

Le sol vivant

Bac : bactérie
CAH : complexe argilo-humique
BM : biomasse
MO : matière organique

Cette fiche n'est pas exhaustive. Elle retient les données qui appuient nos raisonnements ou les ouvrent.

2. Les briques du système sol

2.1 Constituants minéraux

2.1.2 Désagrégation chimique et altération physique

Oxydation : perte d'électron
 $Fe(II) \rightarrow Fe(III)$, réaction qui déstabilise les réseaux cristallins

Réduction : gain d'électron
 $Fe(III) \rightarrow Fe(II)$, réaction qui rend soluble le fer

L'hydrolyse détruit alors que l'hydratation ne consiste qu'à l'ajout de molécule d'eau.

2.1.4 Qualité minéralogique

Argile granulométrique (0-2microm) différent d'argile minéralogique. La fraction argileuse est essentiellement constituée d'argiles minéralogiques (30 à 80%).

2.1.5 Les argiles

En fonction de la roche silicatée qui se dégradera et des condition d'hydrolyse, différentes qualités d'argiles :

- 1/1 type kaolinite.
- 2/1 qui gonflent type illites, vermiculites, smectites-montmorillonites. Elles sont les plus hydrophiles, et ont la plus grande CEC.
- 2/1/1 non gonflante car le vide est occupée par MgO qui forme un octaèdre.

Marne : roche sédimentaire argilo-calcaire. Les sols issus de cette roche en climat pluvieux et froid sont rapidement décarbonatées. La calcite ne joue plus aucun rôle.

Elles sont électronégatives, hydrophiles et peuvent flocculer et se disperser.

2.2 Constituants organiques

2.2.1 Matière organique fraîche : la litière

Végétation	Chute annuelle de litière aérienne (T/ha.an)	Masse totale sur la planète (10^9T)
Forêt boréale d'épicéas	3,5-7,5	48,0

Le sol vivant – GOBAT ARAGNO MATTHEY

Forêt tempérée caducifoliée	11,0	14,0
Forêt tropicale et équatoriale	20,0-40,0	7,2
Prairies tempérées	7,5	3,6
Cultures	0,3-2,0	1,4
Vache de 500kg (25-30kg/jour)	9,1 soit 18 pour 2 UGB	

Diverses sources

SOILS AND ENVIRONMENT
Table 4.2 Litter input rates for different ecosystems

Ecosystem	Litter input (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
Tundra	1.5
Boreal forest	7.5
Temperate deciduous forest	11.15
Temperate grassland	7.5
Savanna	9.5
Tropical forest	30

Source: Swift et al. 1979

Ellis et Mellor 1995

Certaines litières relâchent des phénols et tanins lors de leur dégradation : lien avec la lignine ? La qualité d'un litière dépend aussi du contexte pédo-climatique.

→ **Quel impact dans nos choix de déchets verts ?**

	Proportion dans le sol (% catégories)
Cellulose	2-10
Hémicellulose et pectines	0-2
Lignine	35-50
Protéines et lipides	28-35 et 1-8

D'après Foth 1990

2.2.4 Les matières organiques humifiées

Les différentes molécules se classent selon leur masse mol :

- ◆ Acides humiques :
 - Acides fulviques
 - Ac humiques
 - Bitume : chaîne aliphatique avec lipides variés, résines et cires.
- ◆ Humines : le plus stable. De nature méconnue, elle serait une condensation d'ac humiques et fulviques. C'est donc une association supra-moléculaire.

Ces molécules sont elles-même liées à des molécules non humifiées par des cations multivalents. Les liaisons faibles complexifient leur étude.

2.5 Les êtres vivants

Biomasse moyenne	en kg/ha	en %
------------------	----------	------

Bactéries	1500	25
Champignons	3500	59
Algues	10-1000	traces
Protozoaires	250	4
Faune	1-5000	12
Racines	6000	

Diverses sources

2.5.2 Les bactéries

BM bactérienne estimée à 10^9 germes par gramme de sol. Soit 500microg/g sol. Mais activité métabolique dix fois plus élevée que la vache au-dessus !

Notion de niche écologiques très différenciées dans le sol.

Les bactéries synthétisent :

- polysaccharides très résistants à la dégradation bactérienne, qui seront à l'origine d'une part importante de la MO humifiée = **humine microbienne**. Qui participe à l'agrégation microbienne et à la formation des micro-agrégats
- facteurs de croissances
- antibiotiques

2.5.3 Les champignons

Smith et al (1992) signale un individu sur plus de 15ha *Armillaria bulbosa*. Or le mycellium est un réseau énorme de **translocation**, comme par exemple dans les mycorhizes. Ceci expliquerait les mouvement latéraux de nutriments.

