

# LE SOL

DE LA VIGNE

**Dr Georges Siegenthaler**  
**vigneron**

Domaine de Vens – le - Haut

F-74910 Seyssel, France

[www.domainedevens.com](http://www.domainedevens.com)

# PARADIGME

---

LA COMPREHENSION DU SOL

POUR

LA SANTE DE LA VIGNE

ET POUR

L'AMOUR DU VIN

# PREAMBULE

Le but de cet exposé est de mettre à portée de mains du lecteur des éléments d'information et de réflexion utiles à la gestion du sol en général, et plus particulièrement dans le cadre d'un domaine viticole.

Cet exposé s'adresse à toute personne, professionnel ou amateur, qui s'intéresse au sol. Il ne donne pas de conseils spécifiques, mais développe des concepts innovants décrits dans la littérature scientifique.

Il est ouvert à la critique et aux suggestions pour l'améliorer et se veut un lien entre science biologique et les passionnés du sol.

Bonne lecture !

Merci de faire vos commentaires et suggestions à:  
[contact@domaineevens.com](mailto:contact@domaineevens.com)

# TEXTURE DU SOL (1)

Le sol comporte 3 phases: une phase solide (minérale et organique), une phase liquide (solution du sol) et une phase gazeuse (air, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).  
On appelle texture la résultante du mélange de terres fines et grossières dont les pourcentages varient d'un sol à l'autre.

## Échelle granulométrique de la texture du sol

Terre fine					Terre grossière	
Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers	Cailloux
< 2 $\mu$ m	2 – 20 $\mu$ m	20 – 50 $\mu$ m	50 – 200 $\mu$ m	0.2 – 2 mm	2 – 20 mm	> 20 mm

Les particules les plus intéressantes en agriculture sont les terres fines.

# TEXTURE DU SOL (2)

## Propriétés des minéraux argileux:

- très petite taille, haute porosité, grande surface, structure en feuillets, charge négative.
- forment des solutions colloïdales qui flocculent quand leurs charges sont neutralisées par des cations comme  $\text{Ca}^{2+}$ .

## Conséquences:

- adsorbe beaucoup d'eau réversiblement → réserve d'eau non liquide pour les plantes.
- grande capacité d'échange cationique (CEC) et d'éléments nutritifs, fonctionne comme une résine adoucisseuse d'eau.

La

CEC est fonction de la teneur en argile, mais aussi de la matière organique) MO .

Types principaux de minéraux argileux dans un sol: illite > chlorite > smectites > vermiculite > kaolite. Au cours du temps illite et chlorite peuvent se transformer en vermiculite et smectites. Attention à la notion de "terroir" !

Minéral	Surface totale m <sup>2</sup> /g	CEC mEq/100g
Illite $\text{K Al}_2(\text{OH})_2, (\text{Al}, \text{Si}_3(\text{O},\text{OH})_{10})$	100 - 175	10 - 40
Chlorite $\text{Mg}_3(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_8 (\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10}$	100 - 175	10 - 40
Smectites $2\text{Al}_2\text{O}_3, 8\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}, n\text{H}_2\text{O}$ Montmorillonite $(\text{Mg}, \text{Ca}) \text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, 5\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$	700 - 800	80 - 150
Vermiculite	760	100 - 150
Kaolite $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$	10 - 30	5 - 10

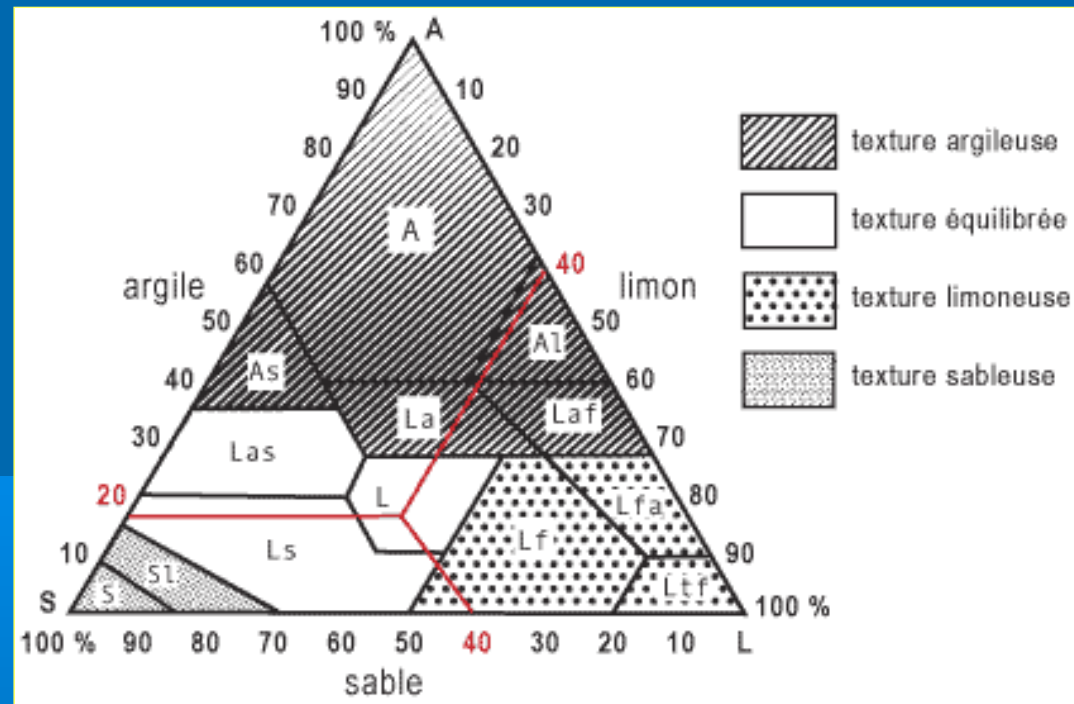
# TEXTURE DU SOL (3)

## Triangle des textures

La texture du sol est définie par la grosseur des particules qui le composent : % sable, limon, argile.

A : argileux  
As : argilo-sableux  
Al : argilo-limoneux  
La : limono-argileux  
Laf : limono-argileux-fin  
Las : limono-argileux-sableux

L : limoneux  
Ls : limono-sableux  
Lfa : limoneux fins argileux  
Lf : limoneux fins  
Ltf : limoneux très fins  
Sl : sablo-limoneux  
S : sableux



# TEXTURE DU SOL (4)

Les roches du sol sont composées principalement de **silicates (Si) d'aluminium (Al) hydratés (argiles)**, de **quartz (SiO<sub>2</sub>)**, d'oxydes et d'hydroxydes de Fe et d'Al, de sulfure de **Fe**, de carbonate de **Ca** et **Mg** et d'éléments traces.

Les argiles confèrent au sol sa texture et ses propriétés mécaniques. Elles sont généralement à **l'état floclé par l'action des ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>** ce qui donne au sol ses **bonnes qualités agronomiques**: légère, bonne perméabilité à l'air et à l'eau, retrait modéré à la dessiccation.

Ce phénomène est **réversible**: les argiles se dispersent lorsque les ions **Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> sont remplacés (lessivage, excès d'engrais)** par des cations plus petits, plus labiles, comme **Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** (chargés négativement, les argiles se repoussent).

Mouillée, **cette terre devient compacte, collante, asphyxiante** et imperméable à l'eau et à l'air. Sèche, l'argile développe une tension de succion importante pour l'eau qui peut s'opposer à celle des racines des plantes.

**Remède** : on ajoute du **Ca<sup>2+</sup>** sous forme de sulfates (gypse) ou de la matière organique (MO) pour re-floculer les argiles.

# STRUCTURE DU SOL (1)

La structure du sol correspond à la façon dont les **argiles** et la **Matière Organique (MO)** et plus particulièrement l'**humus** sont **imbriqués** dans le sol.

Seule la structure du sol peut être modifiée par ajout de MO et/ou de  $\text{Ca}^{2+}$ . La texture ne peut être modifiée à l'échelle humaine !

En présence de sels minéraux (Fe/Al) et de MO les argiles forment des **Complexes Argilo-Humiques (CAH)**.

Les argiles peuvent fixer la MO (humus) par adsorption sur/dans leurs feuillets par l'intermédiaire des oxydes et hydroxydes d'Al et de Fe qui forment un revêtement pelliculaire. Plus les argiles sont fins, plus la MO est retenue, et plus la minéralisation est lente.

Les CAH s'agglomèrent en agrégats en incorporant des filaments mycéliens, du mucus bactérien (polysaccharides) et des radicelles.



# STRUCTURE DU SOL (2)

## Structure fragmentaire

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

## Structure particulaire

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

## Structure compacte

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

# HUMUS définition

L'humus se trouve principalement dans la couche supérieure du sol créée et entretenue par la **(1) décomposition** de la matière organique (MO) fraîche de la **litière**. Cette décomposition s'effectue par des bactéries, des champignons, des protozoaires (microfaune du sol). Les produits de cette décomposition sont **(2) restructurés par polymérisation** (réaction de Maillard, rien à voir avec des molécules du vivant) en nouveaux produits **plus stables, plus complexes**, que sont les **substances humiques ou humus** (acides fulviques et humiques, humine et autres).

L'humus (mélange de polymères) forme des micelles **chargées négativement** réagissant fortement avec les cations comme  $\text{Ca}^{2+}$  apportant un **effet structurant au sol**.

L'humus est décomposé lentement (**minéralisation +  $\text{CO}_2$** ) par la microfaune en présence d' $\text{O}_2$  apportant des **nutriments (N,P,S, autres)** pour la plante.

Si la séquestration de l'humus est forte dans les particules d'argile, sa minéralisation sera d'autant plus lente.

La vitesse d'humification comme sa minéralisation est plus rapide avec l'augmentation de l'activité de la microfaune, de la température, de l'humidité et de la quantité d'oxygène.

# HUMUS propriétés

C'est une matière souple, aérée, d'aspect brun foncé à noir (pas forcément dû au Fe), à odeur caractéristique, et qui est relativement résistante à la décomposition. C'est un excellent agent d'amendement naturel des sols (aération, ameublement, décompactant).

Il adsorbe bien l'eau et joue un rôle primordial dans la rétention des cations  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , etc. (CEC) en diminuant leur lessivage. C'est un bon support pour les microbes.

L'humus est dispersé dans les horizons du sol par les fissures, l'eau et par les animaux fouisseurs (vers de terre) pour générer la terre végétale. Il forme avec les argiles les complexes argilo-humiques (CAH) qui retardent encore plus sa décomposition.

L'humus se décompose lentement, mais s'il n'est pas renouvelé par la litière, le sol perdra ses propriétés de terre végétale.

L'humus (les acides organiques qu'il contient) solubilisent à leur tour les roches du sol et altèrent la roche-mère.

# HUMUS rôle dans le sol

L'humus et le CAH sont un réservoir de MO et donc d'éléments nutritifs pour les racines de la plante.

Son aspect micellaire et sa lente décomposition en font un agent d'amendement. Il améliore la qualité physique de la terre puis génère lentement par minéralisation C, K, N, P, S.

