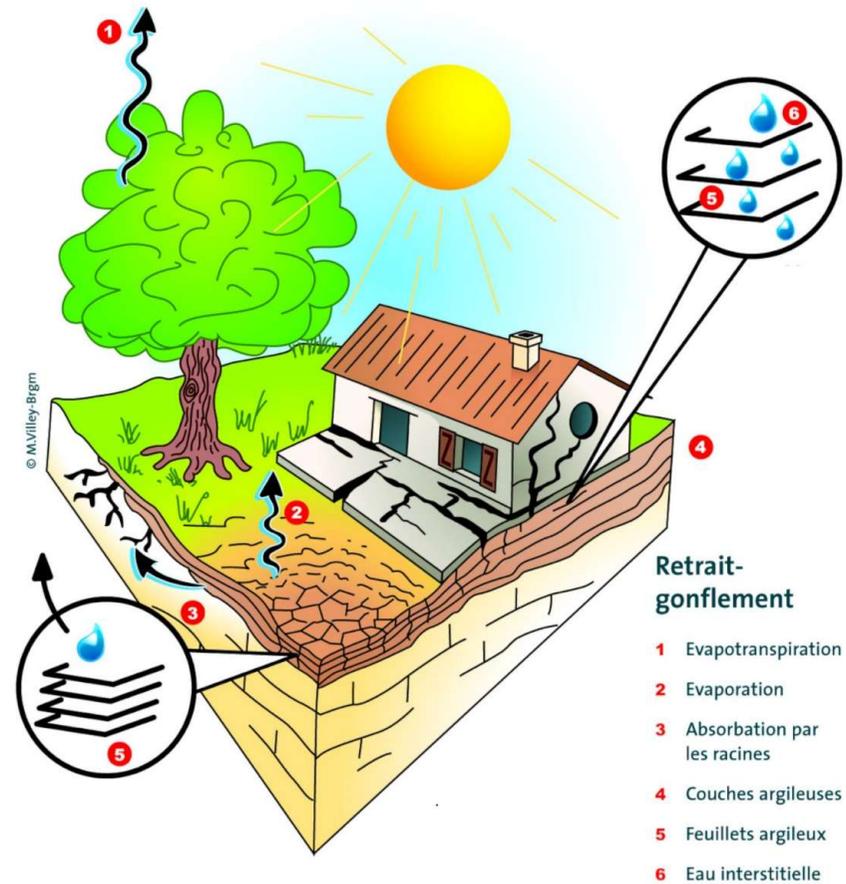
Feuillet et eau entre les feuillets

Planche 1-24 - LA STRUC



Retrait gonflement et risque

Dépend de la nature du sol



Analyse granulométrique : texture du sol

Séparation par la taille : figure 2



Tableau des tailles :

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

Argile, limon et sable constituent la terre fine, par opposition aux éléments grossiers qui comportent les fractions suivantes :

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

Bilan : différentes textures pour un sol

Triangle des textures : voir TP n°1

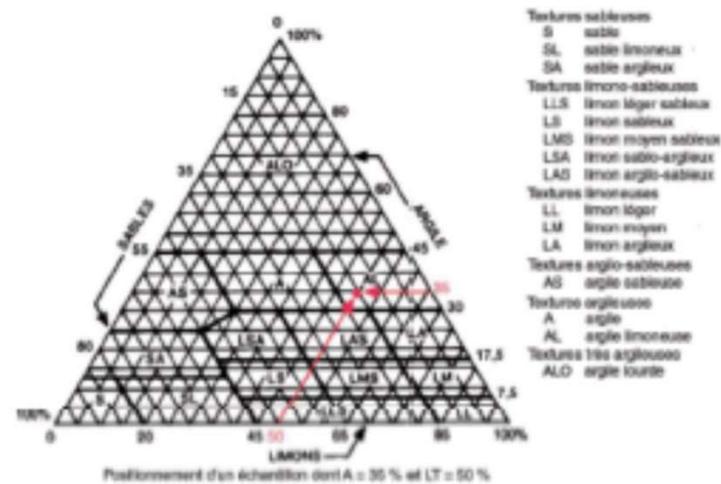
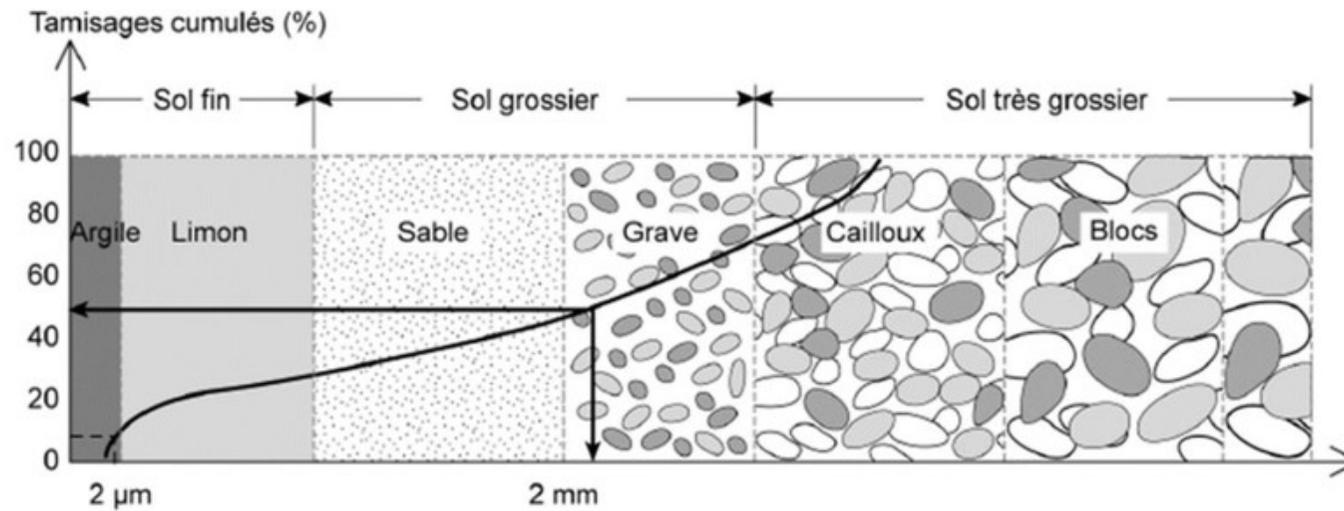


Figure 7.1. Service de la carte des sols de l'Alsine. Diagramme de classification détaillée des textures (Jamagne, 1967, modifié depuis). À l'origine, LS et LMS n'étaient pas distingués.

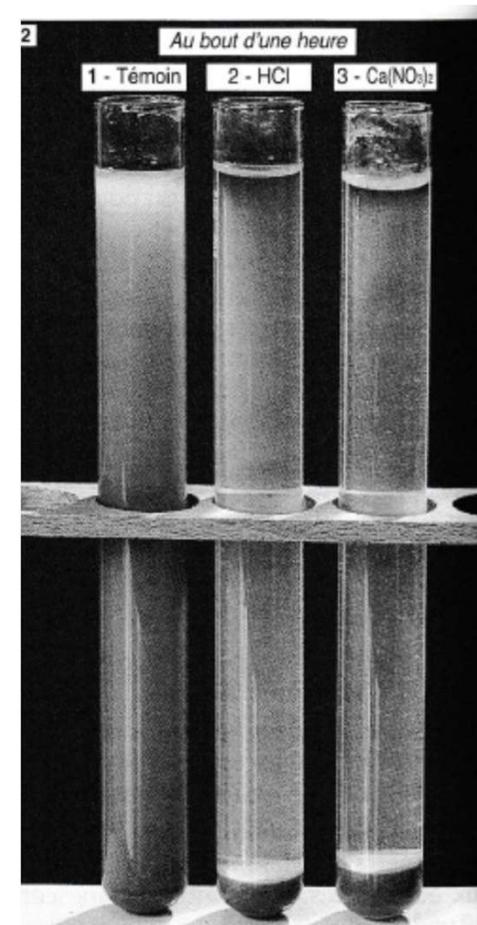
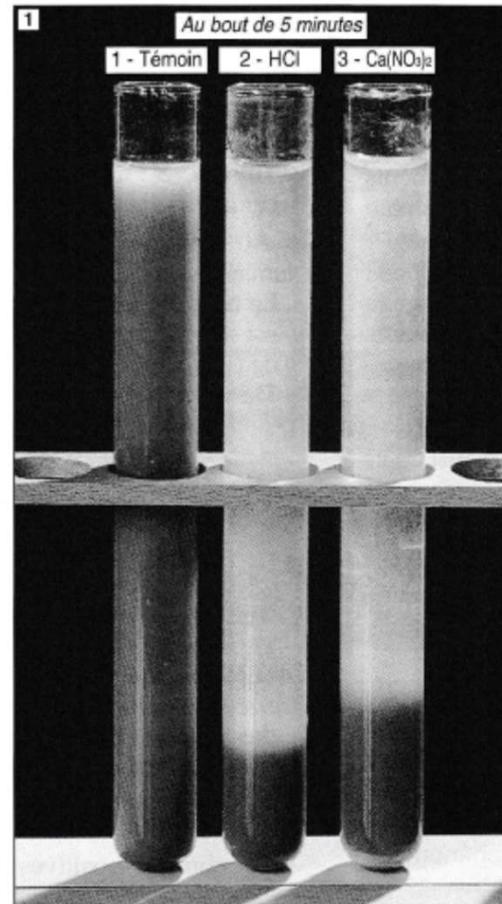
Classes granulométriques

En fonction des % de taille :

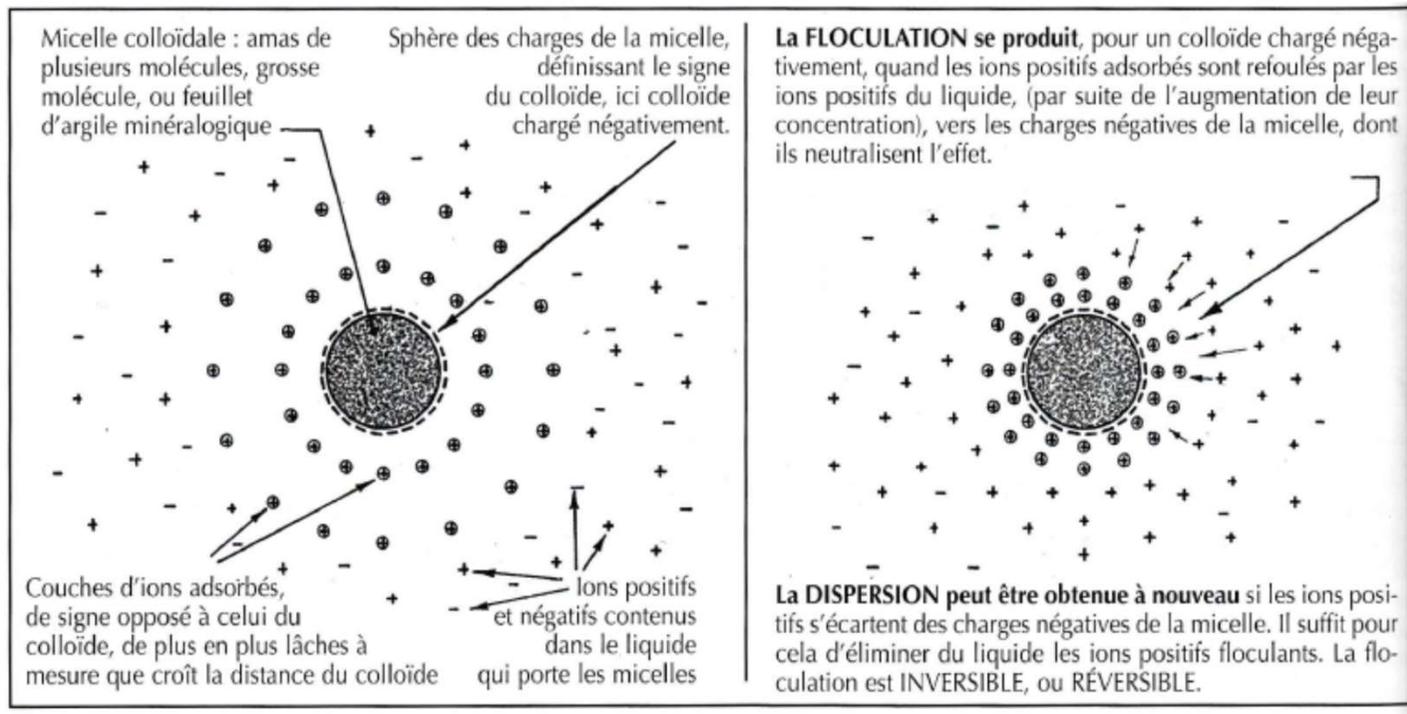


Rappel TP flocculation

- Argiles dispersées
- argiles flocculées



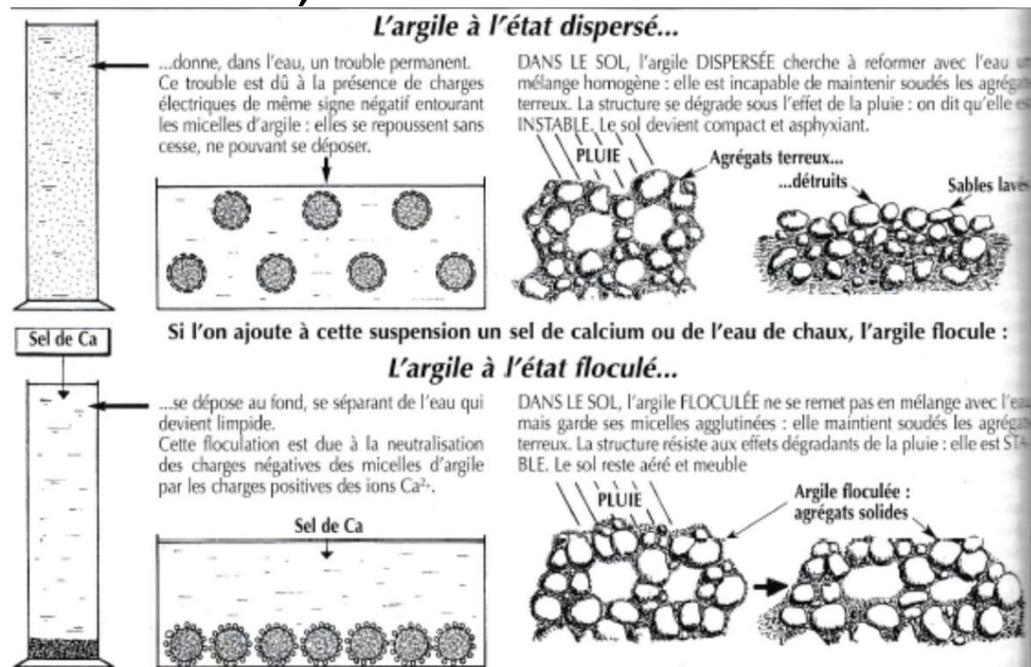
Floculation réversible



Conséquence sur la structure du sol (complément 3)