De plus les champignons participent à la cohésion du sol participe par

- leur mycellium ramifié
- la glomaline

Notion de mycellium cloisonné et non cloisonné.

2.6 La faune

Plus abondante qu'on ne le croit : 1000 à 1500kg/ha de vers de terre pour 2 à 3 UGB/ha. En hêtraie, pour une BM d'oiseaux de 0,240kg/ha, 25 à 35 kg/ha d'oribates [Lemée in Lamotte et Bourlière 1978].

Les chiffres d'individus sont pires !

3 Les propriétés du sol

3.2 La structure

Microagréats de 2-20microm, très stables, formé de MO humifiée et d'argiles

Microagréats de 20 à 250 microm, constitués de sable et limon agrégés par polysaccharides bactériens

Macroagréats de 250 à 2000 microm, constitués de sables grossiers reliés par des polysaccharides bactériens, des cellules et du mycelium.

Macroagréats supérieurs à 2000 microm, constitués des précédents et des particules de MO libres, racines et mycelium.

3.2.4 Microstructure ou micromorphologie

Observables en lame mince, ceci apporte pour la compréhension entre sol et vie du sol... Mais comme on ne s'en servira jamais, je vous laisse lire de vous même !

3.5.2 Réchauffement et refroidissement du sol

Les sols foncés se réchauffent plus vite (55°C à 71°C pour une tourbe). De plus un sol humide, à cause de la chaleur massique (ce qui est nécessaire pour évaporer), se réchauffe plus lentement.

3.6 Le complexe argilo-humique

« L'humus finement divisé vient-il à être mis en contact avec de l'argile mouillée, les deux substances adhèrent d'une façon si tenace l'une à l'autre, qu'une petite quantité d'humus s'unit à chaque particule d'argile, d'où il résulte un mélange noir qui, après une dessiccation lente, présente l'aspect d'une substance terreuse à grains fins... » Müller 1889

Calcium et fer assure la liaison du CAH. Mais le calcium donne des liaisons plus solides et limite la minéralisation : il protège la MO.

Ce CAH peut lier des cations, et même des anions via les cations :

→ cf expé du purin dans le sable et dans l'argile+humus. Le purin pue toujours et ne pue pas !

	CEC (cmol+/kg)
Minéraux	
Argile 1/1 kaolinite	2-15
Argile 2/1 illite	10-15
Argile 2/1 vermiculite	100-150
Argile 2/1/1 chlorite	5-40
MO	
Peu humifiée, tourbe	100
Humifiée pure	200-500
Horizons pédologiques	
Sols sableux horizon C	1-5
Sols argileux humifère horizon A	60-80

Diverses sources

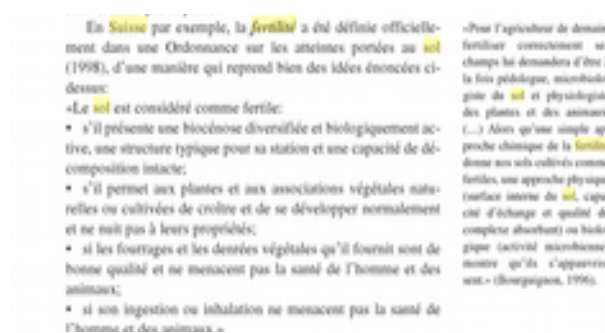
3.9.2 Pouvoir tampon

Chaque sol a son pouvoir tampon qui s'oppose à l'acidification, d'autant plus élevé que CEC et taux de MO sont grands :

Carbonates	8,6-6,2
Silicates	6,2-5,0
Argiles	5,0-4,2

3.11 De la fertilité à la qualité du sol

En agronomie, la notion de fertilité acquise ajoute à la fertilité naturelle le travail de l'homme, qui vise à augmenter les capacités productives du sol grâce aux labours, à l'apport d'engrais et à l'utilisation de pesticides.



4 La vie en action

4.1 La plante et le sol

Les poils absorbants meurent au bout de 2-3 jours [Finck 1976, Davet 1996].

Production primaire brute : prod primaire nette + respiration + rhizodépôts à part égale. La part des rhizodépôts va de 20 à 80% de PPB. Prairie : production racinaire de 5T/ha soit 85% de la PPN (10T/ha en forêt pour 40-70%). Soit 75 à 95% de la BM tot [Larcher 2003], hors racelles..