Si l'humus est enfoui trop profondément par labour ou est asphyxié dans un sol régulièrement inondé, il se dégrade dans des conditions anaérobies et devient bleuâtre ou verdâtre (réduction du  $\text{Fe}^{3+}$  en  $\text{Fe}^{2+}$ , sent mauvais ( $\text{CH}_4$  et  $\text{H}_2\text{S}$  et devient toxique pour les racines.

**Humus et compost vieux c'est la même chose.**

Il est utile de connaître la quantité totale d'humus et sa qualité. La mesure du coefficient CEC, comme le rapport C/N, donnent une indication sur la qualité du sol.

Les acides organiques qui constituent l'humus lui confèrent les propriétés d'une résine échangeuse de cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ , comme les argiles.

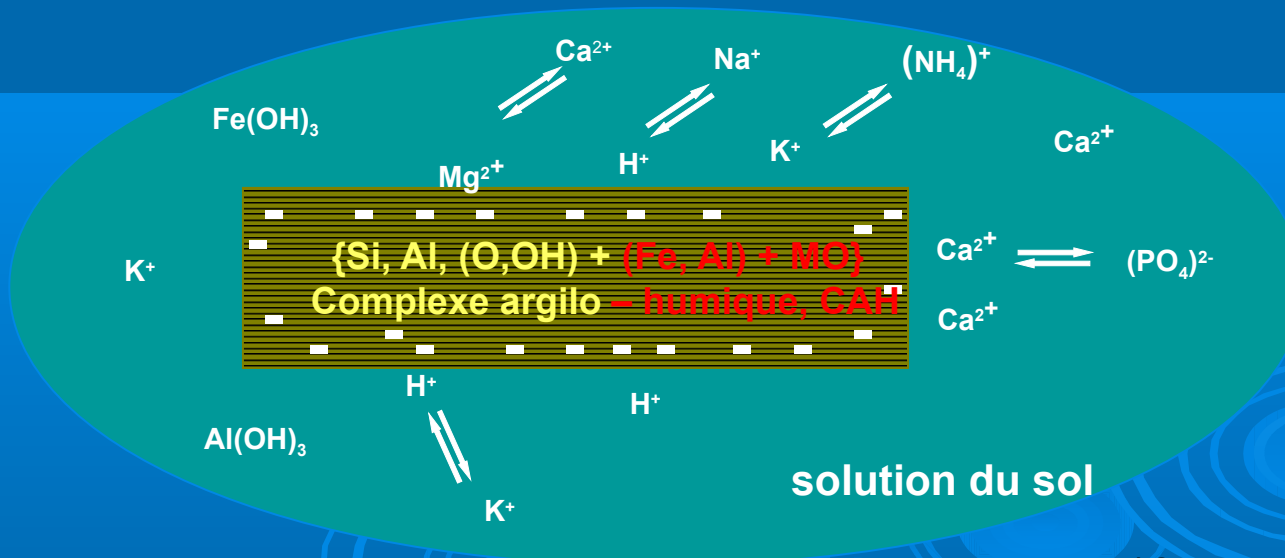
En agriculture, pour conserver les propriétés du sol, il faudra procéder à des apports compensatoires de MO.

# COMPLEXE ARGILO – HUMIQUE, CAH

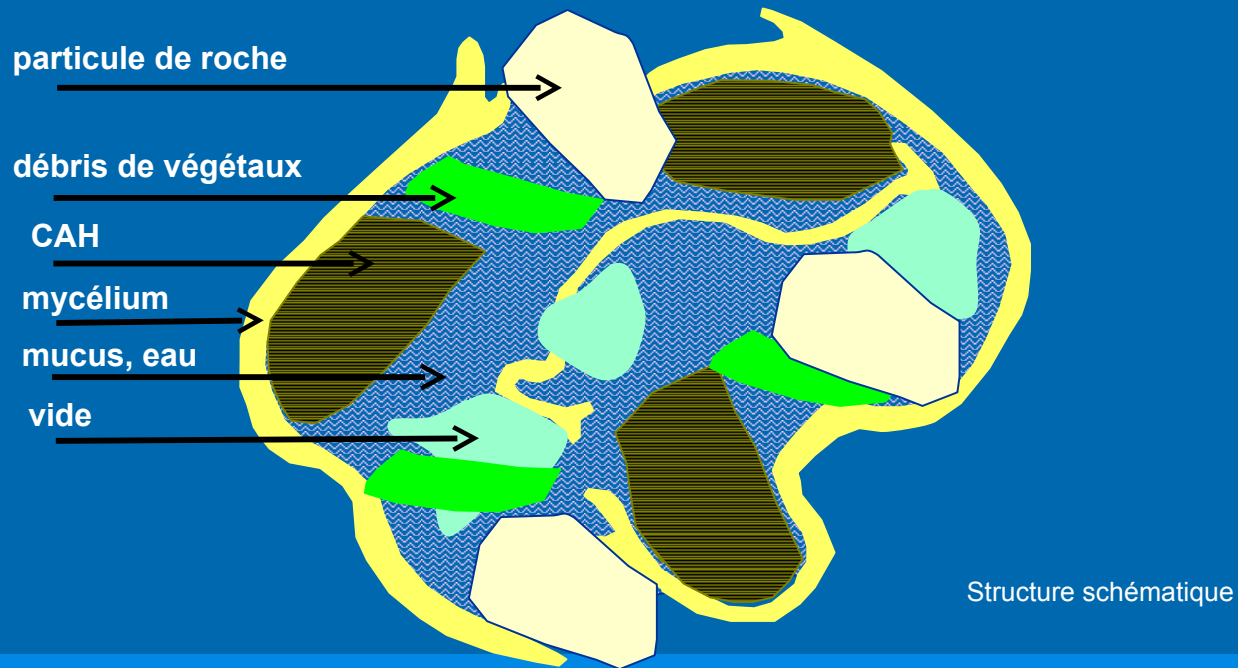
Le CAH est formé d'argiles colloïdales en feuillets dans lesquels sont adsorbés réversiblement la **MO humique et des hydroxydes de Fe et d'Al**.

Ces argiles colloïdales peuvent à leur tour lier et échanger les cations en solution dans le sol qui seraient lessivés sans l'interaction de ces complexes. **D'où leur importance cruciale dans l'alimentation racinaire des plantes.**

Les CAH sont ensuite agglomérés avec d'autres particules du sol (mycélium, polysaccharides, mucus, bactéries, protozoaires, débris, radicelles) en agrégats plus volumineux. La structure du sol est l'arrangement de ces macro-agrégats.



# STRUCTURE D'UN AGREGAT



Ces agrégats s'assemblent plus ou moins sous l'action conjuguée des cycles de dessiccation – humectation, de l'activité de la microfaune du sol, du gel-dégel et des racines, pour former des sols à structure (i) grumeleuse, (ii) lamellaire, (iii) polyédrique.

Leurs analyses permettent d'estimer les propriétés mécaniques, la circulation de l'eau (et sels dissouts) ainsi que des gaz dans le sol.

# MATIERE ORGANIQUE, MO

MO = plante + CO<sub>2</sub> + E solaire + H<sub>2</sub>O + azote (élément limitant)

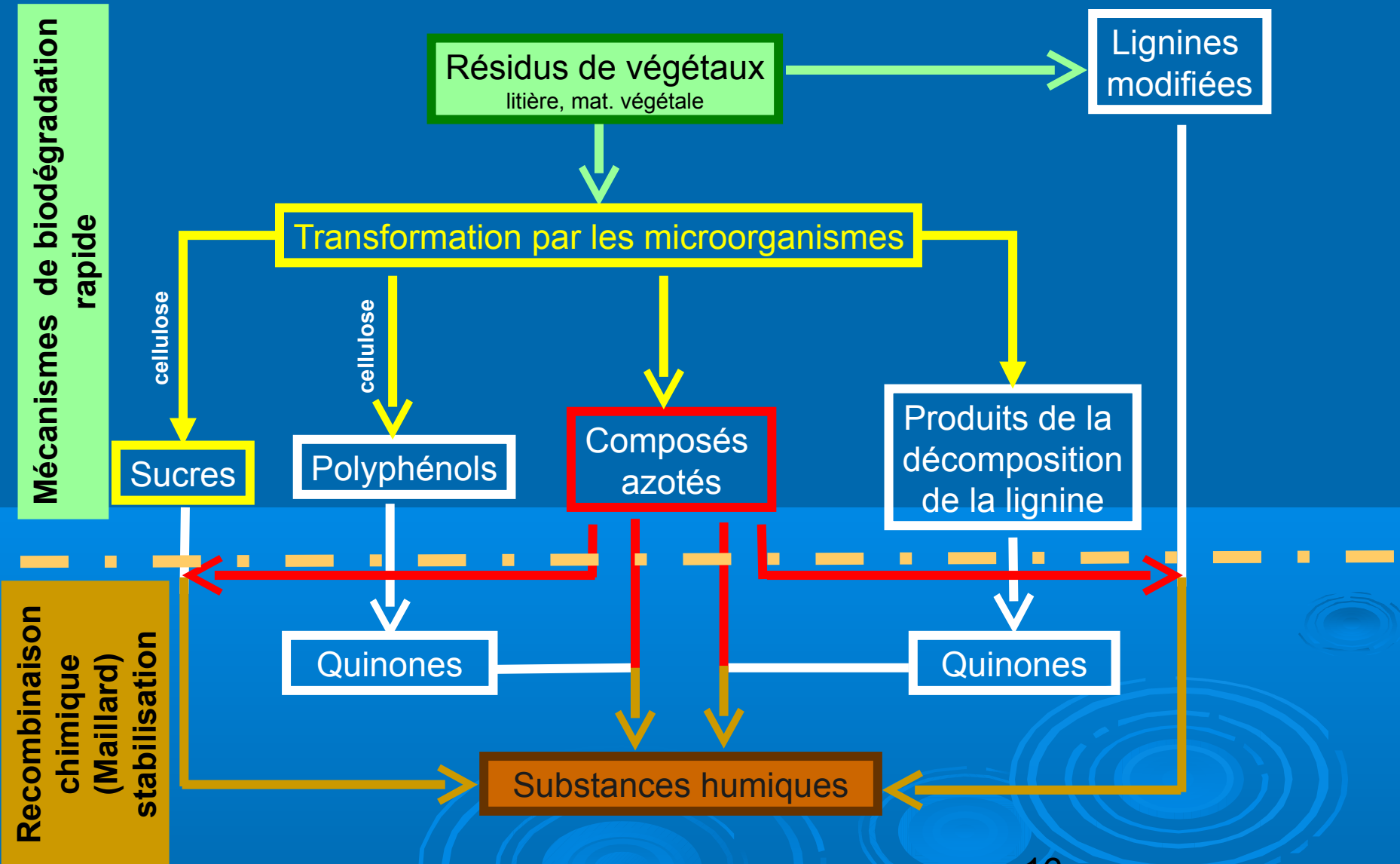
MO localisée  
dans les horizons du sol :

MO active      **O** = MO fraîche, minéralisation  
rapide

MO lente      **A** = humus (MO réarrangée, polymérisée,  
minéralisation lente)

MO passive    **B** = humus adsorbé aux très fines  
particules d'argile dans l'horizon B  
(peut minéraliser dans des conditions spéciales par apport de MO fraîche).