Argiles dispersés : sol instable, compact et asphyxiant

Argiles floculés : sol stable, aéré et meuble

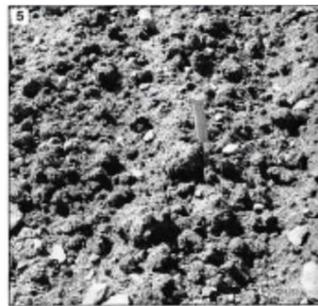


Importance de la floculation

Argiles dispersées (après la pluie et après dessèchement) :

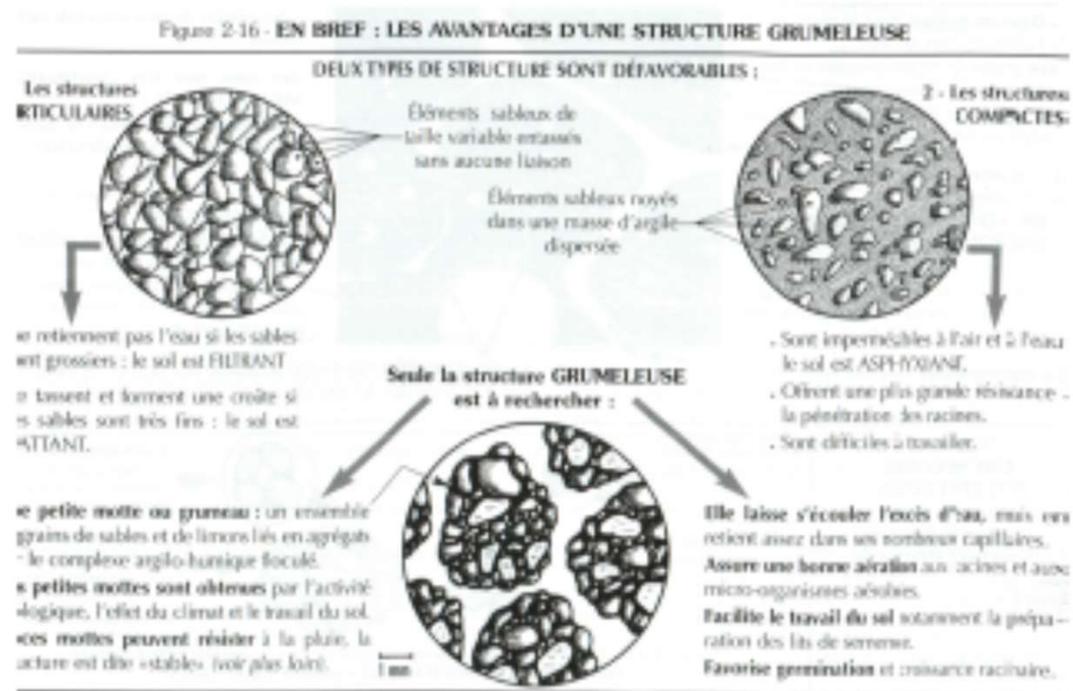


Argiles floculées :
peu de désagrégation



Notion de structure du sol

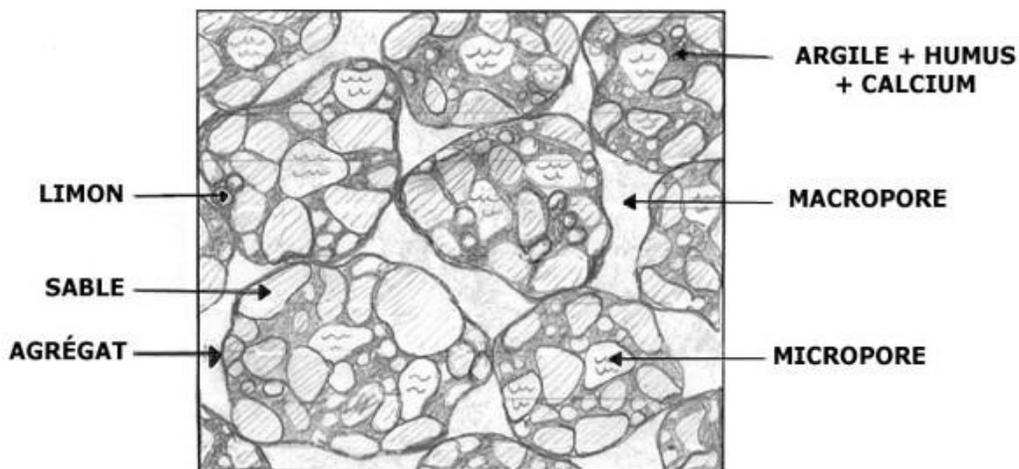
Bilan / structure : **particulaire**, **compactes** ou **grumeleuse**



Importance de la structure grumeleuse

Nombreux agrégats et des pores (voir partie 1.2)

Si argiles flocculées : sol stable et structure **grumeleuse** (figure 3)



Les principaux constituants chimiques du sol

4 familles d'éléments principaux, souvent sous forme d'ions :

Cations échangeables : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), potassium (K^+)

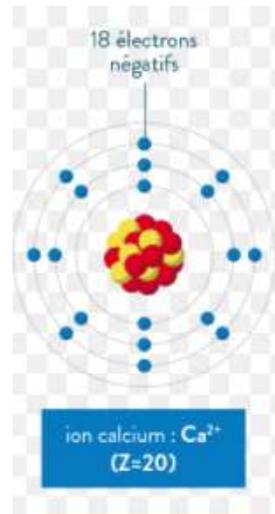
Anions principaux : azote (NO_3^-), phosphore (HPO_4^{2-} ou PO_4^{3-}), soufre (SO_4^{2-})

Trois éléments au rôle pédologique et physiologique : fer (Fe^{2+} réduit, Fe^{3+} oxydé), aluminium (Al^{3+}), manganèse (MnO_4)

Oligo-éléments : cuivre, zinc, cobalt, molybdène, bore,

Calcium : importance de l'ion Ca^{2+}

Roches et ions



Chaulage : environ 300 g par m^2 soit CaCO_3 , soit CaO (chaux vive)



Remarque : oxydo-réduction et couleur

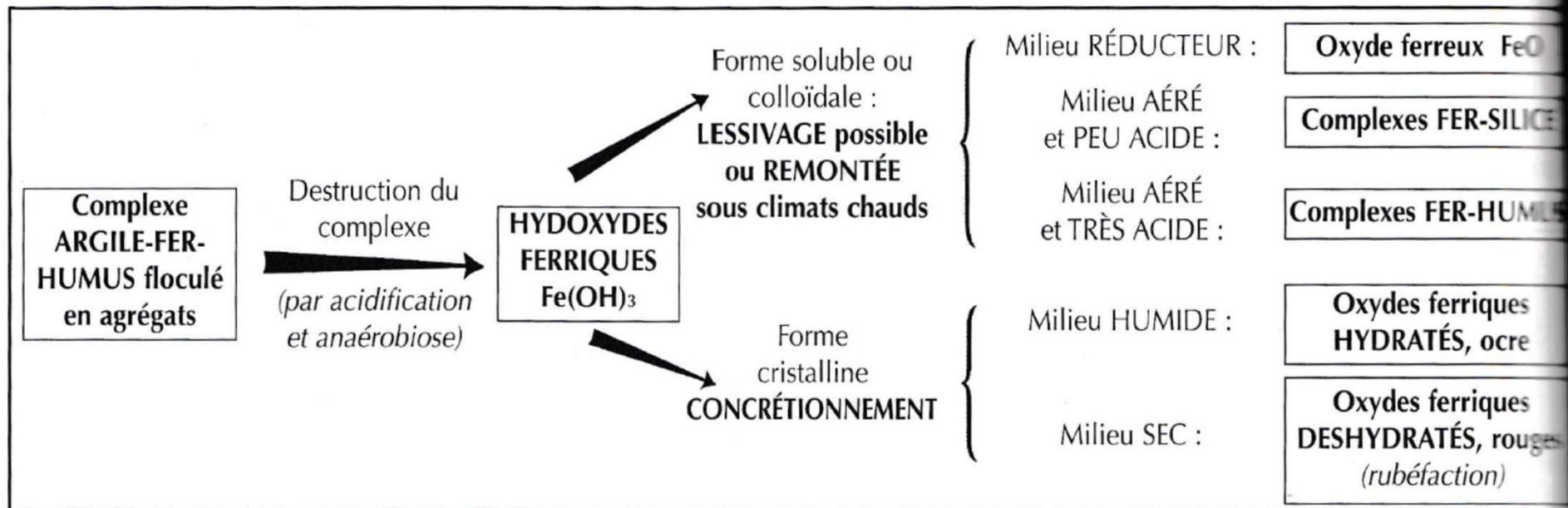
Le fer se trouve sous deux états : soit réduit (Fe^{2+}), de couleur gris-bleue ; soit oxydé (Fe^{3+}), de couleur rouille.



Complément 4

Evolution des oxydes de fer lors de la dégradation des sols bruns

Figure 5-22 - ÉVOLUTIONS POSSIBLES DES OXYDES DE FER AU COURS DE LA DÉGRADATION DES SOLS BRUNS
(Dessin Ph. Duchaufour, «Pédologie» - Masson - Édition 1965)



c. Les constituants organiques

La litière : source de la matière organique du sol

Litières : ensemble des matières organiques encore intactes ou peu transformées



Le végétal : cellulose, lignine, plus un peu de protéines, de sucres solubles...

Cellulose

Lignine

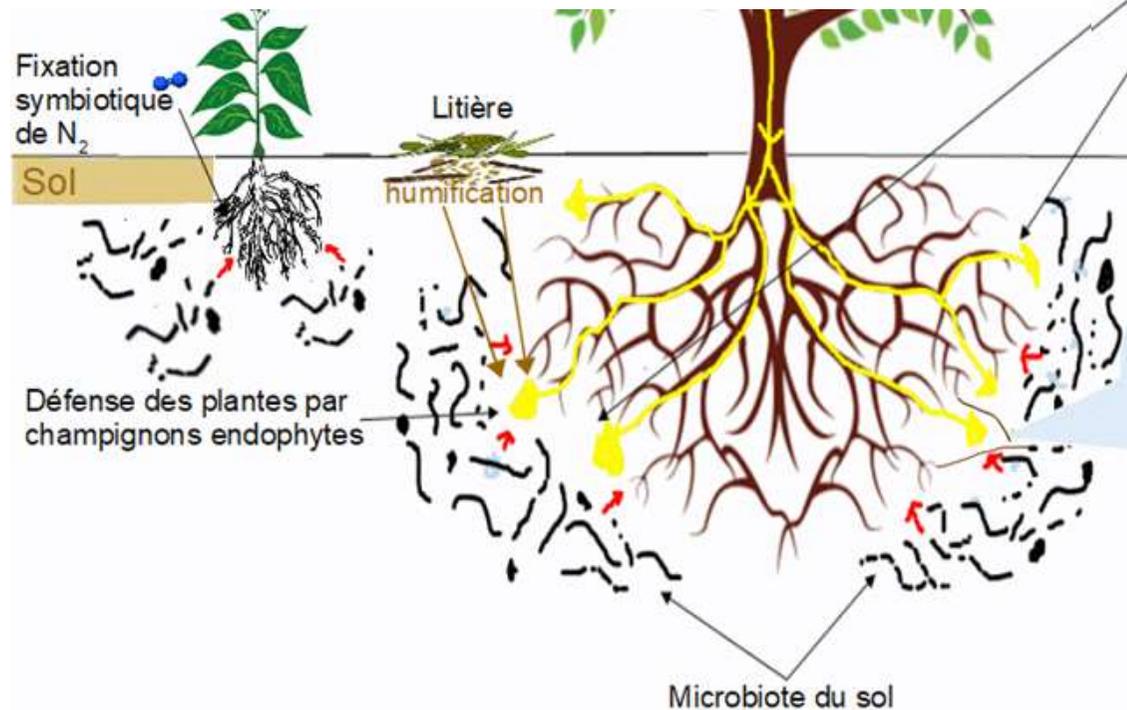


Biomasse aérienne, biomasse racinaire



Exsudats et urines complètent la litière

Importance des exsudats (figure 4)



Exsudation racinaire de métabolites (sucres, acides organiques, acides aminés, acides gras, peptides)



Rétroaction au niveau de la rhizosphère

Complément 5

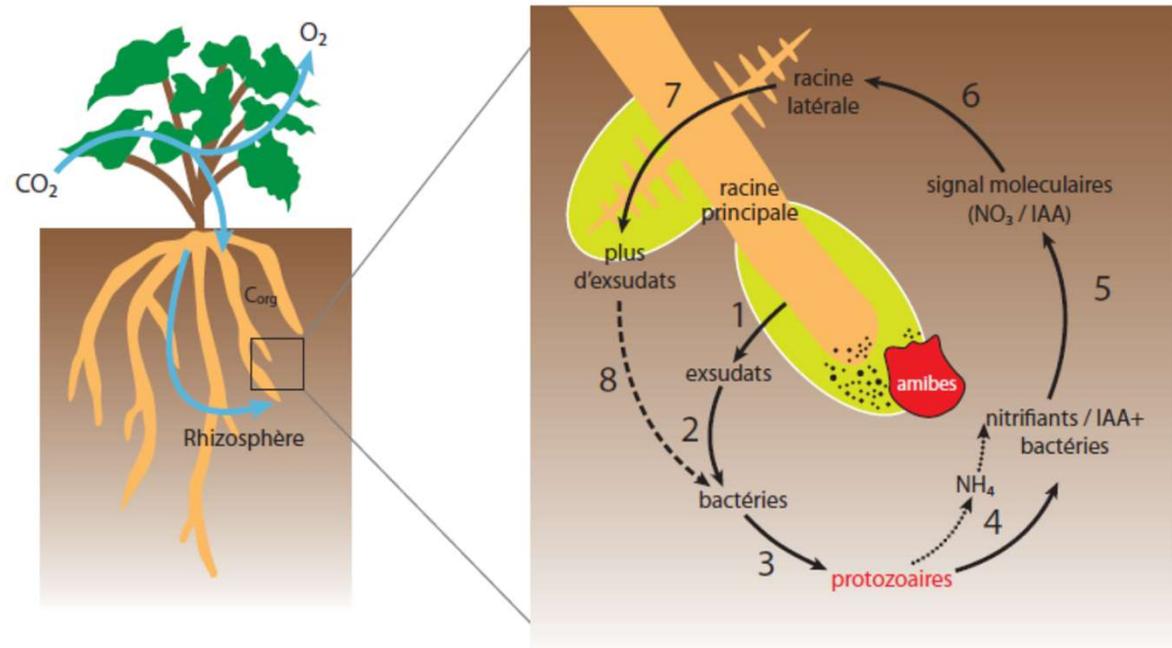
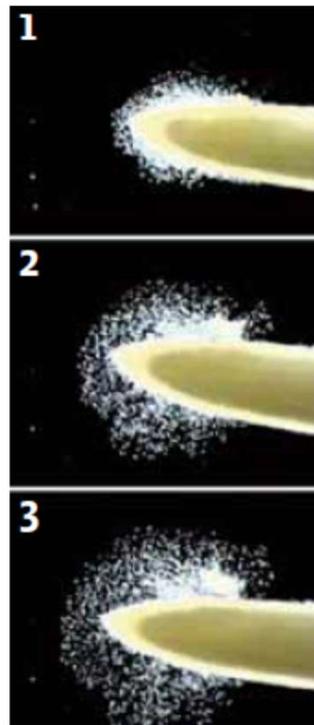