Un hêtre renouvelle 80 à 92% de sa BM racinaire. La litière engendré est donc deux à cinq fois plus élevé en racinaire qu'en aérien.

4.2 La nutrition des plantes

La porosité joue sur la longueur des racines : 10,9cm et 6,5cm pour une porosité de 50% et 35% chez Phléole (Phleum sp.) [Callot et al 1982].

L'excès d'eau et le métabolisme des bactéries rend le centre des agrégats anoxiques ce qui libère le fer sous forme Fe²⁺ [Etherington 1982].

4.4 Les microorganismes, prolétariat du sol

Les bactéries excrètent le surplus dont des orthophosphates.

Fabriquent l'humine microbienne qui fera partie de la MOS. Ces molécules snt appelées EPS, comme exopolymeric substances. Ce sont entre autre des exopolysaccharides. La plupart sont sécrétés au niveau de la mb cellulaire. Mais certains sont construits dans la cellule au moyen d'enzymes.

Ils sont très résistants. Par exemple une chaîne de cellulose, avec des ramifications. Ils peuvent former :

- une capsule protectrice autour de la cellule
- un gel dans le milieu, où les polysaccharides sont liés entre eux par des cations (ponts cationiques).
- diffus dans le milieu, ils rendent le milieu visqueux.

→ Ils participent à l'agrégation des particules organiques et inorganiques, formation d'agrégats de cellules, de biofilms, de microcolonies

→ Ils permettent la concentration de nutriments, d'enzymes extracellulaires

→ Ils aident à la symbiose nodulaire avec Rhizobium [Skorupska et al 2006].

Fixation d'azote

Pour réduire N₂ en NH₄, les procaryotes ont besoin :

- de conditions réductrices (pot redox très bas)
- concentration faible en formes d'azote solubles (NH₄ et NO₃)

– beaucoup d'énergie.

→ le processus coûte très cher en énergie. Il n'est donc utilisé qu'en conditions

limitantes en azote.

La nitrogénase, enzyme responsable de la réaction fonctionne en conditions réductrices : l'oxygène est un puissant inhibiteur. Mais les organismes fixateurs sont très divers : aérobies ou non, photosynthétique ou non, chimiotrophe ou phototrophe.

Dégradation des minéraux

Les bactéries, en solubilisant certains ions ou en créant des microfilm autour des particules minérales ou acidifiant le milieu, dégradent les cailloux !

EX : les bactéries nitrifiantes et sulfoxydantes (chimolithoautotrophes) entraînent la solubilisation de calcium car elles produisent des acides sulfuriques et nitriques

Certaines bac, comme Acidithiobacillus ferrooxidans, dégradent sulfure et fer (S comme accepteur d'électron?)

Racines et bac produisent des acides organiques et des substances organiques chélatrices qui ont deux rôles diff.

→ solubilisation surtout par les mono-acides (Ca et K)

→ anions organiques consommés par les bac libère des bases DC alcalinisation DC solubilisation de la silice (alcalinolyse)

Les bactéries sécrètent des acides organiques qui complexent les éléments minéraux bi ou tri valents.

EX : sidéropores, acide fulvique, ac oxalique, ac citrique, ac tartrique...

→ cette complexation stabilise les éléments sous forme soluble, dans une large gamme de pH.

Biominéralisation : bactéries et champignons

Les bactéries fabriquent des cailloux directement (diatomées) ou indirectement en modifiant le milieu (précipitation du CaCO3 par la photosynthèse des algues.

Ex : frustules de diatomées (Si)

Prédations

Myxobactéries : émettent protéines lytiques qui dégradent les parois cellulaires

Champignons filamenteux qui coincent et se nourrissent des nématodes : le contact avec le nématode (enzyme de son tube digestif) entraîne la contraction du filament mycélien disposé en boucle. Une fois le nématode piégé, le champignon émet un filament qui va pénétrer et digérer le nématode (ex : Arthrobotrys dactyloides) [Davet 1996, Zunke et Perry in Benckiser 1997]

Les champignons eux-mêmes favorisent la croissance des bactéries !

TOUT SE TIENT

La rhizosphère est un milieu artificiel, construit par les bac-racines-champi. Minéraux disponible, équilibre chimique, pH... sont résultats de l'activité biologique.