# FORMATION DES SUBSTANCES HUMIQUES





# TERRE VEGETALE

Mélange en proportions très variables d'humus, de terre (argiles, limons, sables, graviers), de roches calcaires, d'oxydes /hydroxydes de Fe, d'Al et d'autres éléments traces.

C'est un milieu nutritif (bouillon de culture) qui, humide, permet la vie d'une microfaune et macrofaune et favorise le développement racinaire.

Structure: cycles gel/dégel, floculation des argiles, CAH

La rétention des pesticides par le sol (adsorption) est augmentée lorsque la MO du sol est aussi élevée. Mais leur dégradation est plus rapide à la surface du sol qu'en sous-sol à cause de l'augmentation de l'activité biologique près de la surface (biodégradation).

# LE COMPOST

**Pourquoi humus et compost vieux sont une même chose.**

Le compost reproduit en accéléré (effet de masse) les étapes de transformation de la litière en humus du sol : composter, c'est produire des substances humiques.

Tout ce qui a été dit pour l'humus est valable pour le compost.

Généralement, le compostage se déroule en deux phases : **(1)** une phase de dégradation dominée par une intense activité microbiologique qui s'accompagne d'une élévation de température (minéralisation rapide). Puis, **(2)** la diminution de l'activité biologique due à l'épuisement de leur source en nourriture abaisse la température progressivement et fait place aux processus d'humification (phase de restructuration / polymérisation) qui peut durer des semaines.

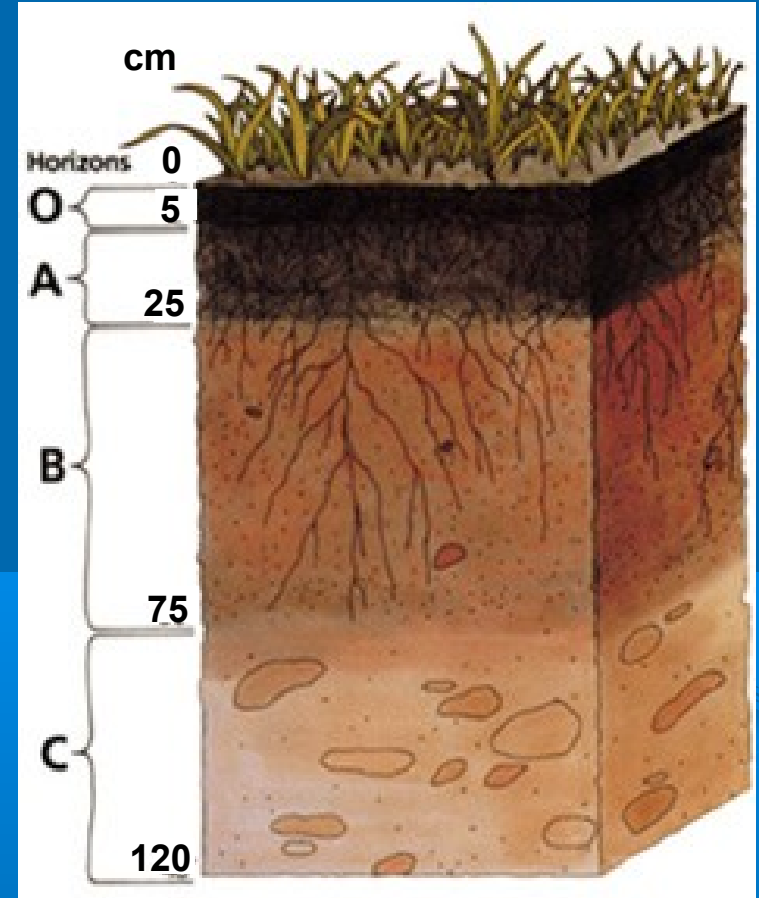
Un compost vieux et mature conduira à une minéralisation lente dans le sol concomitant à un relargage lent de nutriments.

Au contraire, un compost immature (phase 1) donc encore trop riche en carbone facilement assimilable, provoquera une surconsommation d'azote par les bactéries du sol ou une faim "temporaire" d'azote » pour finir sa maturation.

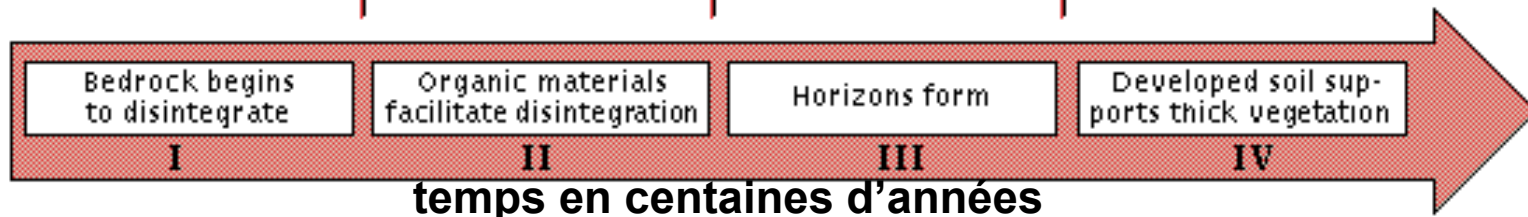
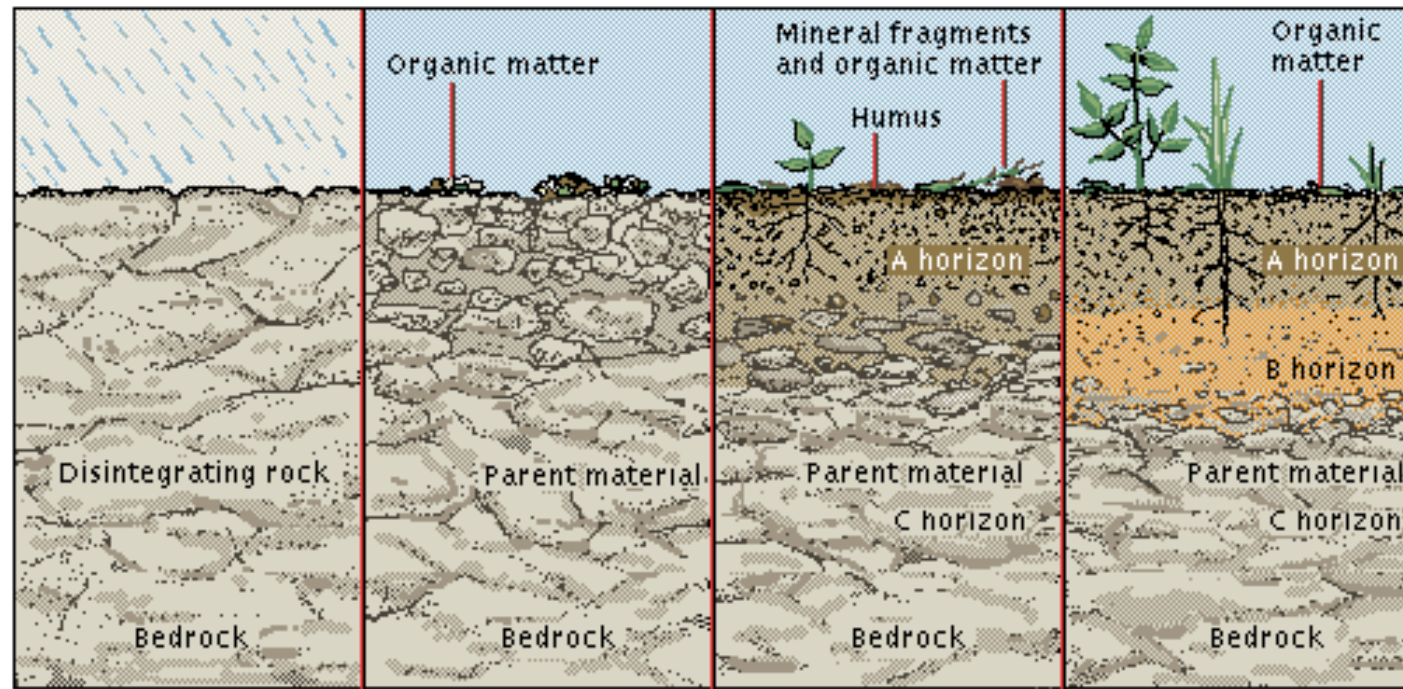
# LES HORIZONS DU SOL

## Horizons

- O** : litière, MO
- A** : gradients décroissants de MO
- B** : zone d'accumulation. Les éléments lessivés de A (MO, Fe, Ca) se concentrent en B.
- C** : zone de transition vers la roche-mère. Pas de MO.

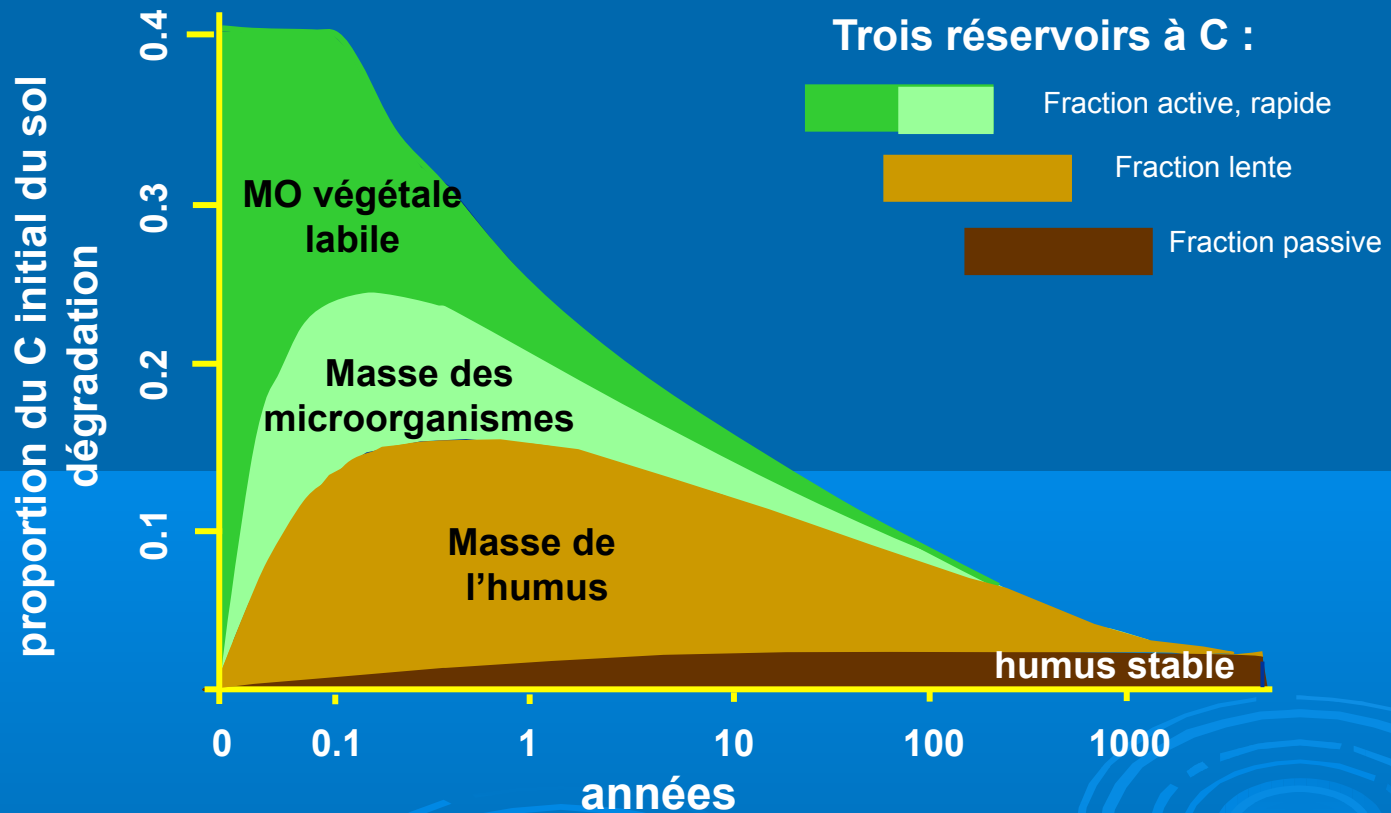


# FORMATION DU SOL



# TEMPS DE RESIDENCE DU CARBONE DANS LE SOL

20 à 30 % du C ajouté au sol y restera après un an



Les pratiques agricoles peuvent se comporter comme des puits ou des sources de C.