Fig. 2,23 : Modèle conceptuel de boucles de rétroaction au sein d'une rhizosphère impliquant les différents membres de la chaîne alimentaire du sol. L'exsudation racinaire (1) stimule la croissance de communautés bactériennes variées (2) et par la suite, consommateurs tels que les protozoaires (3). L'ammoniac est excrété par les protozoaires et la prédation sélective favorise les bactéries nitrifiantes et la production d'acide indole-3-acétique (IAA⁺) (4). La libération de molécules de signalisation (5), tels que le NO₃⁻ et l'IAA, induit la croissance des racines latérales (6), conduisant à une libération plus importante d'exsudats (7), la croissance ultérieure des bactéries (8), etc. De Bonkowski 2004, reproduite avec la permission de New Phytologist

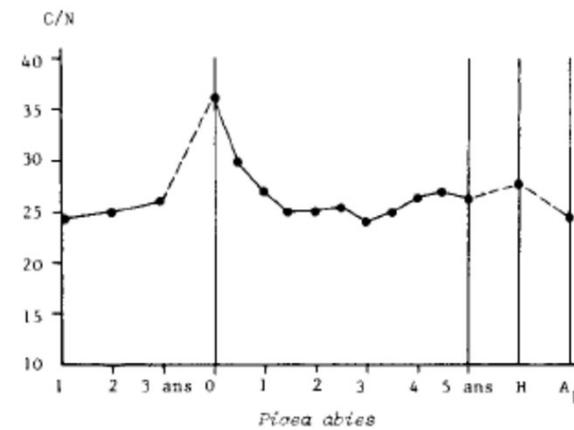
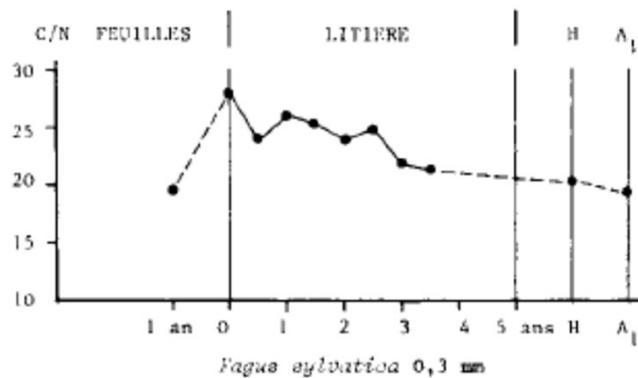
Exsudats



C'est au niveau de l'extrémité de la racine, au niveau de sa coiffe, que les exsudats racinaires, sous la forme de mucilages, sont émis. Ici, une racine primaire de maïs de 1 mm de diamètre. La sécrétion de mucilage a été photographiée au bout de 1 min puis 3 puis 9, dans une solution d'eau.

Importance du rapport C/N

Exemple d'évolution litière de Hêtre / Pin :



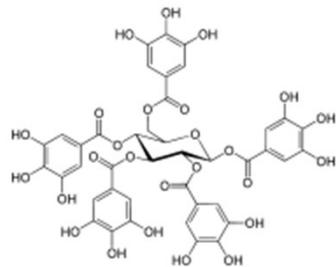
Litière améliorante ou acidifiante

Améliorantes : herbacées ou certains feuillus

Acidifiantes : conifères, rhododendrons, bruyères



Tanins :



Transformation de la matière organique morte en humus.

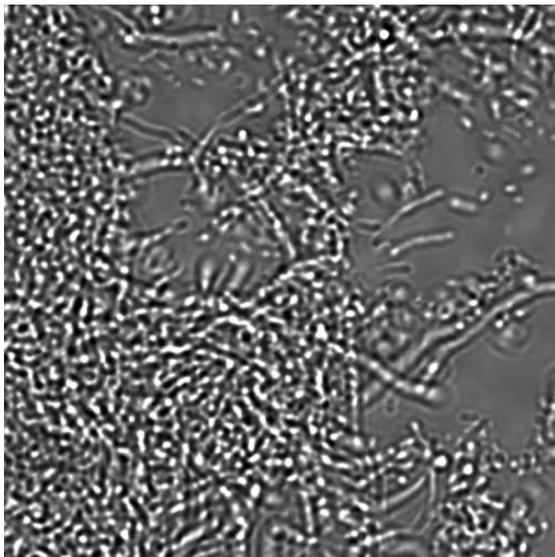
Fragmentation par la faune du sol

Lien TP Sol n°2 et partie 1.1.d



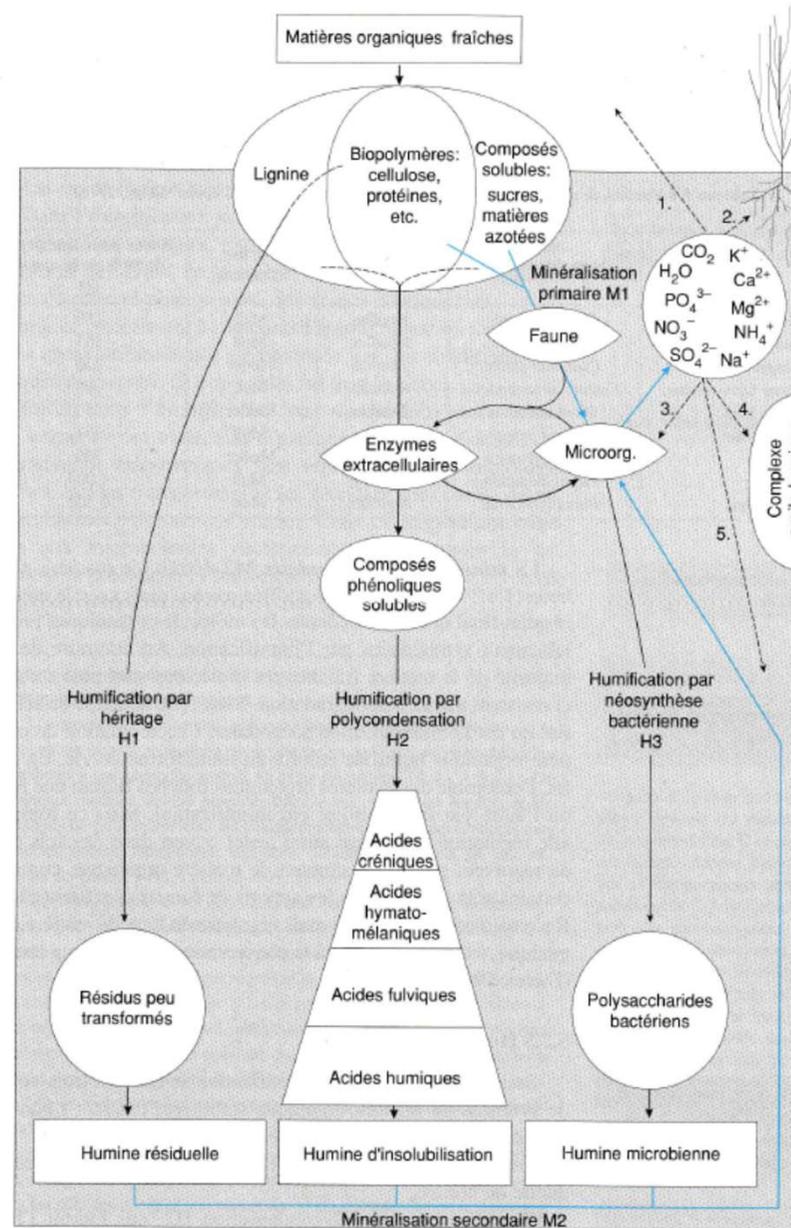
Action des décomposeurs : bactéries et champignons du sol

Recyclage de la matière par les décomposeurs
Bactéries hétérotrophes et champignons du sol.



Humification (complément 8)

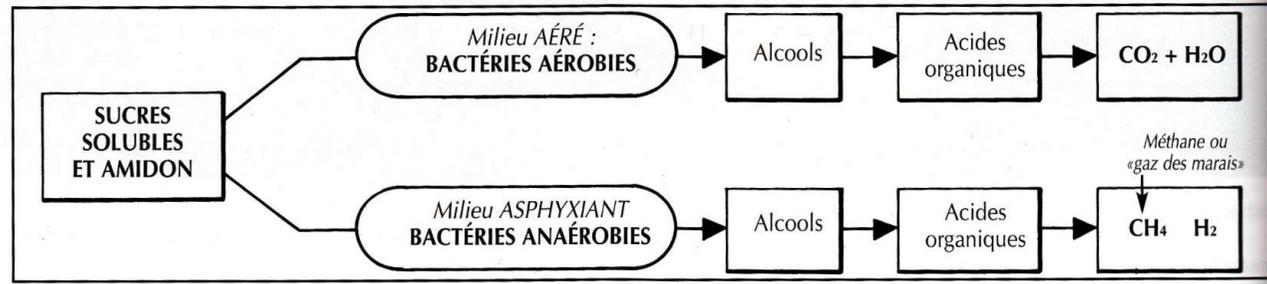
Trois types
d'humification conduisent
à l'humus



Les décompositions

Figure 7-2 - LA DÉCOMPOSITION DES GLUCIDES SIMPLES : SUCRES ET AMIDON

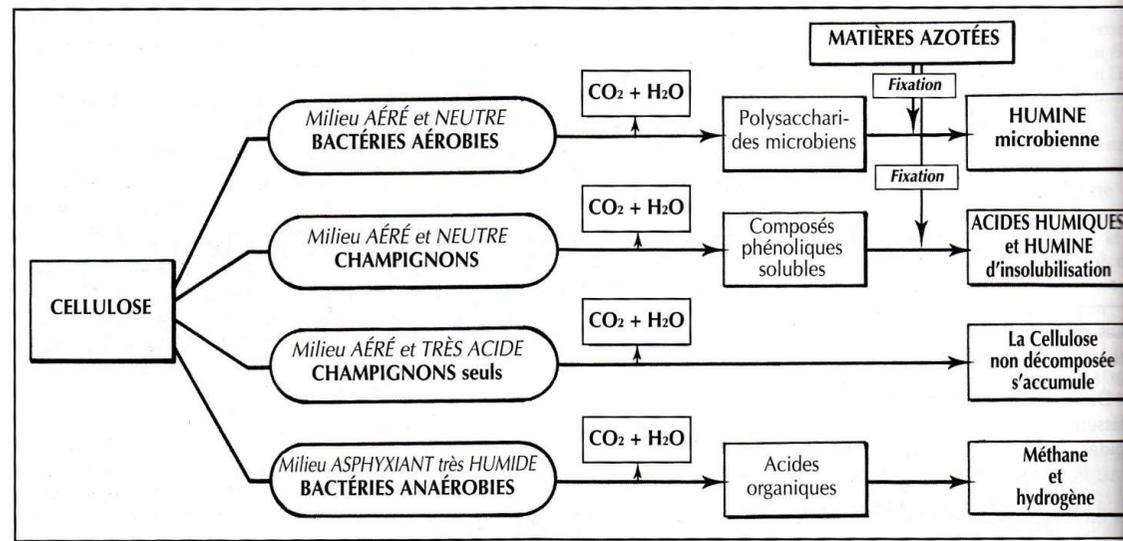
En milieu AÉRÉ, les sucres solubles et l'amidon sont les premiers attaqués : ils provoquent la prolifération des bactéries, qui les oxydent complètement, restituant ainsi au sol et à l'atmosphère le CO₂ et l'eau qui ont servi à les construire par la photosynthèse