4.6 Le rôle essentiel de la faune

Pays	Formation végétale	Turricule (T/ha/an)
Suisse	Pré cultivé	18 à 81
Allemagne	Pré cultivé	91
Angleterre	Ancienne prairie	19 à 40
Allemagne	Hétraie	7
Côte d'Ivoire	Savane	507
Vallée du Nil	Zone cultivée	2500

Diverses sources

Les vers de terre peuvent percer les semelles de labour. Dans les 40 premiers cm, leurs galeries peuvent représenter 3% du volume.

Vers de terres, Enchytréides ou microarthropodes ensemencent les galeries et les cavités du sol en fonction de leur taille.

Pleins d'organismes différents impliqués dans le microbrassage. Entre autre les Enchytréides qui par exemple forent les turricules de vdt. Ces turricules, percés de ttes parts mais néanmoins toujours solides grâce au revêtement muqueux, deviennent de petites éponges. Ces turricules se gorgent aussi des boulettes fécales des Enchytréides et seront ingérés de nouveau par les vdt.

Tous ces microarthropodes et arthropodes assure un (micro)brassage en découpant et ingérant la matière organique à différents stades de décomposition et en rejetant leurs boulettes fécales. Ces boulettes sont ensuite soit ingérées par un autre organisme (dont vdt) soit lessivées. On peut observer des horizons de ces excréments (œil averti).

4.6.2 Des effets chimiques directs et indirects

Effets directs : excréments, mort puis décomposition (1T de vers de terre libère 36-60 kg d'azote), mucus.

Effets indirects : bioaccumulation, sélections de certaines communautés (champignons/bactéries et équilibre entre les deux), enzymes dans les crottes

5. Formation des sols

5.2 Intégration des matières organiques

Minéralisation *sensu lato* : dépolymérisation (fragmentation + digestion) + minéralisation *sensu stricto* (=réaction utilisant de petites molécules organiques pour produire des minéraux (souvent des ions).

Suivant l'espèce d'arbre, le temps de dégradation des feuilles varie de 110j (Bouleau blanc) à 700 jours (Hêtre) [Mason 1976]

Depuis la révolution verte, certaines terres de la plaine du Gange ont perdu la moitié de leur MO ! (effet aération + engrais chimique + pas d'apport de MO).

5.2.3 Humification

Trois voies :

1. Par héritage (voies des lignines de Waksman et Reuzer 1932) : les composés les plus résistants issu de la fragmentation sont incorporés au CAH. En conditions acide ou très calcaire
2. Humification par polycondensation (théorie des polyphénols Calvet 2003) : les composés phénoliques (ligninolyse), ou des chaînes issues de la dépolymérisation et/ou héritées de la litières, se polycondensent spontanément. Environnement moyen.
3. Humification microbienne (théorie des sucres et des amines par Maillard 1913 = polysaccharides microbiens) : visent à donner une stabilité/structuration aux colonies bactériennes. Environnement moyen.

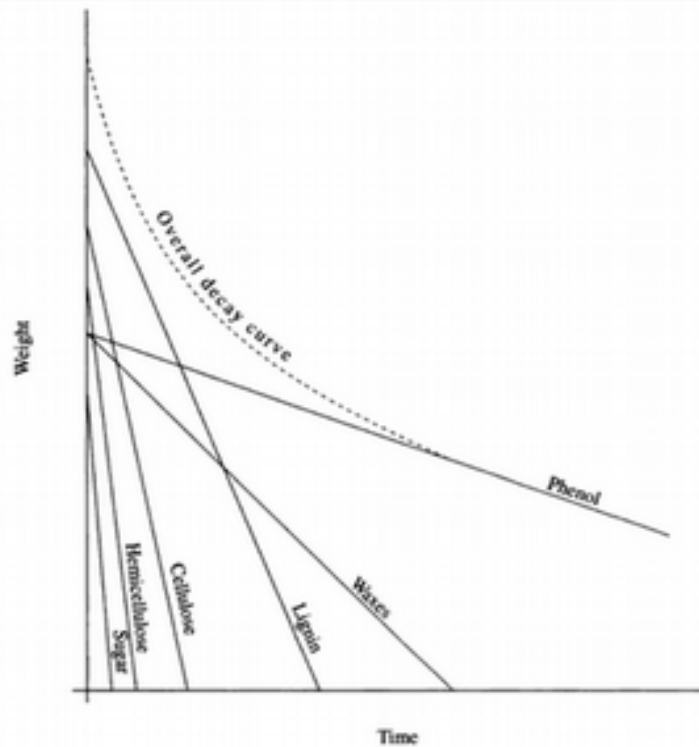


Figure 4.4 Decay curves for the principal constituents of plant litter (from Minderman 1968)
Ellis et Mellor 1995