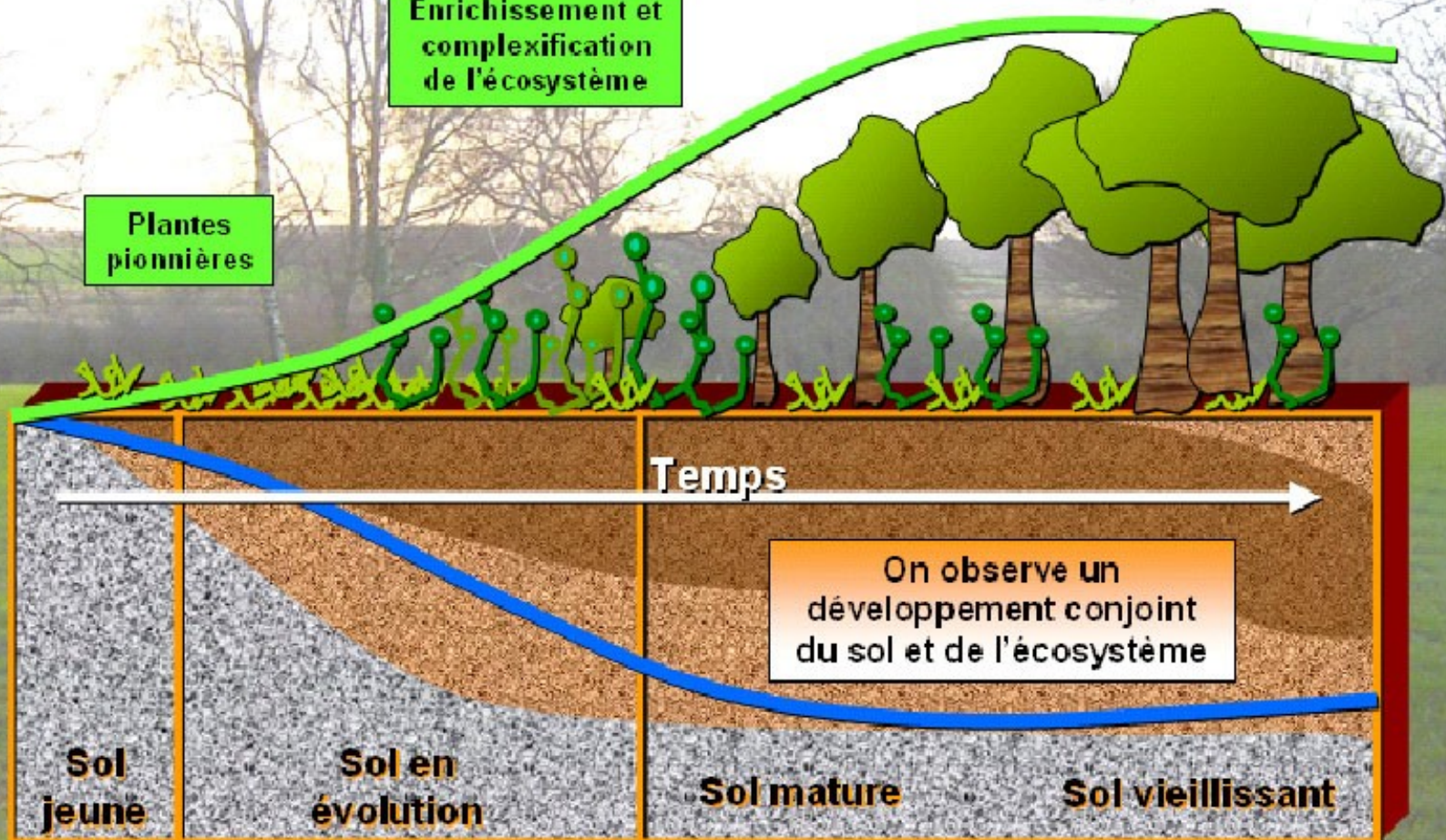
# Le sol et l'écosystème

Climax désigne l'état final d'une succession écologique et l'état le plus stable

CLIMAX : équilibre dynamique

Enrichissement et complexification de l'écosystème

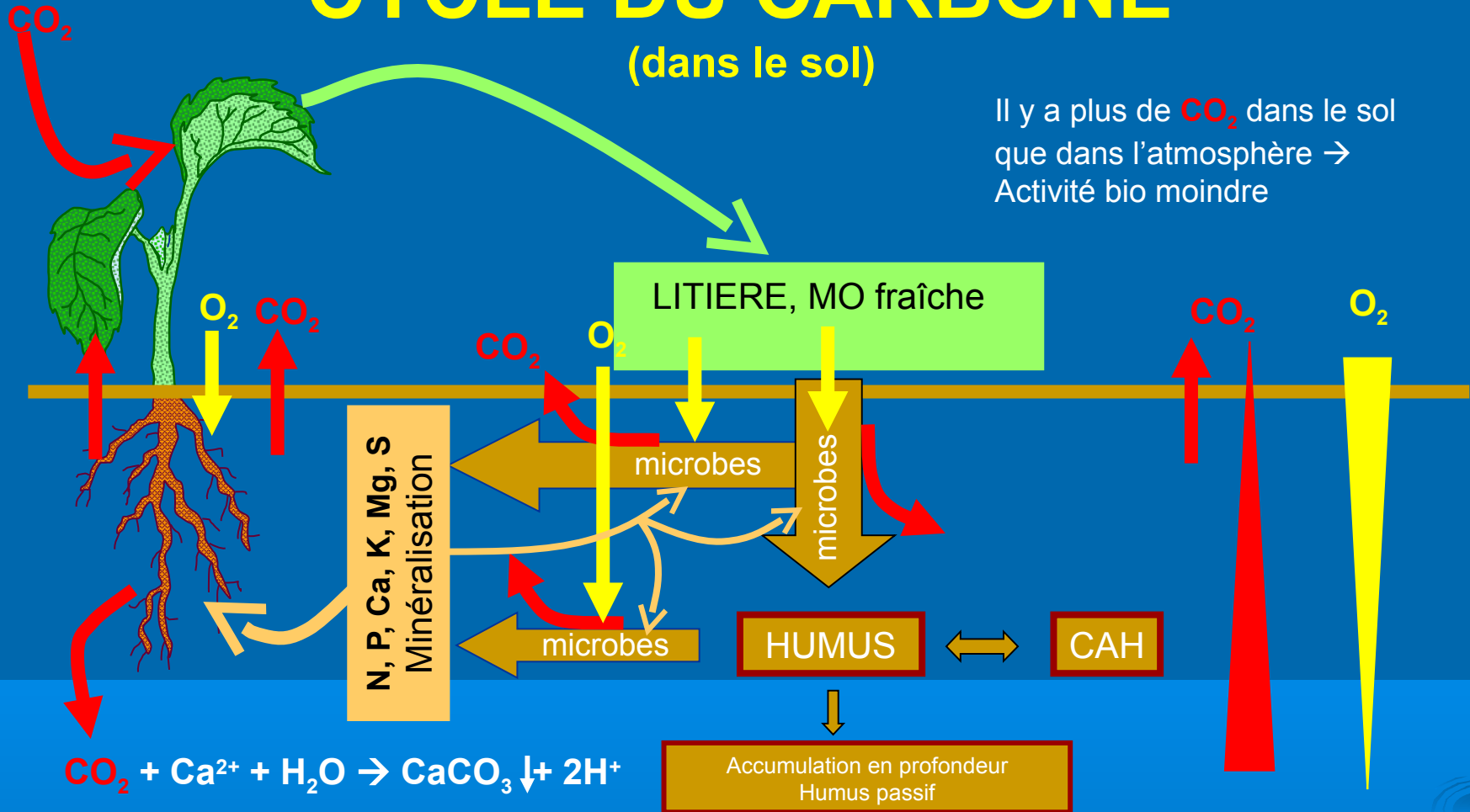
Plantes pionnières



# CYCLE DU CARBONE

(dans le sol)

Il y a plus de  $\text{CO}_2$  dans le sol que dans l'atmosphère →  
Activité bio moindre



Le carbone de la litière sert de carburant aux microbes qui produisent l'azote et les minéraux pour la plante. Si trop d'oxygène dans le sol (par des labours) → augmentation de la biomasse et donc de la minéralisation de l'humus → rejet de  $\text{CO}_2$ . Phénomène plus actif dans la zone superficielle. Le  $\text{CO}_2$  plus lourd que l'air est toxique pour les racines. Inactivation du  $\text{CO}_2$  par le  $\text{Ca}^{2+}$  en carbonate insoluble.



# LES RACINES (1)

Ce sont les **jeunes** racines (elles possèdent la structure primaire de la plante) qui effectuent les échanges avec le sol. Mais seuls les **poils absorbants** qui sont situés près de **l'extrémité de la racine** effectuent ces échanges avec le sol (eau, minéraux, exsudats).

Les racines âgées possèdent une **écorce imperméable** et ne servent qu'au transport de la sève brute et à l'ancrage de la plante.

Pour avoir un bon contact entre les poils absorbants et le sol, il est indispensable d'avoir des **particules très fines** comme les complexes argilo-humiques (**CAH**) du **mucus** bactérien (polysaccharides) et des **mycorhizes**. Les limons et sables sont moins efficaces.

Ce sont les **racines près de la surface du sol** qui sont les plus actives pour l'absorption des nutriments (plus proches du feuillage, moins de  $\text{CO}_2$ , plus proches de la zone d'activité de la microflore). D'où les problèmes de labours! Un **travail du sol trop profond > 20 cm** peut détruire les jeunes racines.