Décomposition de la cellulose

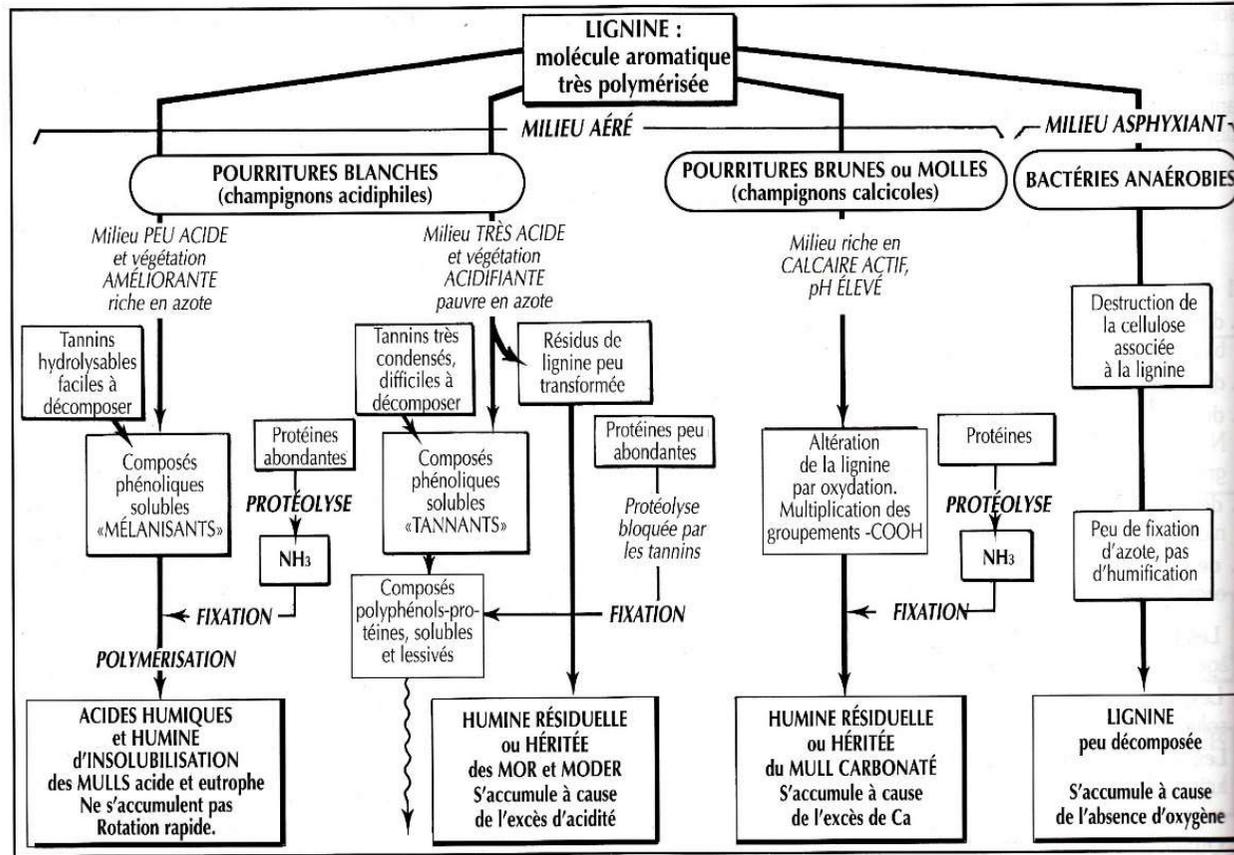
Figure 7-3 - LA DÉCOMPOSITION DE LA CELLULOSE, ou CELLULOLYSE

- En milieu AÉRÉ et NEUTRE, la cellulose sert à la synthèse de l'humus.
- En milieu AÉRÉ mais TRÈS ACIDE, la cellulose, non décomposée, s'accumule.
- En milieu ASPHYXIANT, la cellulose disparaît complètement, ne laissant que des gaz.



Décomposition lignine

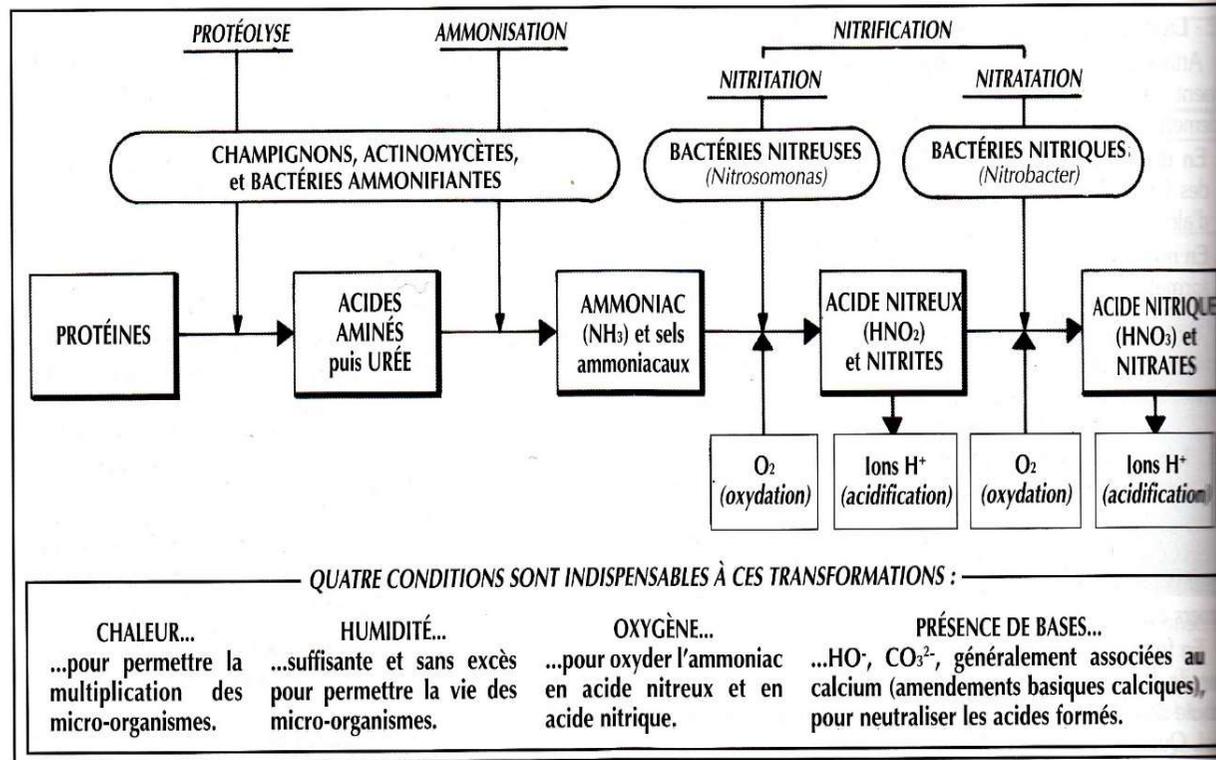
Figure 7-6 - LA DÉCOMPOSITION DE LA LIGNINE ou LIGNINOLYSE



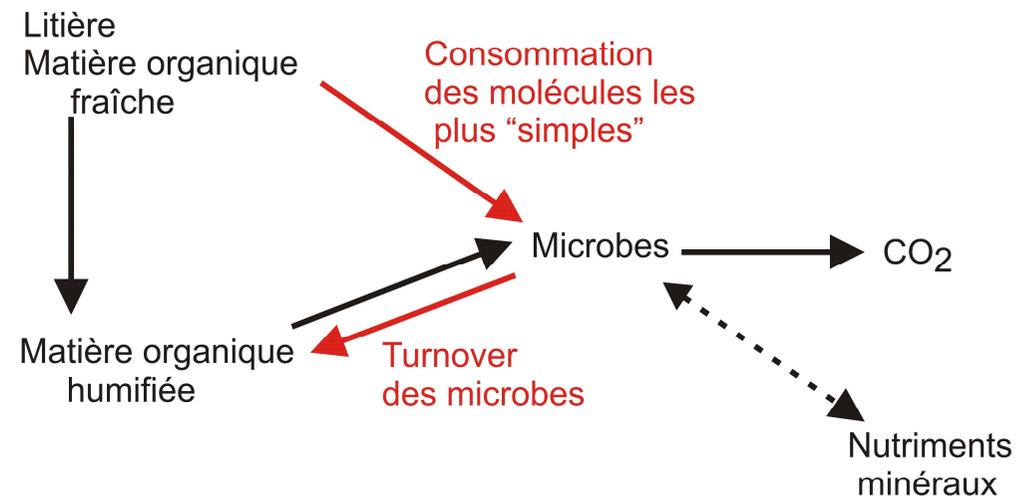
Protéolyse.

Figure 7-7 - LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES AZOTÉES ou PROTÉOLYSE, en milieu AÉRÉ et PEU ACIDE

Ce schéma concerne aussi bien la protéolyse des matières organiques fraîches, lors de la minéralisation primaire M1, que la protéolyse de l'humus lors de la minéralisation secondaire M2.

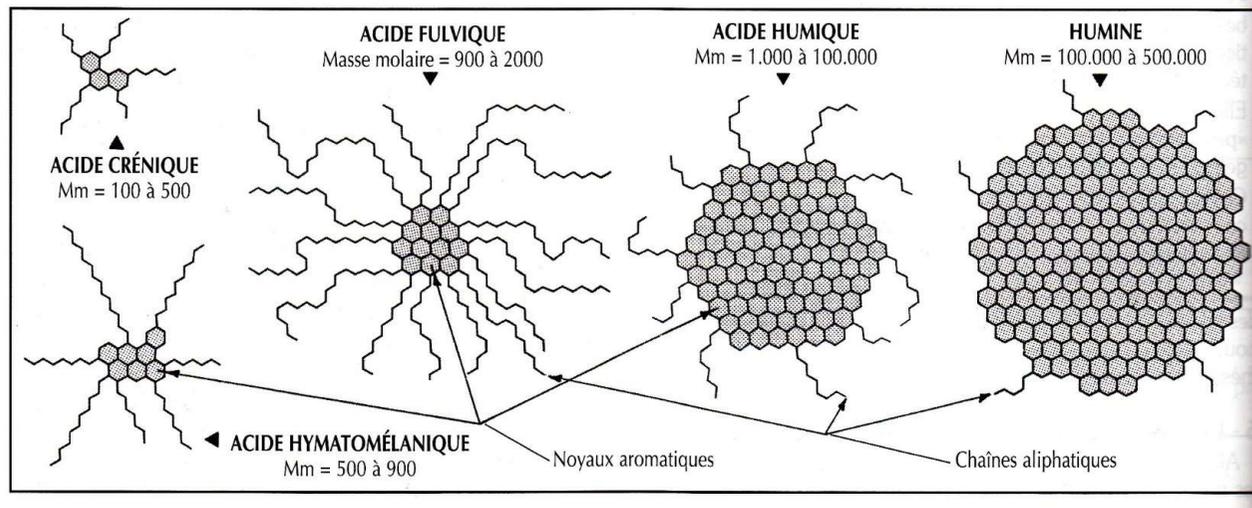


Humification



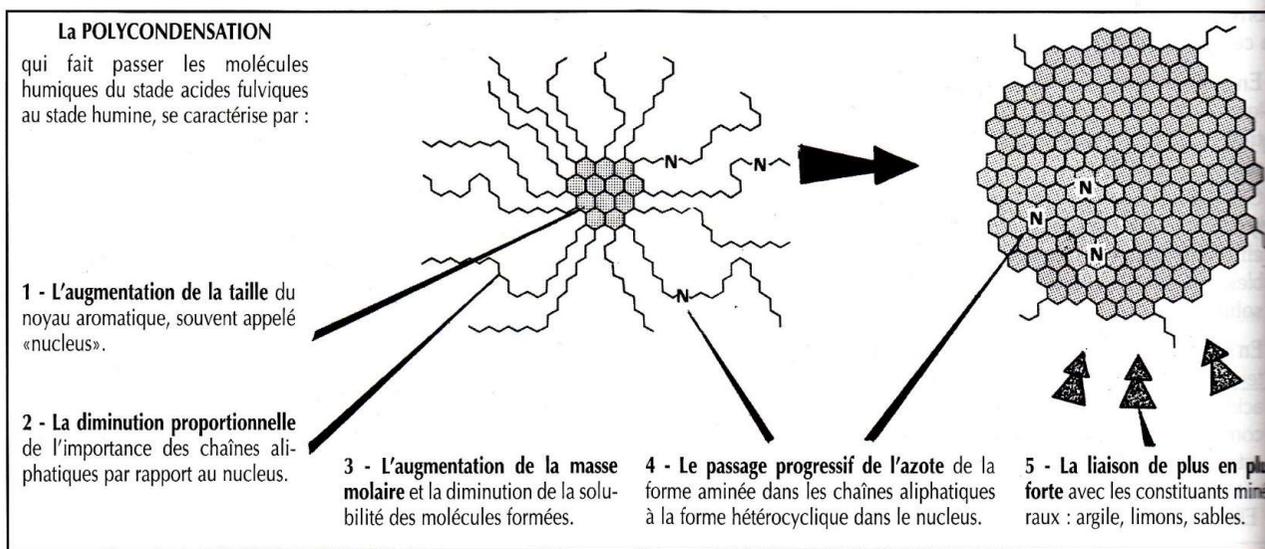
Humification (complément 9)

II - LA POLYCONDENSATION : des acides créniques à l'humine (Les chiffres en **masse molaire**)



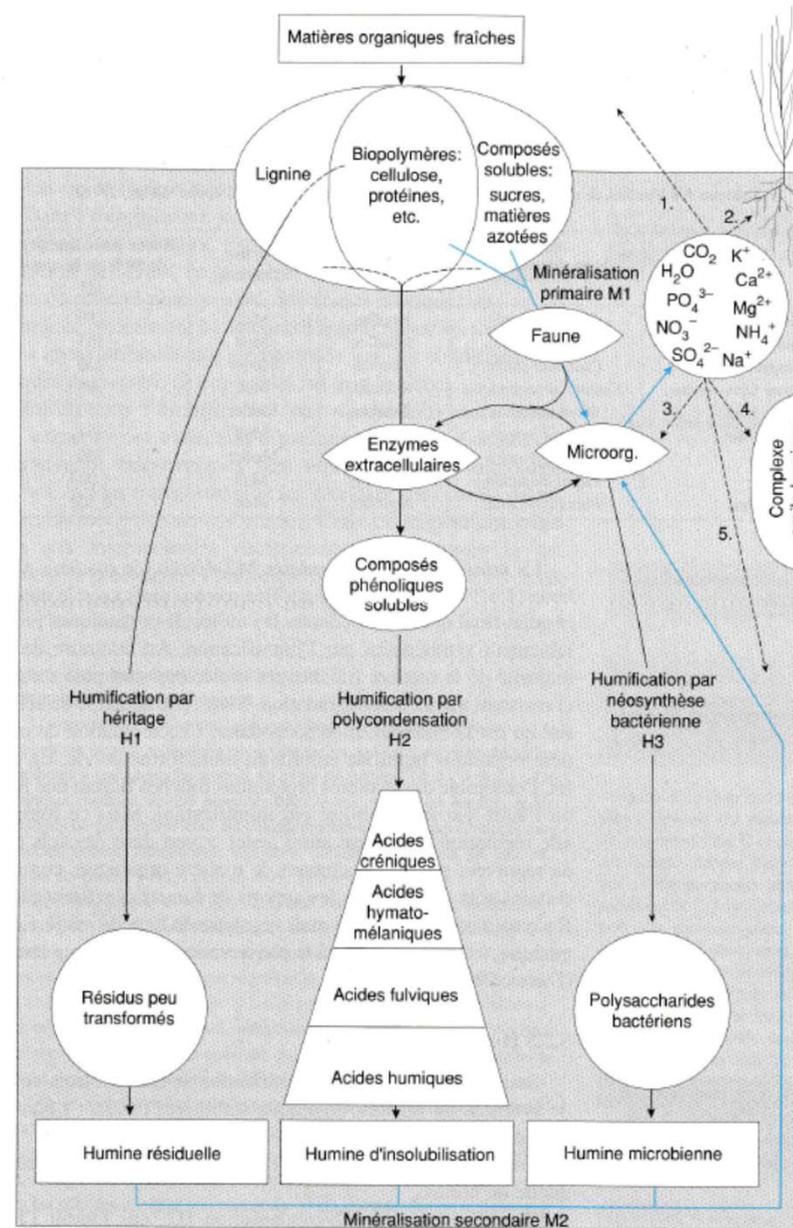
Humification

III - LES 5 CARACTÉRISTIQUES DE LA POLYCONDENSATION



Bilan

Trois types
d'humification conduisent
à l'humus



3 catégories de molécules : acides fulviques, acides humiques, humines

Coloration liée aux pigments : figure 6



Humic substances (pigmented polymers)				
Fulvic acid		Humic acid		Humin
Light yellow	Yellow brown	Dark brown	Grey-black	Black
————— increase in intensity of colour —————>				
————— increase in degree of polymerization —————>				
2 000	————— increase in molecular weight —————>	300 000 ?		
45%	————— increase in carbon content —————>	62%		
48%	————— decrease in oxygen content —————>	30%		
1 400	————— decrease in exchange acidity —————>	500		
	————— decrease in degree of solubility —————>			
Chemical properties of humic substances. (Stevenson 1982)				