5.5 Facteurs influençant la pédogénèse

Nous ne décrivons pas les différents processus de formation/évolution des sols. Mais certains mécanismes sont à retenir :

- lorsque le calcaire est lessivé ou hydrolysé (décarbonatation) ou très résistant, les sols évoluées ont un gros horizon organique où la matière organique est bloquée. Au contraire si le calcaire se fragmente, la MO est intégrée, il n'y a pas de lessivage ou d'acidification
- sur roche cristalline l'évolution est acide, ce qui entraîne des transferts de matériaux par chéluviation (perte d'ions par chélation comme Fe et Al), lessivage. Les litières acidifiantes jouent le même rôle
- le sous-sol n'est parfois pas le matériel parental, comme dans le cas des loess (transport éolien de sédiment). Cf colluvion, alluvion, loess.

6. Les formes d'humus

Notion de *hot spot of activity* d'activité microbienne [Beare et al 1995] au sein des micro-agrégats, des micropores.

Mull – moder – mor : du plus au moins actif, du moins au plus acide. Le mor a plus d'horizon OH (MO humifiée) alors que le mull n'a que du OL (litière avec bouts visibles). Seul le mull a une structure grumeleuse due à l'activité des vers de terre. Le moder est entre les deux.

Sous Ericacés ou Résineux, on retrouve un mor car la MO est peu créatrice d'AB (cf tanins et ac. Phénoliques). RQ : sous un épicéa le sol évolue du tronc à la couronne. La couronne présente le plus d'AB car le réseau racinaire traçant aère le sol.

→ Cette hiérarchie correspond à la vitesse d'évolution de la MO, mais aussi au type d'organismes qui la décomposent et à leur importance relative. Les vers de terre sont les principaux dans le mull mais les moins importants dans le mor et intermédiaires dans le moder.

Beaucoup de Ca ou de Al → insolubilisation des humines → sol noir (eumull andique, ...)

MO → minéralisation ou H2/H3 (en fonction de la qualité de la MO)

H2/H3 → M2 (en fonction de Ca, O2 et température)

La MO n'est pas stable en soi mais par la liaison avec la matière minérale

7.

Lien entre végétation – sous-sol et sol – climat : certains climax sont climatiques, d'autres stationnels.

→ parfois lien univoque, dans les deux sens ou pas de liens !

Ex: Les sphaignes poussent dans les tourbières car capables de pousser sur sols acides. Or les sphaignes acidifient elles-mêmes le sol. Elles relâchent des H⁺ et accumulent les cations.

Les plantes évaporent l'eau au printemps.

8.

P295

RQ : lignolytique (bois) différent de ligninolytique (lignine)

Les champignons sont des systèmes très efficaces de recyclage de l'azote car le bois en contient peu. Cf relocalisation.

Dans la dégradation du bois, association de champignons lignolytiques et de bactéries fixatrices d'azote.

[Hick et al 2003]

Pourriture molle : Ascomycètes et Deutéromycètes. Cellulolytique et hémicellulo.

Pourriture brune : Basidiomycètes. Laisse squelette de lignine.

Pourriture blanche : lignine dégradée simultanément à la cellulose et l'hémicellulose + polysaccharides → composés de H2. Ce n'est pas de la nourriture pour le champignon.

9.

Eau pauvre en O2 nécessaire pour faire de la tourbe.

La tourbe a une CEC supérieure aux argiles (150-250cmol+/kg).

12.

Nématodes : peuvent survivre enkystées pendant 10-30ans. Vivent dans les trois premiers cm du sol.

Tardigrades : en réhumectant des mousses, ont réveillés des tardigrades qui dormaient depuis 60ans.

Limaces : caractéristiques des sols remaniés. Plus abondante en champs qu'en forêt ou prairie. Leur mucus sert aux microagrégats.

Taupe : solitaire et carnivore.

Rat taupier : vivent comme les insectes sociaux. Sortent peu.

13.

Un champignon *Armillaria bulbosa* s'étend sur 15ha.

Cu>80mg/m² : pas de vers de terre

Les crottes sont de vrais nids à MO

BIBLIOGRAPHIE

Foth 1990
Beare et al 1995
Lemée in Lamotte et Bourlière 1978
Müller 1889
Smith et al 1992
Davet 1996
Zunke et Perry in Benckiser 1997
Mason 1976
Ellis et Mellor 1995
Hick et al 2003