Les racines profondes pompent plutôt de l'eau. Car l'absorption des nutriments est énergivore et nécessite de l' $\text{O}_2$ . En profondeur le  $\text{CO}_2$  est élevé, les nutriments disponibles sont plus rares. L'absence de CAH, d'humus et une microflore très réduite ne sont pas favorables à l'absorption des minéraux.



# LES RACINES (2)

On s'occupe beaucoup du feuillage de la vigne. Pourtant, les racines représentent une centaine de fois la surface du feuillage!

L'environnement racinaire et la vie souterraine (vers de terre, mycorhizes, MO, bactéries et champignons, root-talking) n'intéressent malheureusement que peu de gens. Or un sol sain et riche en biomasse génère des cultures saines et plus résistantes aux maladies.

Mis à part leur rognage lors des labours ou du travail sous le rang, on gave souvent les racines avec des fumures mal appropriées qualitativement et quantitativement.

De manière générale, la plupart des sol de vignobles sont beaucoup trop riches (fumure excessive) et n'ont pas assez de MO. La vigne a trop de vigueur (trop d'eau dans les tissus) et les mécanismes de défense sont altérés. Ce type de sol est similaire à celui d'une culture hydroponique, où la terre ne sert que de support physique à la vigne. Dans ce cas, la notion de terroir est bien malmenée.

# LA RHIZOSPHERE (1)

**Les racines** modifient physiquement le sol en poussant dans les fentes et dans les zones de faible résistance. L'exsudat qu'elles sécrètent favorise le développement d'une myriade de microorganismes. Dans des conditions normales, les racines des plantes annuelles (céréales) peuvent descendre jusqu'à 2 m de profondeur alors que les racines des plantes pérennes ligneuses peuvent descendre à plus 5 m.

On néglige trop souvent l'importance et le rôle des résidus racinaires dans le sol. Par exemple, dans une prairie, environ 50 - 60% de la production nette de biomasse sont racinaires. En terre arable, la masse de racines restant dans le sol après une récolte de céréales représente environ 15 – 40 % de la masse de la récolte en grains. Ce qui peut signifier un apport en MO d'environ 3 t/ha selon le type de céréale.

On appelle **rhizosphère** la zone d'environ 2 mm autour de la surface extérieure de la racine. Les caractéristiques chimiques et biologiques de cette zone peuvent être très différentes de la zone de sol adjacente.

On appelle **rhizo-déposition** le relargage par les racines de substances organiques (i) de bas poids moléculaire (acides organiques, sucres, acides aminés, composés phénoliques allélopathiques et facteurs de croissance) et (ii) de composés de haut poids moléculaire (mucilages, débris cellulaires) qui forment le mucigel avec son cortège de microbes. Il joue le rôle de lubrifiant et de milieu de culture entre racines et particules d'argile.

Le nombre de microbes dans la rhizosphère est de ~ 10 fois supérieur à celui de la zone de sol adjacente.

# LA RHIZOSPHERE (2)

**Poils absorbants:** ne sont présents que sur les très jeunes racines (100-400  $\mu\text{ m } \varnothing$ ); ils sont nombreux et microscopiques (10-50  $\mu\text{ m } \varnothing$ ), et augmentent considérablement la surface d'absorption (>100 fois la surface feuillaire) de la plante.

**L'absorption par les poils est favorisée par:**

- un bon contact physique des poils avec les particules du sol
- la finesse des particules de terre, CAH, argiles, MO versus limon, sable, gravier, pierres.
- la présence d'une zone d'humidité (hydrosphère) constituée par les bactéries et leur mucus, les mycorhizes et les CAH qui en cas de sécheresse prolongée vont restituer à la plante l'eau qui est retenue.
- Un faible taux de nutriments.

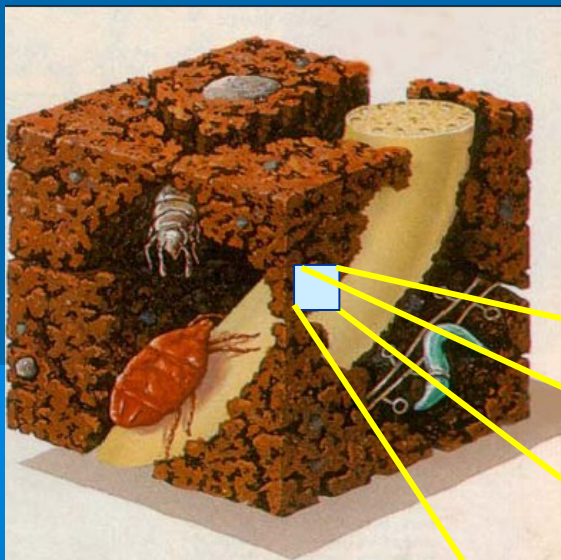
**Mucus bactérien :** importance de la vie bactérienne du sol (1 cuillère à café de sol contient 5 milliards de bactéries sans compter les virus (encore plus nombreux). Ces bactéries sécrètent des mucus (polysaccharides, biofilms) très hydratants.

# LA TERRE VEGETALE EST L'EQUIVALENT D'UN INTESTIN EXTERNE POUR LA PLANTE

Digestion de la MO par les enzymes secrétées par la microflore et absorption des nutriments par la gigantesque surface des poils et des mycorhizes.

1 cm<sup>3</sup> de terre

contient:



1 - 5 km d'hyphes fongiques

**10<sup>6</sup> - 10<sup>9</sup> bactéries**

**10 – 60'000 protozoaires**

50 - 100 nématodes

< 1 collembole

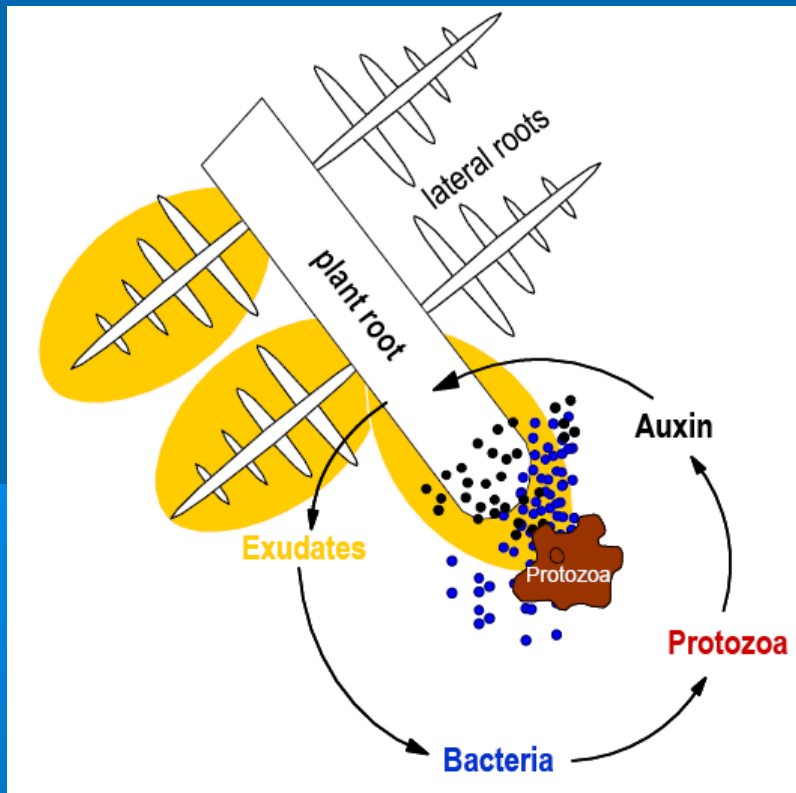
< 1 insecte

protozoaires



# ACTIVATION DE LA PRODUCTION DE RACINES

Les protozoaires affectent la croissance de la plante en modifiant la croissance des racines.



The 'hormonal loop' Brandt & Bonkowski, 2002

Comment ça marche:

L'exsudation racinaire stimule la croissance (1) d'une communauté bactérienne variée et (2) de protozoaires bactéricivores. La prédation sélective des bactéries par les protozoaires favorise les bactéries qui produisent l'hormone auxine. La libération d'auxine induit la croissance des racines latérales qui, à leur tour, sécrètent plus d'exsudat qui va stimuler la croissance bactérienne.

# LES MYCORHIZES (1)

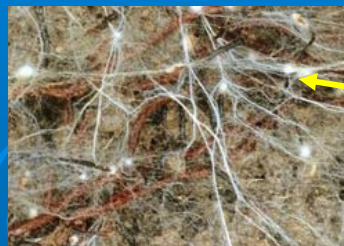
**Mycorhizes** : relation symbiotique **mutualiste** entre un poil adsorbant et le mycélium d'un champignon.

Le mycélium (microscopique) du champignon possède des ramifications filamenteuses (hyphes) qui s'étendent dans le sol à **plusieurs centaines de mètres** de la racine permettant une **énorme augmentation de la surface d'échange racinaire** (plus de 1000 x).

Les mycéliums peuvent atteindre une taille considérable et vivre longtemps. Par exemple, une colonie d'armillaires occupe 5 ha, pèse dix tonnes et a 1500 ans, selon les estimations. Ainsi, **les champignons font partie des plus gros et des plus vieux organismes vivants.**

Le mycélium peut former des fructifications, qui sont les champignons proprement dits.

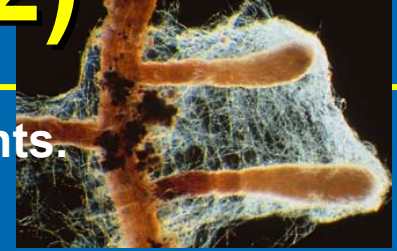
Ils ont besoin d'une source de carbone organique pour s'alimenter. L'arbre fournit au champignon les sucres, et ce dernier lui offre en échange des **éléments nutritifs N, P, K, Cu, Zn et de l'eau** qu'il a prélevés, à l'aide de ses hyphes qui couvrent une surface considérable.



mycorhizes



# LES MYCORHIZES (2)



Les plantes mycorhizées tolèrent mieux les facteurs stressants.