Remarque : une vision plus moderne de l'humus

Remise en cause du modèle de molécules complexes pour l'humus :

The contentious nature of soil organic matter

Johannes Lehmann^{1,2*} & Markus Kleber^{3,4†}

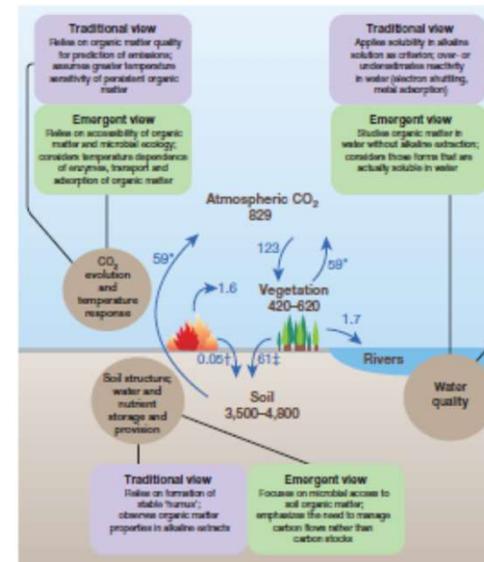
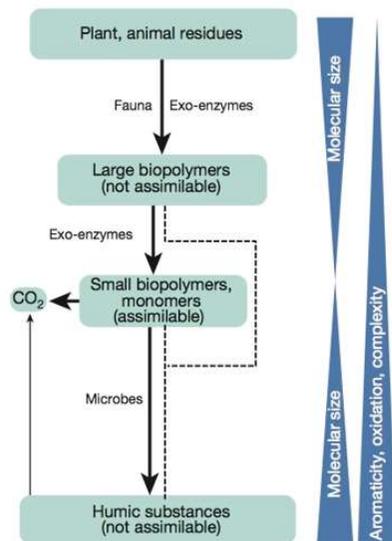
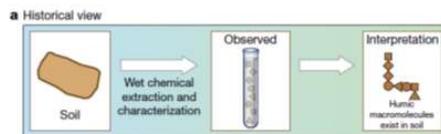


Figure 1 | Traditional and emergent views of the nature of soil organic matter affect how we predict and manage soil, air and water. Traditional 'humification' concepts limit observations of soil organic matter to its solubility in alkaline extracts, unlike the emergent view of organic matter based on solubility in water and its accessibility to microorganisms. Soils are an important source of organic matter in aquatic ecosystems and are responsible for half of the atmospheric carbon recycling. Carbon stocks and flux values are from ref. 1, except where noted otherwise; brown numbers are stocks in Pg C and blue numbers are flows in Pg C yr⁻¹. * Disaggregated value from 119 Pg C yr⁻¹ total emissions. †3% of total carbon consumed by fire¹⁰⁴. ‡Estimate to balance soil carbon exports.

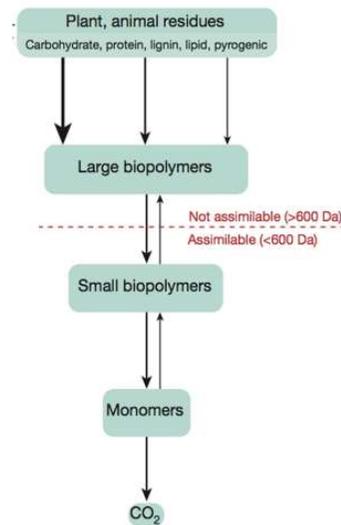
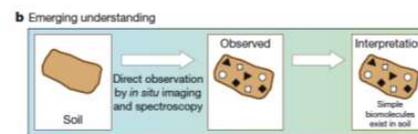
Donc deux visions différentes de l'humus

Vision moderne : molécules plus petites : complément 10

Vision traditionnelle : humification



Vision actuelle : continuum de dégradation



Lehman & Kleber, 2015

Bilan : vision plus moderne :

- Il n'y a pas néoformation de molécules humiques par condensation
- Les matières organiques persistantes seraient surtout des molécules d'origine microbienne

Différents types d'humus : figure 7

Mull, Moder, (Mor)

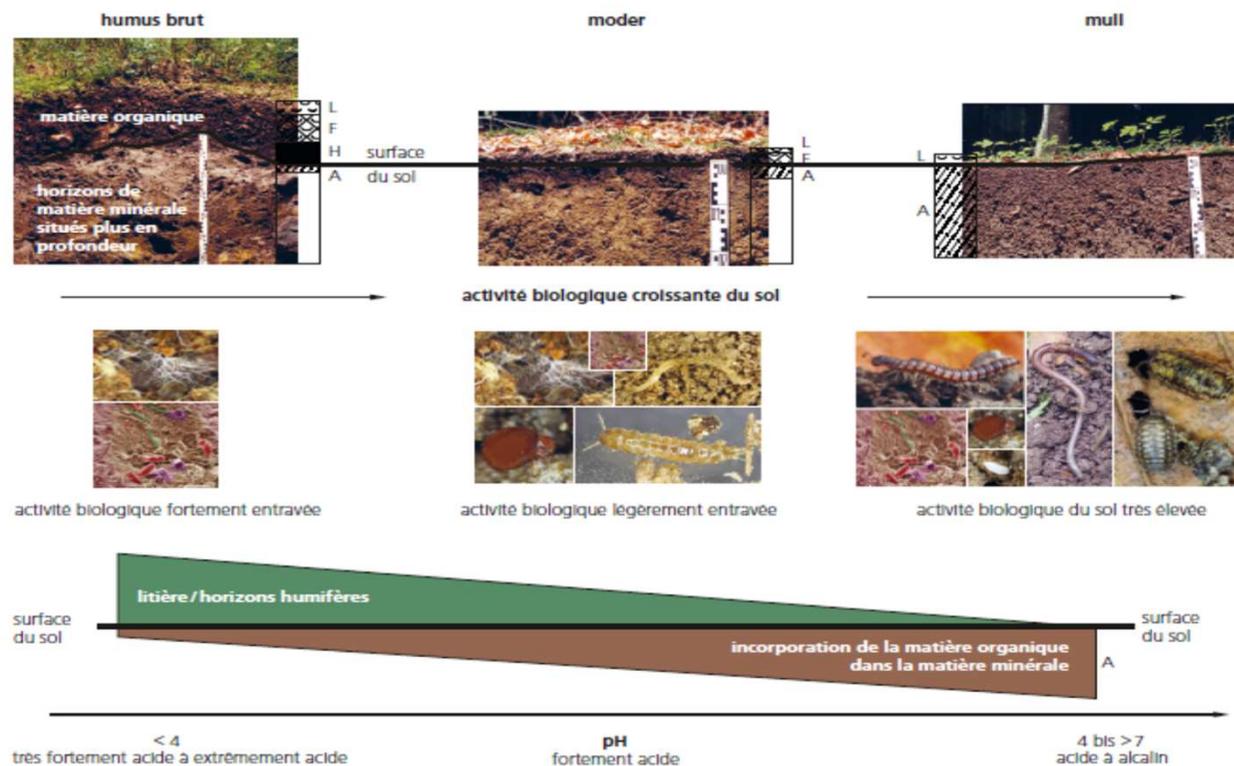


Fig. 18. Activité biologique des différentes formes d'humus. La forme d'humus est un indicateur de la capacité de transformation des éléments nutritifs dans le sol de surface et par la même du degré d'activité biologique dans le sol.

Mull et moder : rapport C/N Différent

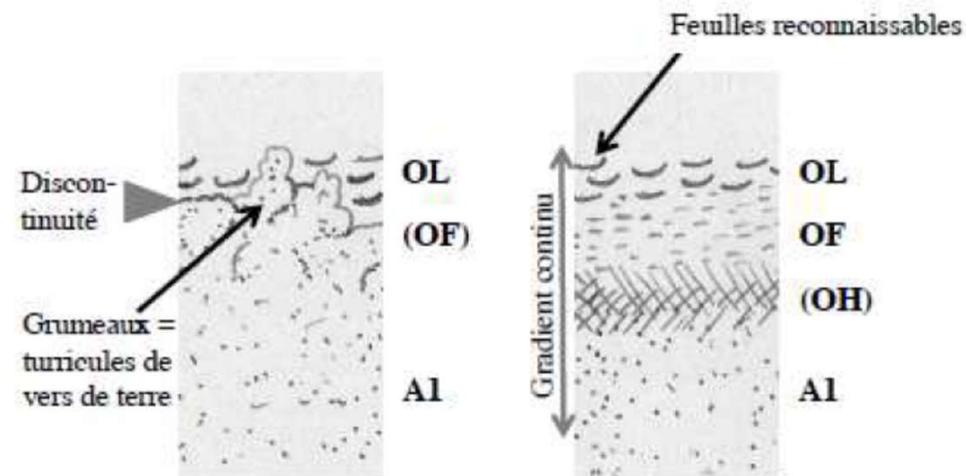
Poly TP page 8

	MULL	MODER
Structure résumée	OL (OF) / A1	OL, OF (OH), A1
pH	5,5 à 7,5	3,5 à 5
Rapport C/N	10 à 20	15 à 25
Tanins et terpènes	peu	Beaucoup
Complexe argilo-humique	abondant	Moins
Type de MO	Acides humiques	Acides humiques et fulviques
CEC (mEq/100 mg)	400 à 600	80 à 100
Minéralisation	rapide	Lente
Activité de minéralisation	Surtout les bactéries	Surtout les champignons
Nitrification	Forte	Faible
Faune	Lombrics, taupes	Enchytraeides (<i>annélides très petits</i>)
Brassage	Rapides (turricules)	Faible

Document d'après M.A. Selosse

Mull et moder deux types d'humus

Poly TP Page 8, document 7



OL : litière, couche de feuilles ou d'aiguilles mortes, encore reconnaissables. Cette couche de feuilles peut être divisée en deux parties suivant la vitesse de décomposition : OLn : feuilles de l'année encore entières ; OLv : feuilles vieilles, blanchies par un début de décomposition et commençant à être fragmentées.

OF : Couche de fragmentation dans laquelle les débris ne sont plus reconnaissables.

OH : Couche humifiée, absence de toute structure végétale reconnaissable à l'œil.

Turricules de vers de terre :



Rappel TP 2 : les décomposeurs attaquent aussi les minéraux

- Champignons et bactéries

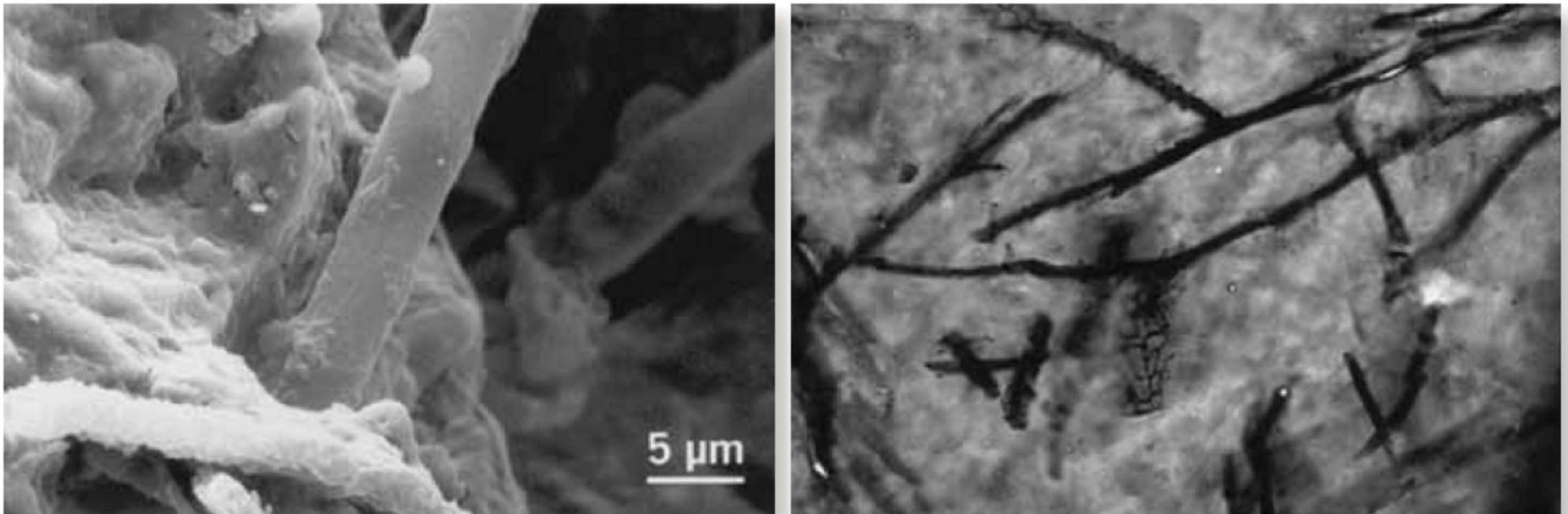


Fig. 4,4 : Mycorhizes géophages. A gauche; microscopie électronique à balayage montrant deux hyphes fongiques pénétrant un grain de feldspath: (EHd) A droite; coupe mince d'un grain de feldspath provenant de l'horizon E (lessivé) d'un Podzol, sillonné par des tunnels d'environ 5 μm de diamètre; Le grain de feldspath provient de l'horizon E d'une dune de sable vieille de 5400 ans bordant le lac Michigan. (LVS)

Attaque d'un cristal par un champignon

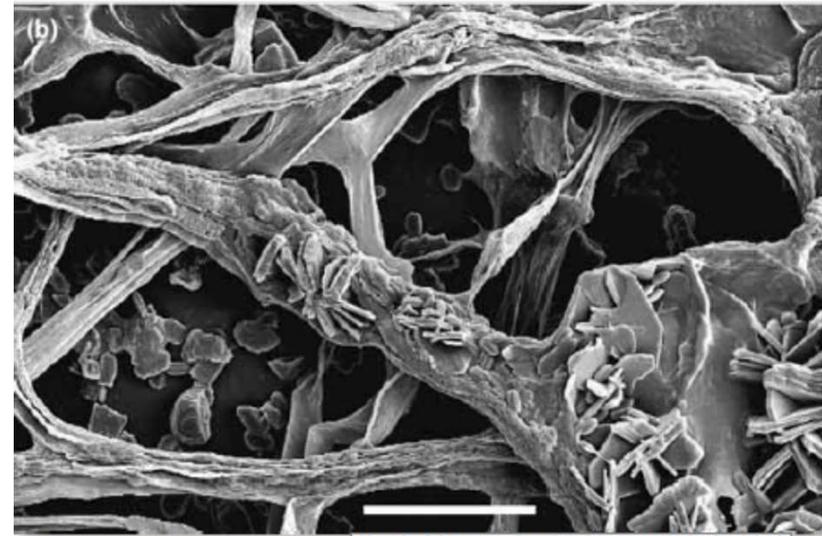


Fig. 4.8 : Calcite et oxalate de calcium monohydraté précipité sur *Serpula himantioidea*. Barre (b) 10 μ m ; D'après Gadd (2007).

Teneur en carbone du sol

Extraction par pyrolyse

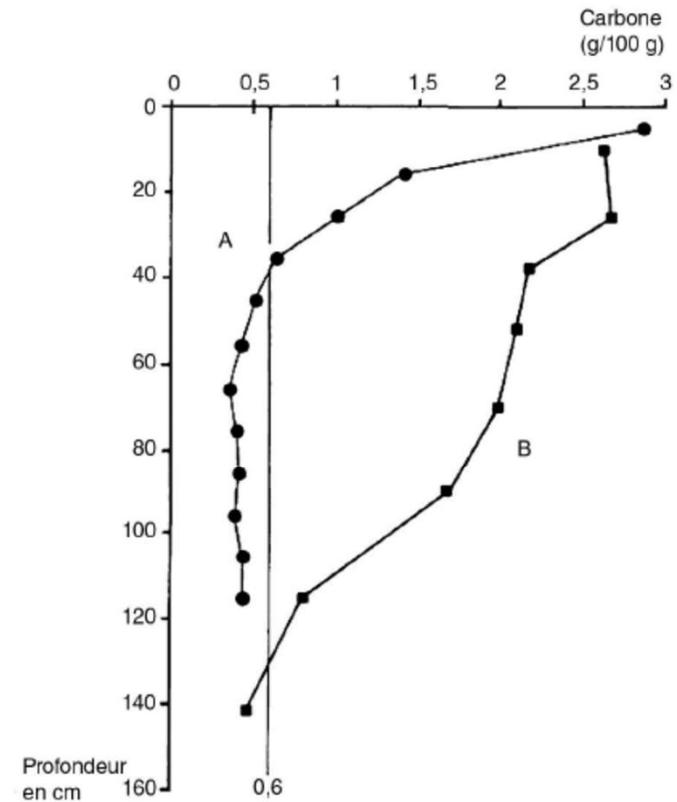


Figure 4.1. Distribution verticale du carbone organique dans deux sols profonds.

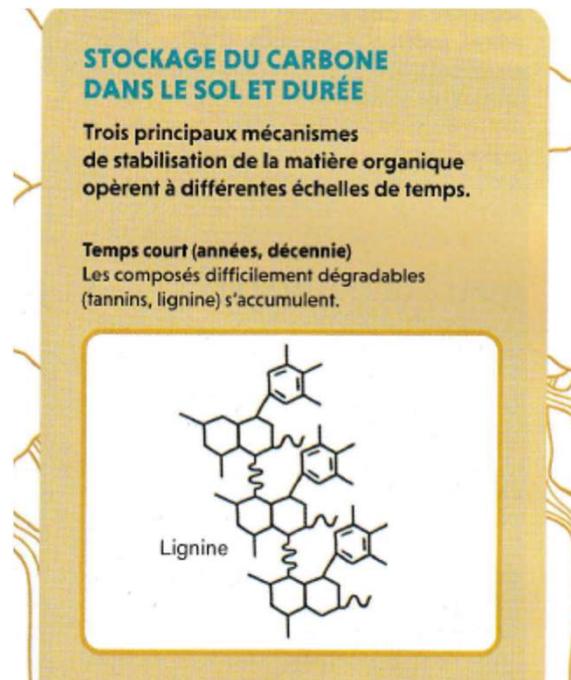
A : « Terre d'Aubue » profonde (Baize, 2012), sous forêt (France).

B : Phaeosol Haplique argileux, cultivé, de la région de Suceava (Roumanie).

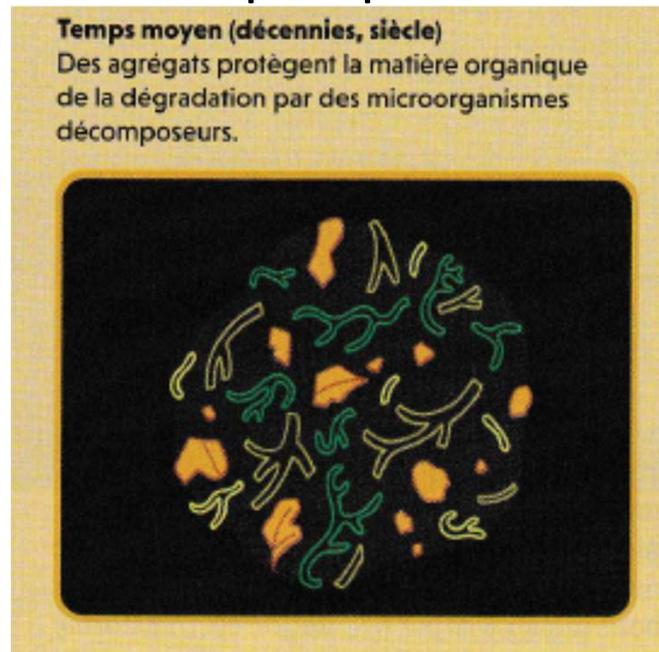
Importance de la matière organique du sol

Figure 8 : stockage du carbone dans le sol : 3 temps différents

Temps court : quelques années à quelques décennies

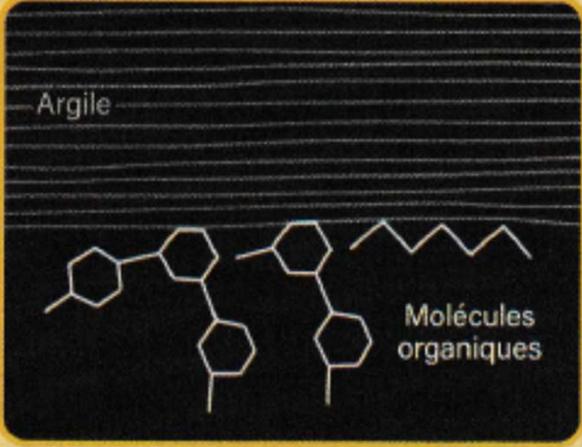


Temps moyens : décennies à quelques siècles



Temps long : siècles à millénaire

Temps long (siècles, millénaire)
L'association de petites molécules organiques avec des argiles les protège de la dégradation par des microorganismes décomposeurs.



Argile

Molécules organiques

Bilan : sol = stock de carbone

Comparaison :

Sol : 1700 Gt pour l'ensemble des écosystèmes terrestres > à

Végétation : 450 Gt + Atmosphère : 870 Gt

Actuellement : érosion des sols, artificialisation : perte de 25 Gt par rapport à 1850 (= avant révolution industrielle).

d. Importance de la vie dans le sol

Classement / taille :

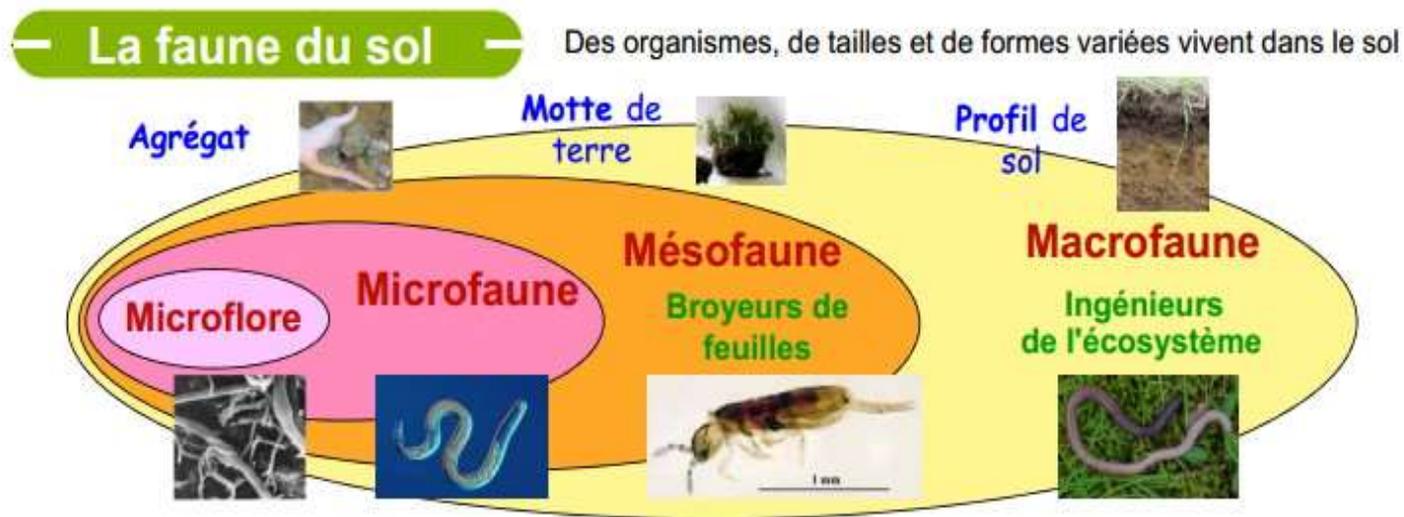
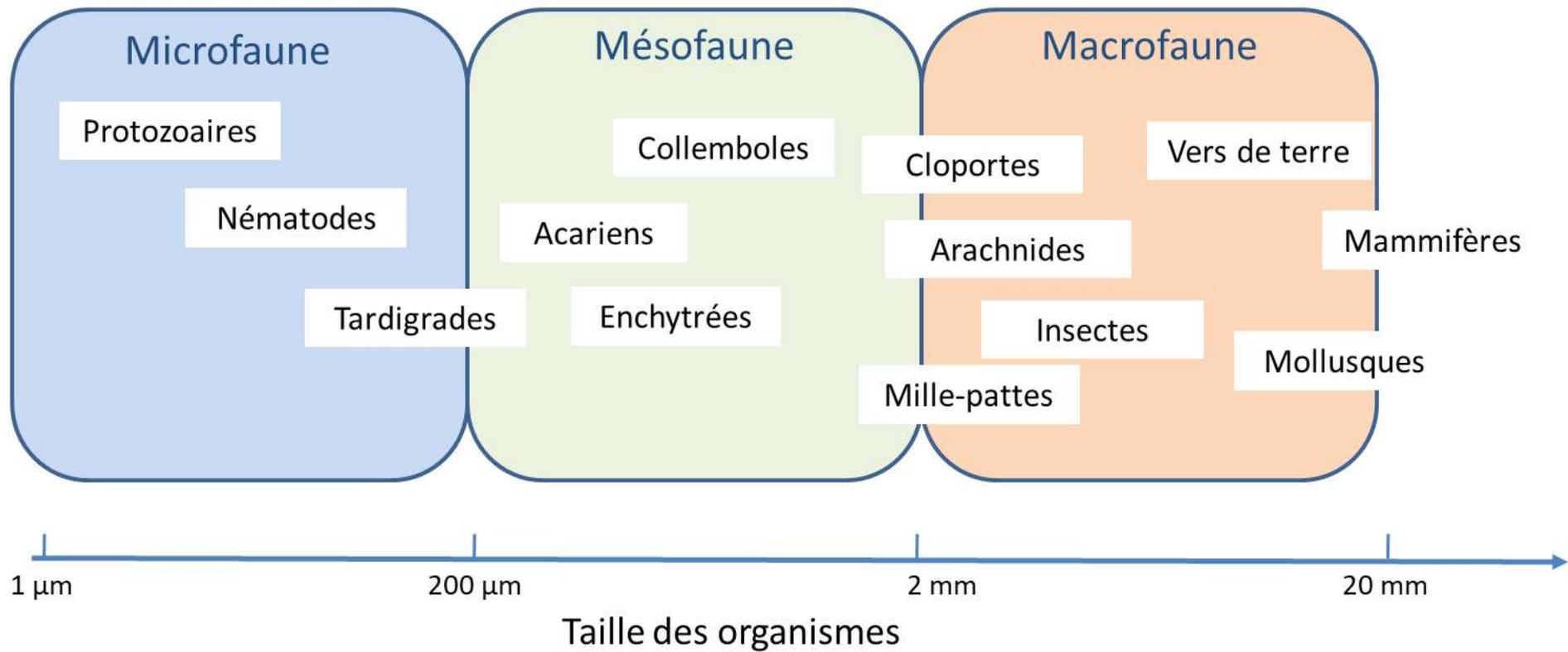
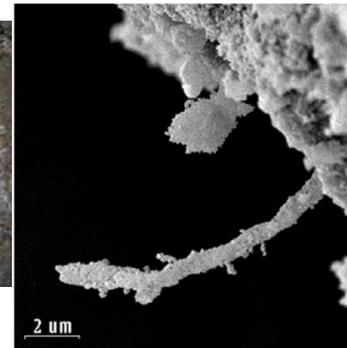
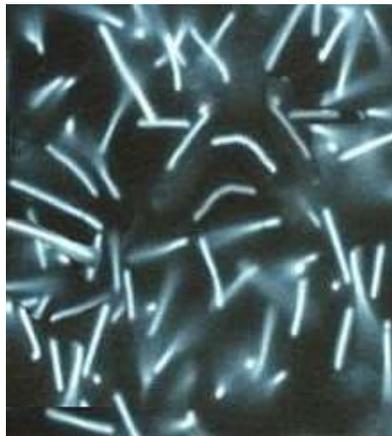
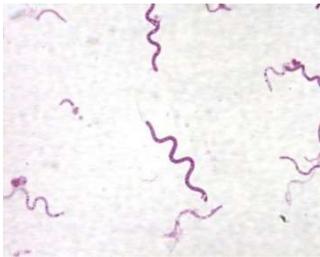


Figure 9



Importance des êtres vivants du sol

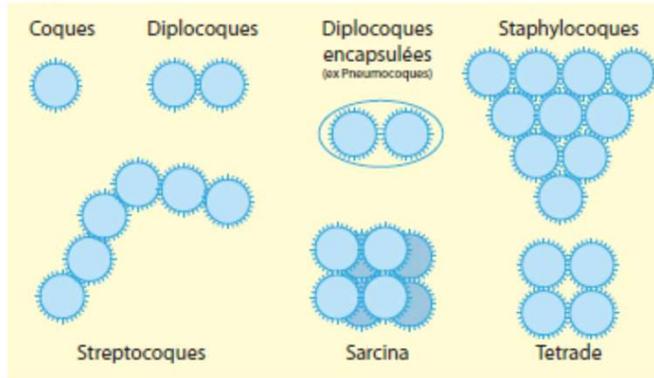
< 20 μm : microflore : bactéries (eubactéries et archées) et champignons.