Le champignon élabore:

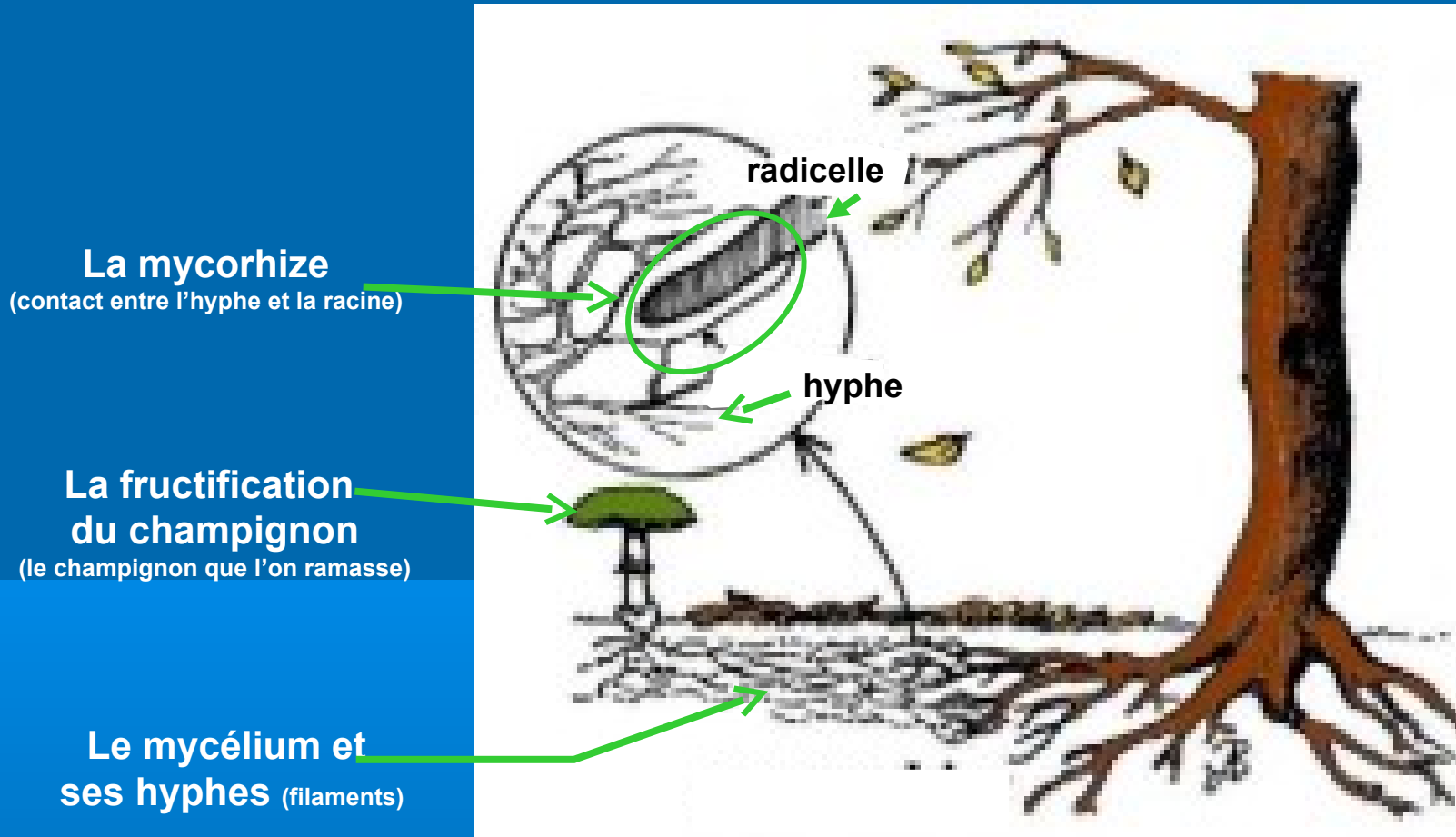
- **des sucres** (mannitol, arabitol), qui rendent les racines plus résistantes au gel.
- **des antibiotiques** et des substances qui augmentent le pouvoir défensif des plantes contre les pathogènes (nématodes, champignons toxiques) contenus dans le sol.
- **des phytohormones** (auxine, gibérelline, cytokynine, éthylène) qui favorisent la croissance des plantes.

Dans la vigne, on a probablement des endomycorhizes (hyphe du champignon formant des arbuscules dans les cellules de l'écorce de la racine et invisible à l'oeil nu).

Les **concentrations élevées d'azote sont défavorables aux mycorhizes**. Le champignon et la plante échangent moins d'éléments nutritifs entre eux, et la santé de la plante peut en subir les conséquences. **L'utilisation de N est donc délicate**.

Les fongicides (systémiques) ont eux aussi certainement un effet négatif sur les mycorhizes.

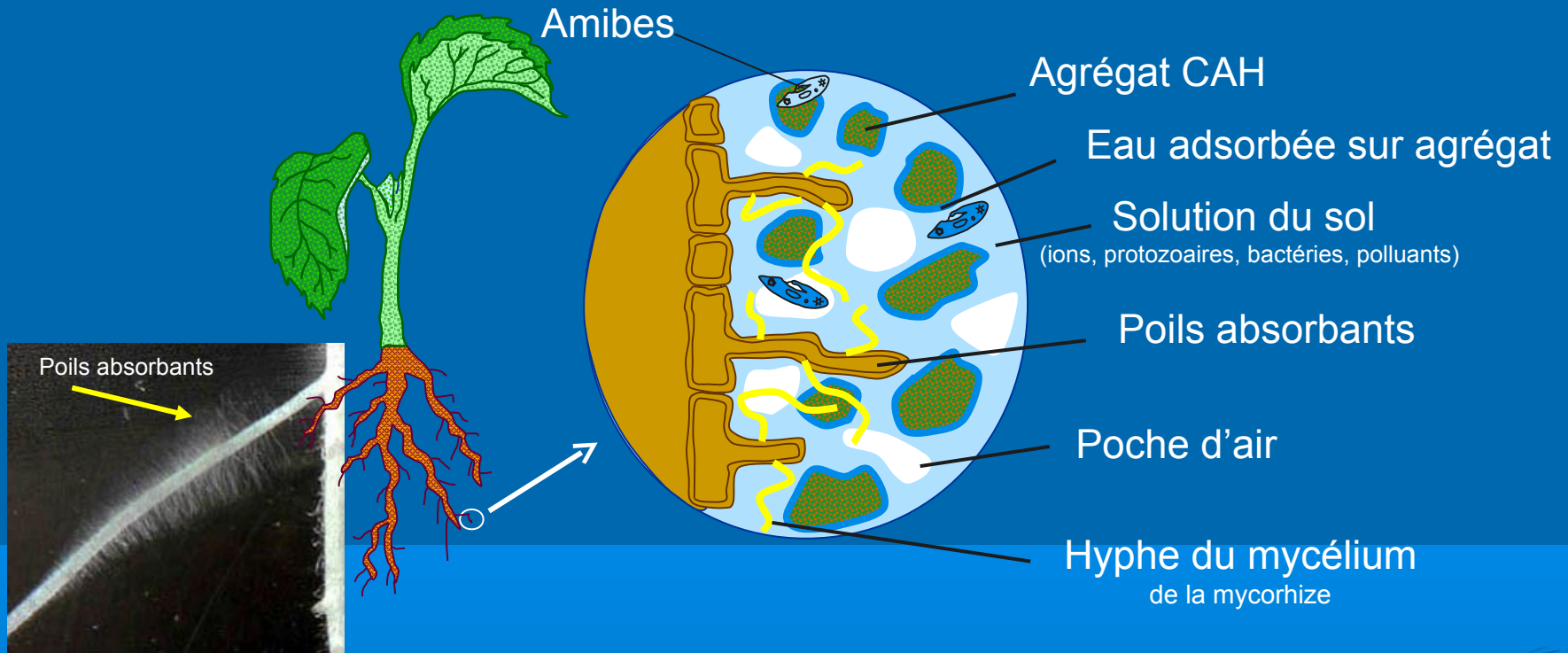
# LE CHAMPIGNON



Ce que nous voyons sur le sol n'est qu'une infime partie du champignon.

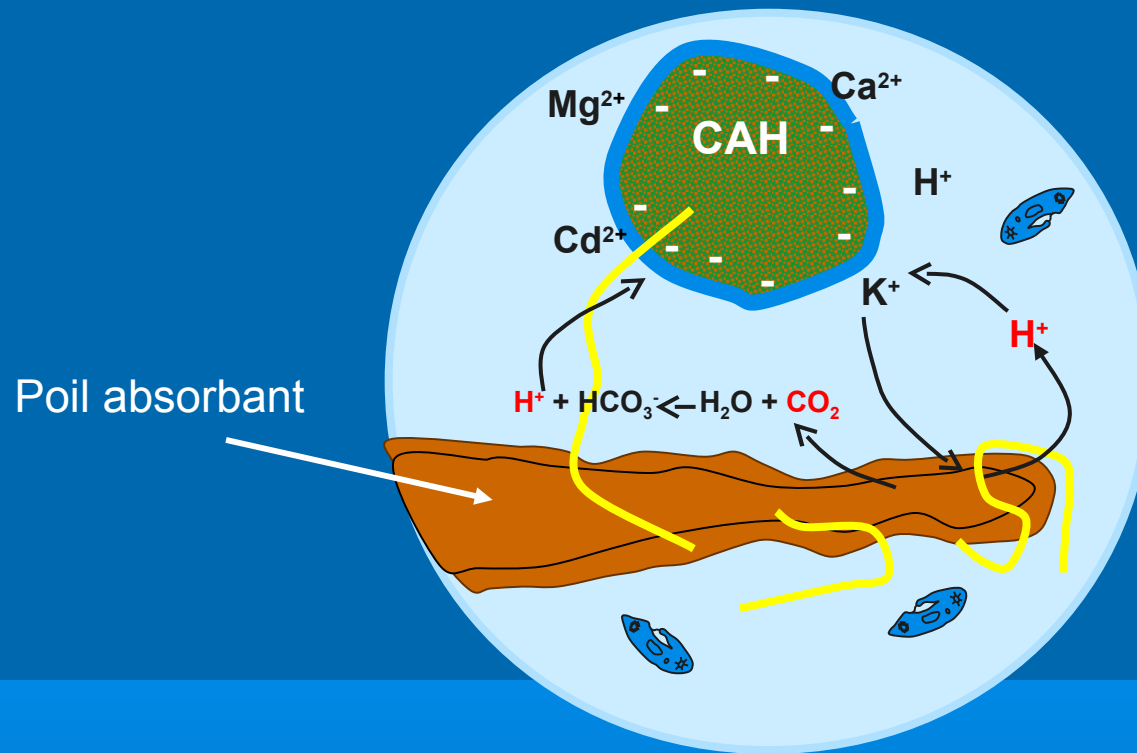


# L'ÉCHANGE DE L'EAU



**En cas de sécheresse :** dans un premier temps, les poils absorbants pompent l'eau de la solution du sol, puis celle de la couche d'eau adsorbée sur les agrégats (CAH) et finalement l'eau restituée par la microflore qui se déshydrate en mourant (mycélium, protozoaires, bactéries, etc.) → importance d'avoir un sol riche et sain pour un effet tampon hydrique maximum.

# L'ÉCHANGE DE CATIONS



Croissance →  
Acidification du  
sol par  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}^+$

L'absorption et la sélection des cations du sol par les racines **coûtent en énergie**. Il est préférable que les nutriments soient en concentration optimum dans le sol (MO, microbes, apports ext.).

L'absorption des cations fait suite au **relargage de  $\text{H}^+$**  par les racines qui abaisse le pH du sol.

La respiration racinaire **relargue du  $\text{CO}_2$**  qui, dissout dans l'eau, **acidifie le sol**. Il est donc important de mesurer le pH du sol au niveau des racines.