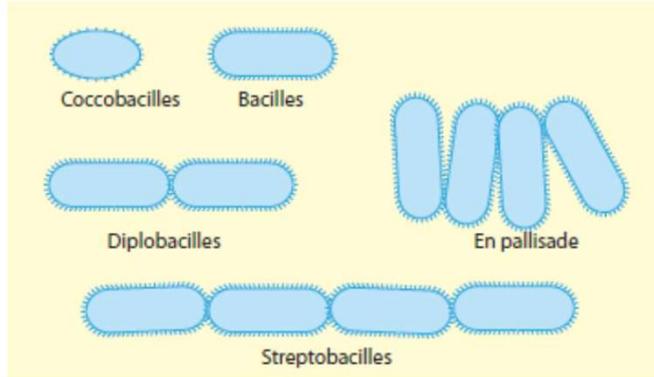
Diversité des procaryotes



Coques



Bacilles



Bactéries bourgeonnantes et/ou à pédoncules



Autres formes

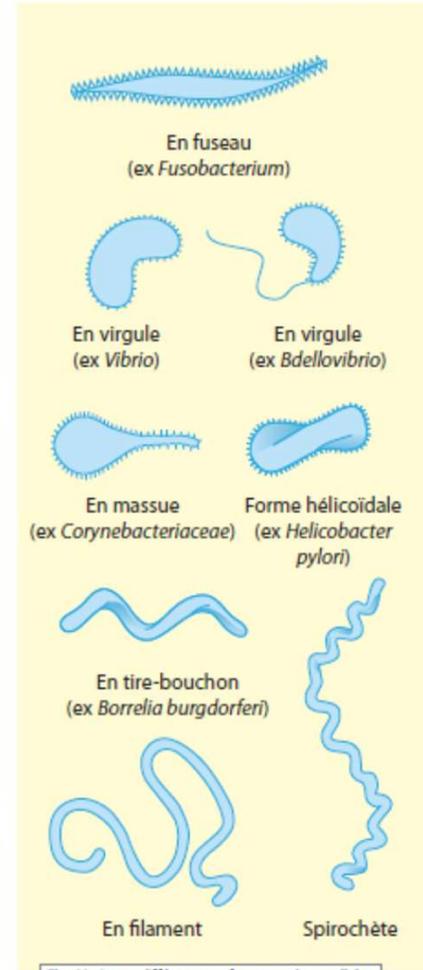


Fig. U : Les différentes formes de cellules procaryotiques observables au microscope. (MRV)

Importance des bactéries du sol

1 g de sol = un milliard de bactéries (nombre de cellules)

Les richesses insoupçonnées du sol

Un gramme de sol contient un milliard de bactéries, de cent mille à un million d'espèces différentes. A ce titre, le sol constitue l'un des plus grands réservoirs de biodiversité et de ressources génétiques de notre planète. Mais avec d'importantes disparités, qui dépendent notamment de l'usage qu'on en fait.

Publié le 08 juillet 2020



Rappel : rhizosphère et importance de la vie bactérienne

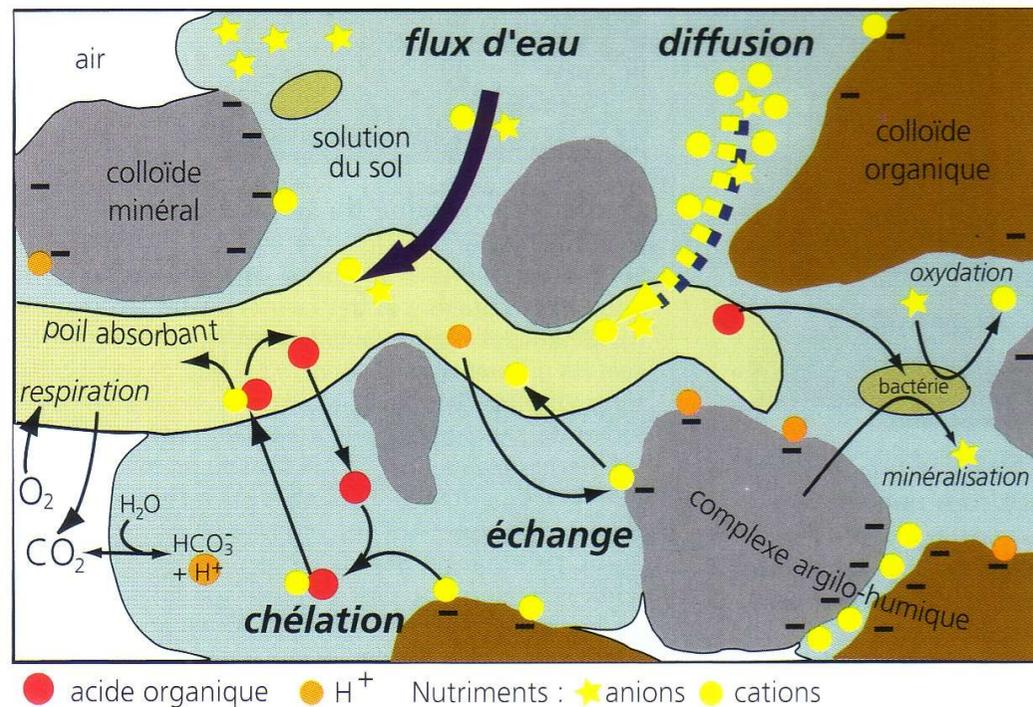


Figure 3-26: portion de rhizosphère montrant les constituants d'un sol et les échanges entre un poil absorbant et le sol

On classe les cations en fonction de leur capacité de liaison décroissante ou de leur capacité d'échange croissante dans l'ordre suivant: Al^{3+} , H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ou NH_4^+ , Na^+ .

De nombreux types écologiques différents

Bactéries / Azote :

Ammonifiantes (*Clostridium, Micrococcus,*)

Nitrifiantes (*Nitrosomonas, Nitrobacter*)

Fixatrice N₂ (*Rhizobium*)

Bactéries / Carbone

Cellulolytiques (*Clostridium, Fibrobacter, Bacillus,...*)

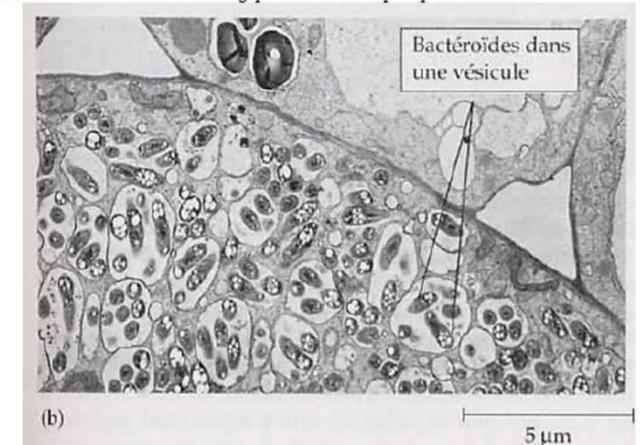
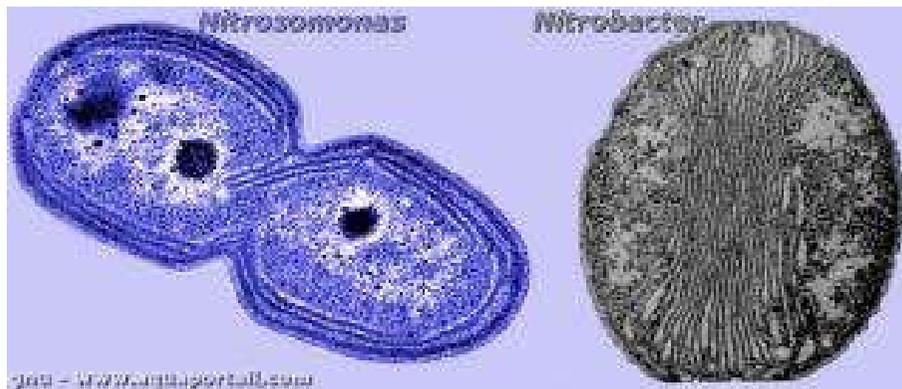
Pectinolytiques (*Pectobacterium...*)

Bactéries pathogènes

E. Coli d'origine fécale

Importance des différentes bactéries du sol : lien avec cycles du carbone et de l'azote (BG-A)

Nitrification / dénitrification / fixation diazote

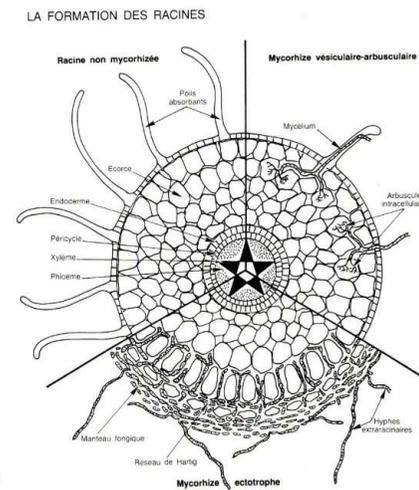


Importance des champignons

Rappel sup : mycorhizes



Fig. V-36 : Comparaison entre racines mycorhizées et non mycorhizées.
Seuls les deux types les plus fréquents de mycorhizes ont été représentés ici.
(D'après M. CHALOT et coll., 1988).



Champignons et décomposition du bois

Différents champignons : pourritures blanches, brunes, molles...



Rappel TP 2 : les décomposeurs attaquent aussi les minéraux

- Champignons et bactéries

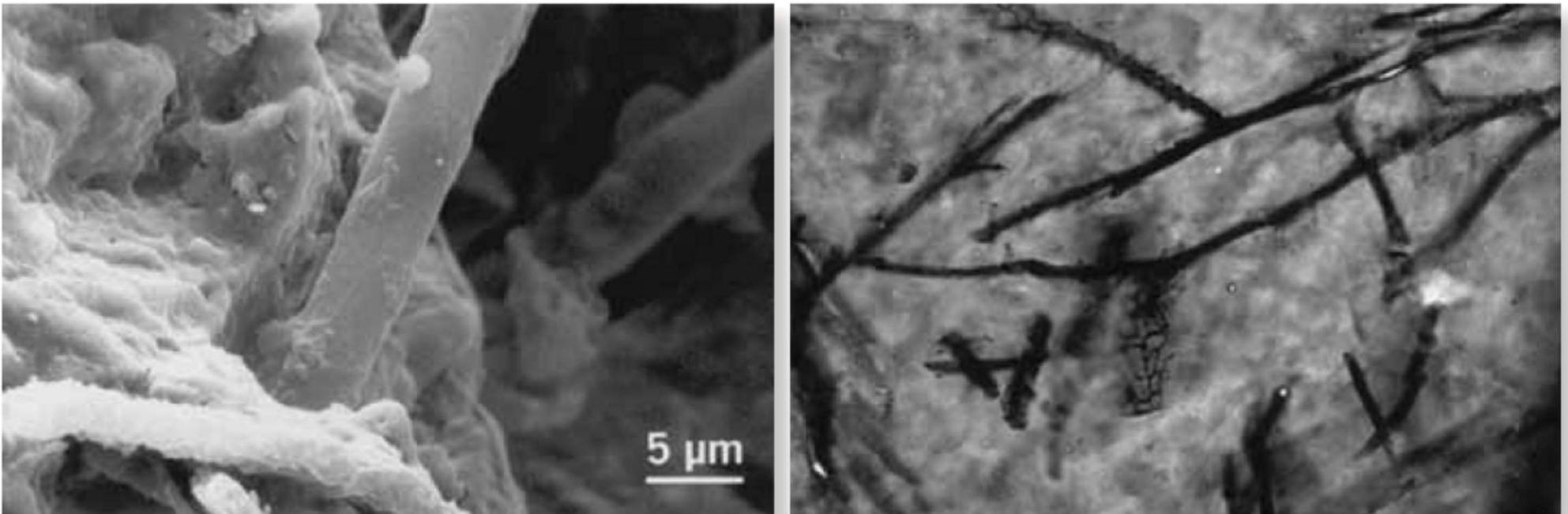


Fig. 4,4 : Mycorhizes géophages. A gauche; microscopie électronique à balayage montrant deux hyphes fongiques pénétrant un grain de feldspath: (EHd) A droite; coupe mince d'un grain de feldspath provenant de l'horizon E (lessivé) d'un Podzol, sillonné par des tunnels d'environ 5 μm de diamètre; Le grain de feldspath provient de l'horizon E d'une dune de sable vieille de 5400 ans bordant le lac Michigan. (LVS)

Attaque d'un cristal par un champignon



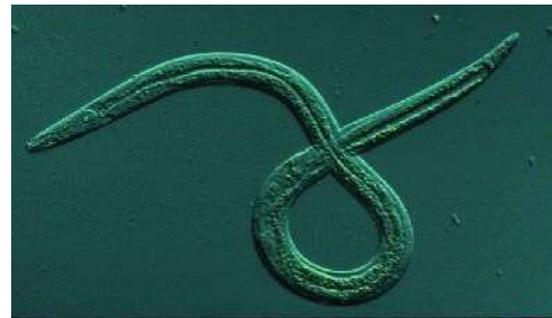
Champignons et décomposition du bois

Différents champignons : pourritures blanches, brunes, molles...