# LA TRANSPIRATION

Un érable de taille moyenne perd plus de 200 L d'eau par heure durant l'été. Le système racinaire doit par conséquent pomper aussi 200 L d'eau par heure dans le sol. Deux mécanismes entrent en jeu :

**1. Poussée racinaire:** La plante absorbe plus d'eau par osmose au niveau des racines qu'elle n'en transpire, d'où fuite par les pores spéciaux des feuilles (la nuit), ce qui provoque la guttation. La guttation des graminées de l'enherbement joue un rôle dans l'humidification de la litière et de la couche superficielle du sol. Pleurs de la vigne après la taille.

**2. Aspiration de la sève brute:** L'évapotranspiration au niveau des stomates des feuilles provoque une aspiration qui tire la sève brute du xylème (contre la gravitation) en pompant l'eau du sol par les poils absorbants des racines.

Importance de l'hydrosphère racinaire

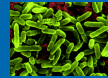


# LA BIOMASSE

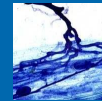
D'une manière générale, les animaux vivant dans le sol représentent une plus grande biomasse que ceux qui vivent en surface.

**Sous 1 ha de terre vivent en moyenne :**

1 t de bactéries



1 t de champignons



1 t de vers de terre



0.5 t d'isopodes, de collemboles, etc.



---

**TOTAL**

**3 ou 4 t d'organismes vivants**

Pour entretenir cette biomasse dont les déjections nourrissent les végétaux, combien faut-il de MO/ha/an ?

On estime que 10 kg de MO donnent 1 kg d'organismes vivants.

Il faudrait donc mettre 20 - 40 t /ha/an de MO pour nourrir tout ce monde.

Aujourd'hui, en Bourgogne, on met en moyenne 1 – 2 t/ha de fumier frais. Il y a 20 ans, on en mettait 150 t/ha. Vit-on sur le capital de nos ancêtres ?

Quelle est la quantité de MO critique pour la viticulture ?

# LA FIXATION DE L'AZOTE

De nombreux végétaux (légumineuses) établissent des relations symbiotiques mutualistes (bénéfiques pour les 2 partenaires) avec des bactéries fixatrices d'azote.

Leurs racines portent des renflements (nodosités) dans lesquelles vivent les bactéries anaérobiques fixatrices de  $N_2$  (genre *Rhizobium*). Chaque espèce de légumineuse s'associe à une espèce de bactéries *Rhizobium*. Une molécule d'azote donne 2 molécules d'ammoniac.



Cette réaction est très consommatrice d'énergie (16 ATP). Ces bactéries poussent donc dans des sols riches en MO qui fournissent l'énergie de la respiration cellulaire.

La leghémoglobine (contient du Fe) des nodosités tamponne l' $O_2$  impliqué dans l'intense respiration.

**Conséquences:** ces bactéries fournissent de l'azote assimilable, mais majoritairement des acides aminés qui passent dans le xylème pour se rendre dans le système caulinaire. En retour, la légumineuse leur procure des glucides et des substances organiques.

# L'AZOTE, N

L'azote est souvent le nutriment limitant dans le sol. Il est recyclé plusieurs fois par les organismes avant son assimilation par la plante. Lorsqu'on ajoute de l'azote dans le sol, il faut le faire pour les microbes et non pour la plante. Il s'agit toujours de petites quantités (10-20 U/ha) à mettre juste avant le démarrage de l'activité des microbes.

## **Théorie du feedback litière-azote-plante (Vitousek)**

### **Un sol pauvre reste un sol pauvre :**

Si un sol est pauvre en N, le C/N de la flore tend à augmenter.

→ Le C/N de la litière produit par cette flore tend à augmenter aussi.

→ La litière se décomposera moins vite (recyclage de N car microbes en faible quantité).

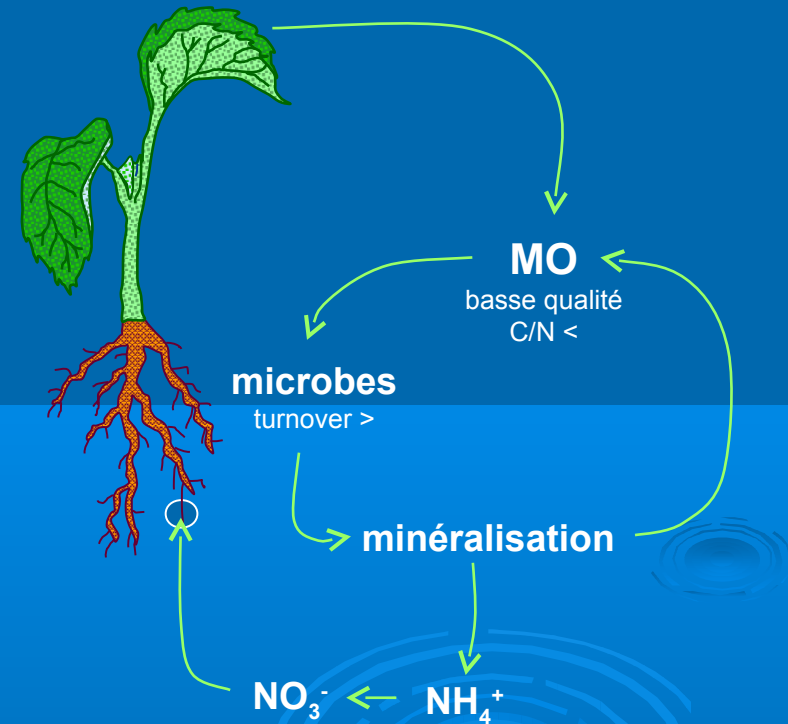
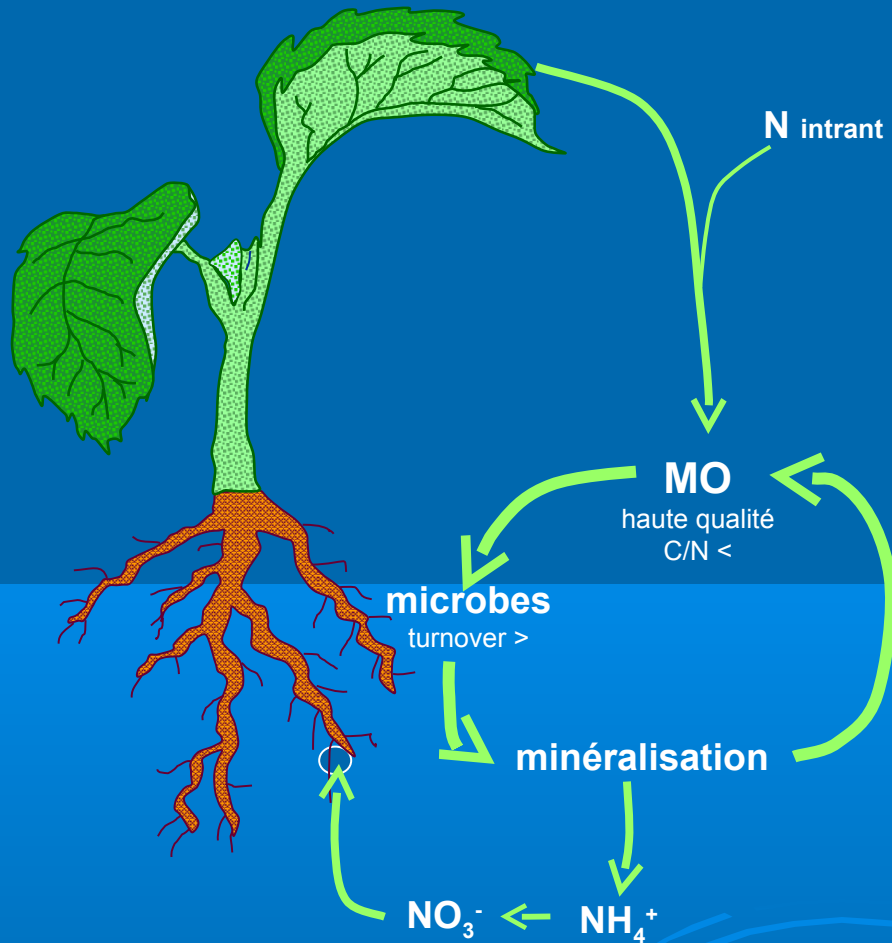
→ La minéralisation sera également faible donc moins de N disponible pour la flore → d'où sol pauvre.

La réserve de phosphore disponible est essentiellement dans la roche.

# L'AZOTE, ELEMENT CLEF

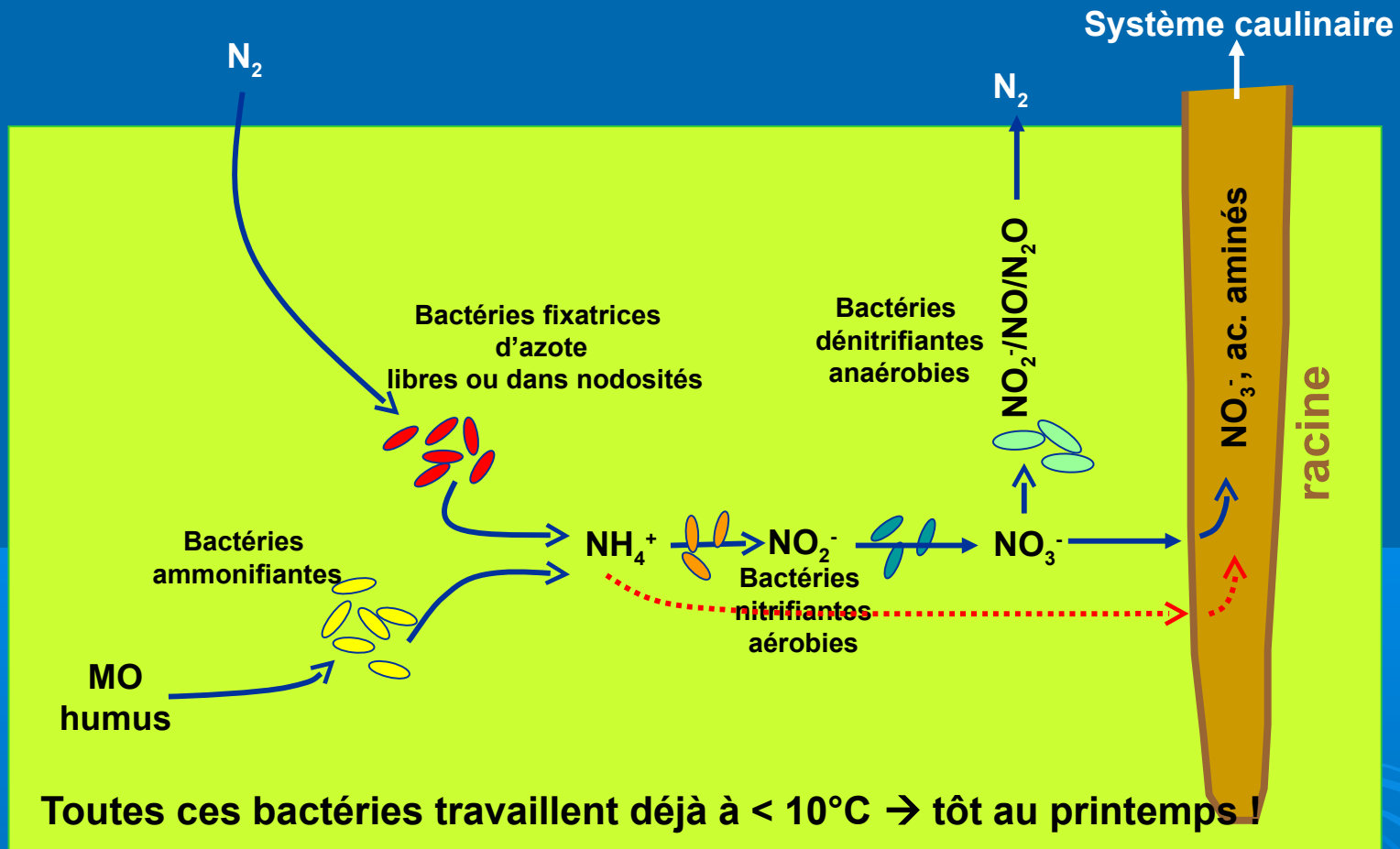
Un sol riche en N minéralise et libère N.