Êtres vivants du sol.

20 à 100 μm : **microfaune** (eucaryotes unicellulaires et métazoaires nématodes, rotifères).



Êtres vivants du sol.

100 μm à 2 mm : **mésafaune** :
microarthropodes : **acariens (arachnides),**
collemboles (hexapodes)



Remarque : chélicères d'un acarien

- Vue au microscope électronique à balayage : ses chélicères lui permettent de fragmenter les débris de végétaux



Photo 3.19. Chélicères de l'oribate *Nothrus* sp. Photo Y. Borcard, Université de Neuchâtel.

Début de dégradation d'une feuille



Photo 3.20. Feuille de hêtre *Fagus sylvatica* squelettisée. Seul le parenchyme a été consommé. Région du lac de Garde, Trentin, Italie. Photo D. Zanocco, reproduite avec l'autorisation de Humus forestali, Zanella *et al.*, 2001, Fondation Edmund Mach, San Michele all'Adige, Italie.

Êtres vivants du sol.

> 2 mm : macrofaune : fourmis, vers de terre.



Détritivore et participation à la fragmentation de la matière organique morte.

Complément 7

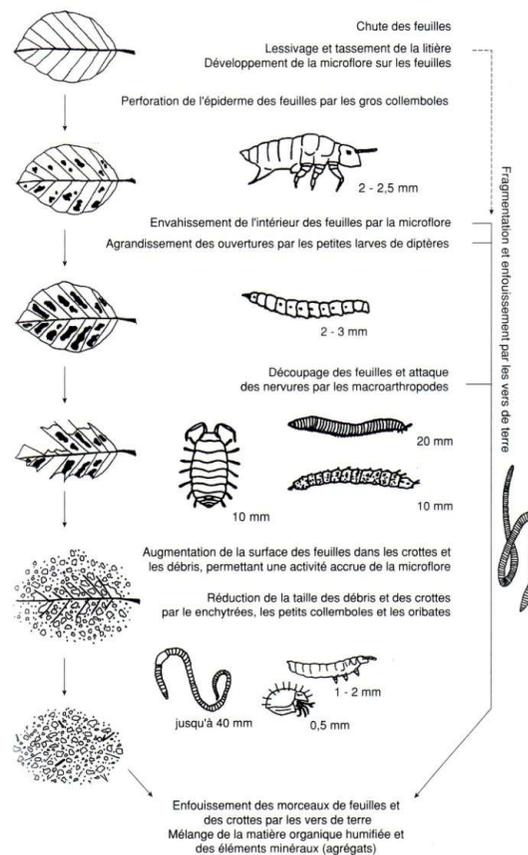
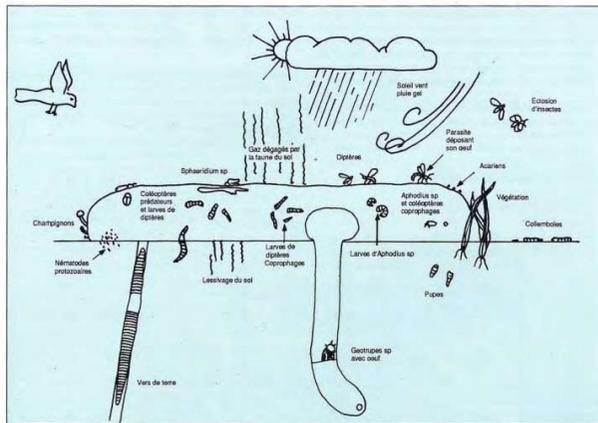


Fig. 5.6 Séquence de transformation d'une feuille morte de hêtre par les organismes décomposeurs.

Les coprophages sont spécialisés dans les matières fécales

Complément X



L'écogénèse "focale", d'après Denekhe-Young, 1978



Bousier et dégradation de la matière organique

Importance dans la dégradation des bouses : l'exemple de l'Australie



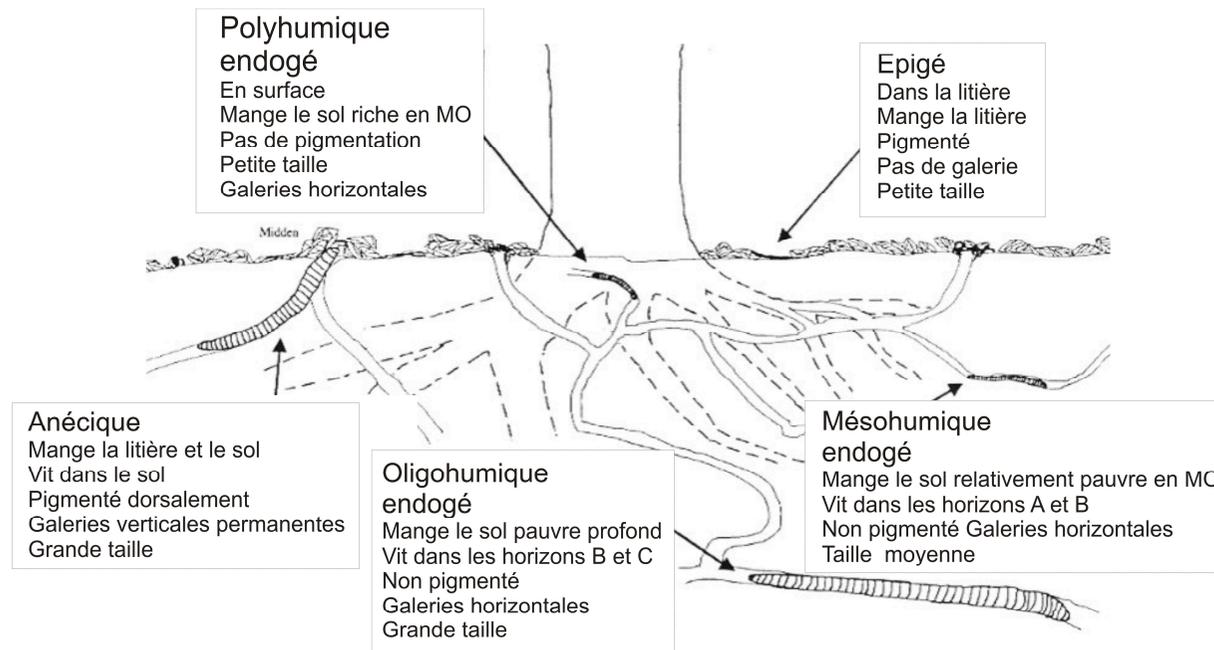
Importance des vers de terre

Brassage et aération du sol, bioturbation, turricules



Complément 6

Différentes catégories de vers de terre



Autre représentation

3 grandes catégories :

Les catégories écologiques



1 EPIGES

Taille : petite (1 - 5 cm)

Couleur : rouge sombre

Mode de vie :

- Vivent en surface (1^{er} cm des sols) et dans les amas organiques (fumier, compost, litière de feuilles, écorces, bouses, ...)
- Creusent peu ou pas de galeries
- Se nourrissent de matière organique morte (feuille, écorce, ...) → *Saprophages*

Rôle :

- Participent activement au fractionnement de la matière organique (MO) et ingèrent peu de matière minérale

2 ANECIQUES

Taille : espèces les plus grosses (10 - 110 cm)

Couleur : rouge, gris clair, brun
(avec un gradient antéro-postérieur)

Mode de vie :

- Vivent dans l'ensemble du profil de sol
- Creusent des galeries permanentes, d'orientation sub-verticale à verticale, et ouvertes en surface
- Se nourrissent de matières organiques qu'ils viennent chercher à la surface la nuit et enfouissent dans leur galerie → *Sapro-géophages*
- Rejetent des déjections à la surface du sol (turricules)

Rôle :

- Ils brassent et mélangent la matière organique et minérale

3 ENDOGES

Taille : moyenne à grande (1 - 20 cm)

Couleur : faiblement pigmentée : rose à gris-clair

Mode de vie :

- Vivent dans le sol et ne remontent rarement à la surface
- Creusent des galeries temporaires, horizontales à sub-horizontales très ramifiées
- Se nourrissent de matières organiques plus ou moins dégradées (racines mortes, humus) → *Géophages*

Rôle :

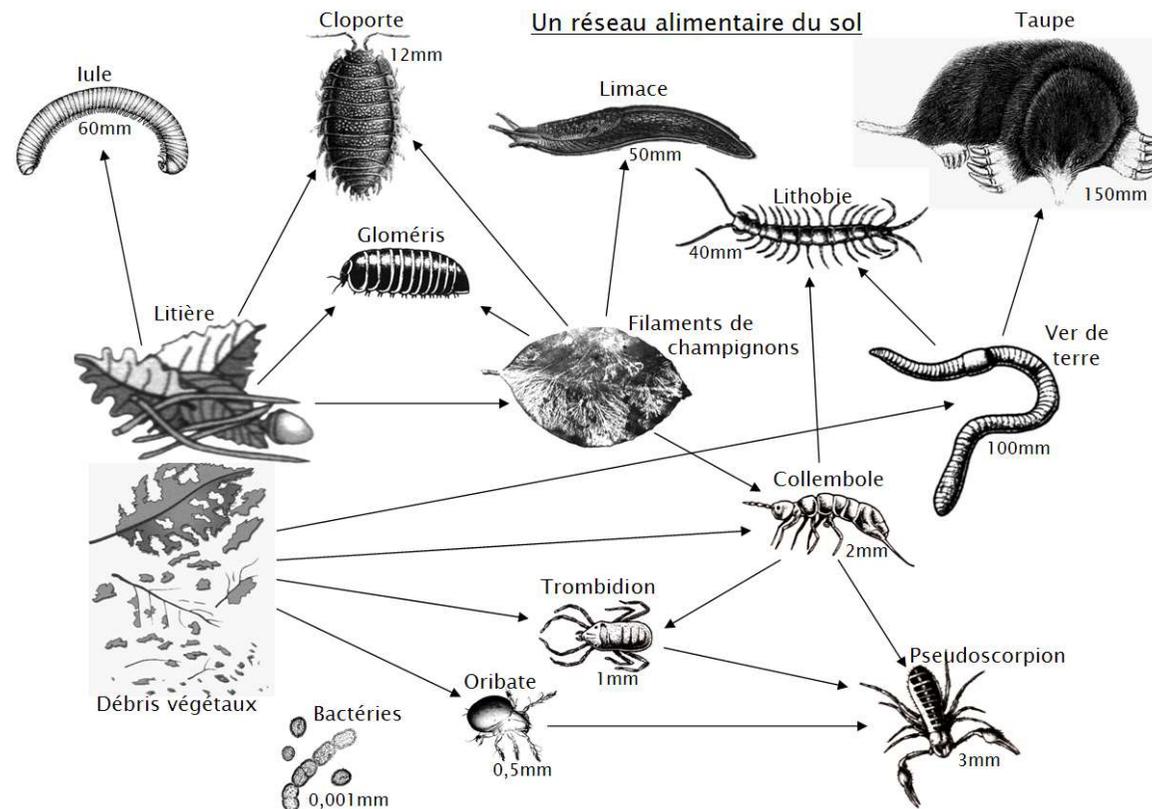
- Ils créent une structure grumeleuse qui joue un rôle sur la rétention et l'infiltration de l'eau dans le sol

Quelques chiffres

- Les vers de terre représentent 70 % de la biomasse terrestre !
- En moyenne, 7 à 8 espèces cohabitent sur un même lieu

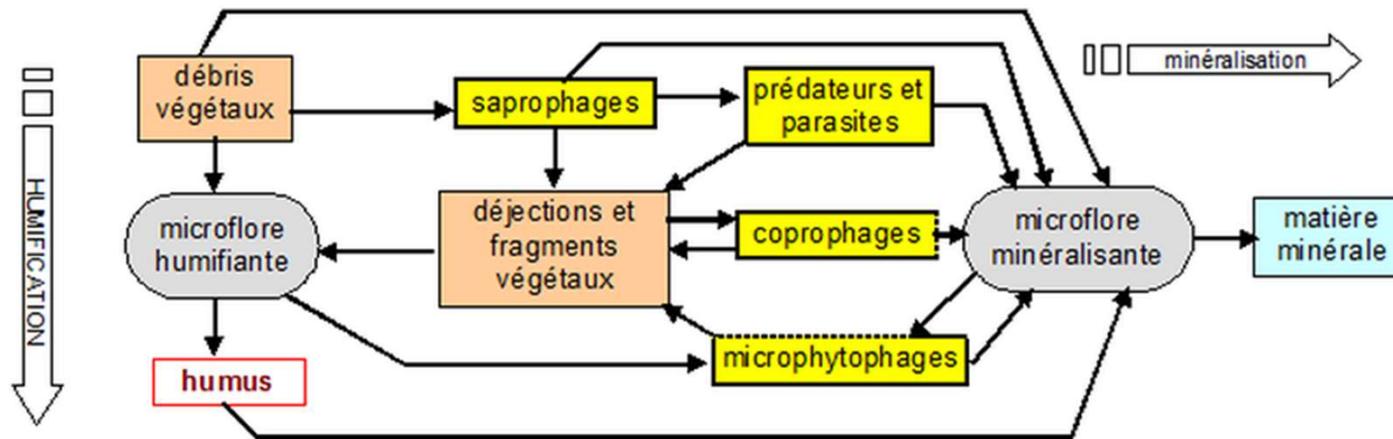
Vers de terre : jusqu'à 70 % de la biomasse animale endogée d'un écosystème terrestre

Lien avec le TP : un réseau trophique complexe



Réseau complexe

faune et de la microflore (bactéries et champignons) du sol sur l'humification et la minéralisation des matières organiques
modifié d'après A. Ramel (<http://aramel.free.fr/>)



Ne pas confondre **décomposeurs** (bactéries et champignons) et **détritivores** (micro-faune)

Décomposeurs qui sont à l'origine de **l'humus** et des **minéralisations**

Détritivores qui ne font que **fragmenter et minéraliser** la MO



Importance quantitative de la vie dans le sol

- Un grand nombre d'individu et une très forte biomasse

Combien d'individus ?

- 1 g de sol contient..



- 100 nématodes
- 50000 algues
- 300000 protozoaires
- 450000 champignons
- 100 000 000 bactéries

Avec la faune, cela représente environ
5 tonnes par hectare ...