Un sol pauvre en N mobilise N.



**Soyez attentif à la qualité de la MO!**

# AZOTE - BACTERIES





# LES VERS DE TERRE (1)

Les températures optimales de l'activité des vers



de terre se situent entre 10° et 15° C, c'est-à-dire au printemps et en automne (nombreux turricules en surface).

Il n'est pas rare de trouver 200 à 250 vers de terre par m<sup>2</sup> dans des prairies. Mais, certains terrains sont

passés de 2 tonnes de vers de terre à l'hectare à 50 kg en raison des labours et de la monoculture.

(Un ver de terre coupé en 2 ne donne pas forcément 2 vers !)

Il est primordial d'avoir une quantité suffisante de nourriture sous forme de MO morte pour leur développement.

Leurs déjections sous forme de turricules contiennent en moyenne 5 fois plus d'azote, 7 fois plus de phosphore, 11 fois plus de potassium, 2 à 3 fois plus de magnésium et 1.5 fois plus de calcium que la terre environnante.

# LES VERS DE TERRE (2)

Tapissées d'excréments, les galeries de vers de terre sont plus stables et peuvent durer des années. Les racines recherchent ces galeries pour les nutriments accumulés et pour la faible résistance qui s'oppose à leur croissance.

Les traitements au cuivre, comme les produits phytosanitaires, sont mortels et peuvent nuire à leurs prédateurs. Le tassement provoqué par un poids de 1000 kg sur un sol mouillé peut avoir des conséquences asphyxiantes jusqu'à plus d'un mètre de profondeur.

L'accumulation de ces excréments dans le sol et en surface provoque un mélange intensif de la couche supérieure du sol. Ce sol transformé biologiquement possède bien d'autres qualités qu'un sol ameubli mécaniquement : même lorsqu'il pleut fort, un turricule ne change pas de forme et ne peut donc pas se désagréger aussi facilement en boue.

Les galeries peuvent descendre jusqu'à plus de 2 m de profondeur dans le sol. Elle permettent de faire entrer l'O<sub>2</sub> et de faire sortir le CO<sub>2</sub>.

# LES VERS DE TERRE (3)

Dans une prairie abritant 400 individus par m<sup>2</sup>, le turnover des vers de terre peut libérer près de 30 kg d'azote /ha/an. Cette quantité correspond environ à l'apport d'azote par l'atmosphère.

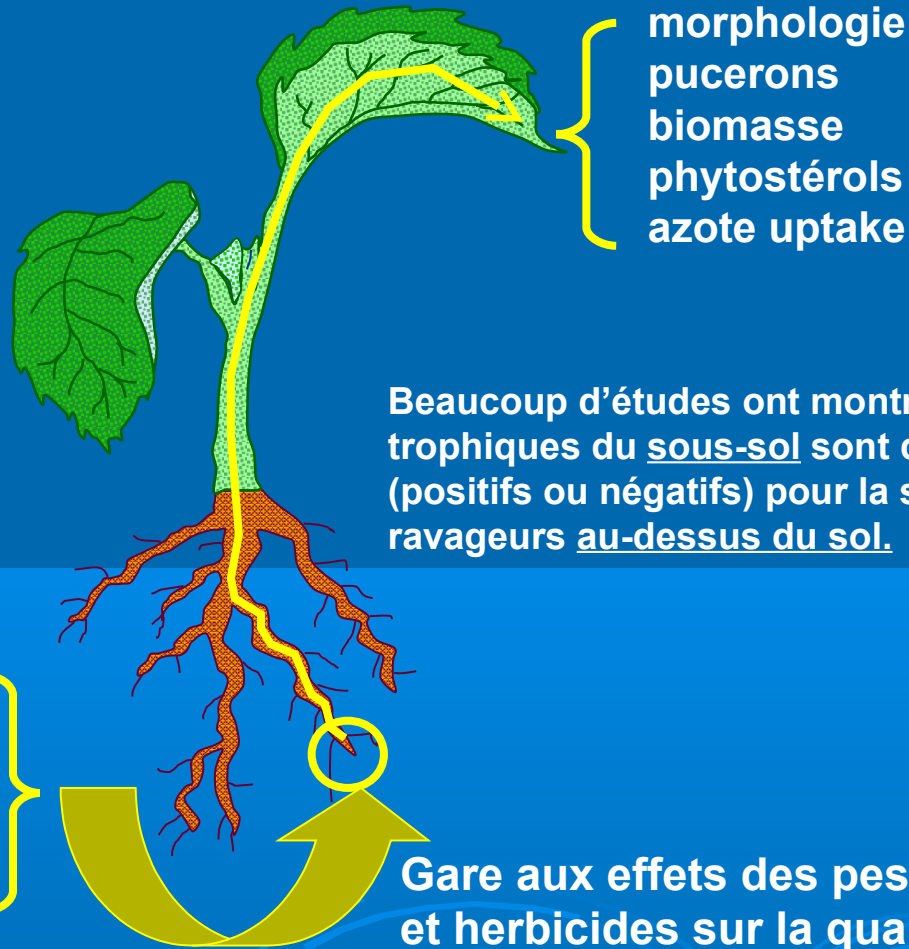
Des expériences ont démontré qu'une population de vers de terre de 2 t / ha peut très bien enfouir dans le sol jusqu'à 40 t de litière pendant le semestre d'hiver.

Dans une prairie, 2 t de vers de terre (soit 8 à 10 millions d'individus) produisent jusqu'à 400 t d'excréments par ha et par an et forent un réseau de 9'000 km de long, correspondant à un volume de 90 m<sup>3</sup>. Ils consomment tout le sol en quelques années.

Turricules de vers de terre



# LA VIE DU SOL MODIFIE LE FONCTIONNEMENT DE LA PLANTE



morphologie  
pucerons  
biomasse  
phytostéroïdes  
azote uptake

Beaucoup d'études ont montré que les interactions trophiques du sous-sol sont des facteurs déterminants (positifs ou négatifs) pour la santé de la plante et les ravageurs au-dessus du sol.

protozoaires  
bactéries  
mycorhizes  
vers de terre  
collemboles

Gare aux effets des pesticides, fongicides et herbicides sur la qualité de la vie du sous-sol!

# L'ENHERBEMENT (1)

## Les conséquences

L'enherbement d'une vigne précédemment nue provoque des **perturbations importantes** au niveau du sol, qui ne sont pas sans conséquence pour la vigne lors de sa mise en place:

- flore: naturelle ou semée, graminées, légumineuses
- faune et microfaune
- système racinaire: vigne – enherbement (espace et interactions)
- réserves en MO, CAH
- carences en minéraux, essentiellement N, provoquées par une augmentation **importante** de la biomasse sur et sous le sol.

Plusieurs années (2 – 4) seront nécessaires pour que ce nouveau système soit en équilibre (**steady state**), car il **nécessite de petits apports répétés en N et MO** pour créer cette **importante biomasse**.

Une fois le steady state établi, peu d'entretien sera nécessaire (compensation des carences).

# L'ENHERBEMENT (2)

## Sous une touffe d'herbe versus un sol nu:

- augmentation de l'humidité et de la macro- et microfaune. La qualité et la quantité de cette faune est aussi spécifiques aux types de plantes qui couvrent le sol.



- diminution de la température sous l'herbe, mais à partir ~15 cm de profondeur, la température du sol ne diffère plus entre le sol nu et sous la touffe.

- La fraîcheur des journées au printemps ne va pas freiner l'activité biologique du sol au niveau des racines puisque la température à ~15 cm de profondeur ne varie plus une fois la saison installée (pas de retard de croissance de la vigne par rapport à un sol nu).

**Conséquences:** grâce à l'humidité et à la biomasse sous les touffes, on a une bonne inertie pour fournir de l'eau à la plante en cas de sécheresse (déshydratation de la biomasse). L'eau étant plus importante que la température, la plante ne peut qu'être bénéficiaire par rapport à un sol nu.

# L'ENHERBEMENT (3)

## Enherbement diversifié et lianes (vigne)

Les plantes annuelles et bisannuelles, après leur mort et la décomposition de leurs racines, laissent des cavités dans le sol qui permettent l'infiltration de l'eau et l'aération du sol (effet décompactant). L'auto-semage de ces plantes, qui ne se fait pas au même endroit, permet un remaniement annuel du sol.

L'espace, les nutriments et l'humidité sont limités dans le sol. En fonction de leurs besoins, les végétaux vont occuper plus ou moins l'espace. Il est compréhensible que les racines des plantes pérennes (vigne) vont s'imposer de facto par rapport aux plantes annuelles qui perdent leur système racinaire.

Les lianes (vigne) se sont adaptées au cours de l'évolution pour se développer en harmonie avec leur arbre tuteur sans se « gêner » mutuellement. Le système racinaire de la vigne a donc les moyens génétiques pour s'adapter à un environnement racinaire encombré, voire agressif.

La mise en place du système racinaire de la vigne, pour qu'il soit en harmonie avec celui de l'enherbement, peut prendre quelques années. Pourquoi? Car les ressources en nutriments (MO, azote) et la microfaune sont considérablement plus importantes que dans un sol nu.

**Un minimum de temps est nécessaire pour établir cet équilibre, plus complexe et plus riche dans un sol enherbé que dans un sol nu.**



# L'ENHERBEMENT (4)

## Les avantages par rapport à un sol nu

### Une fois établi et en équilibre:

- Le système vigne-enherbement est plus stable (faune et microfaune plus abondantes, plus complexes donc plus stables).
- Protection contre l'érosion.
- Décompactage et aération du sol (galerie d'aération par vers de terre, racines mortes des plantes et racines nouvelles).
- Grande inertie du système envers les fluctuations de (i) température, (ii) humidité et (iii) carences nutritionnelles (grosse biomasse diversifiée).
- Dégradation plus importante des pesticides ou autres polluants due à l'intense activité biologique en surface.



# L'ENHERBEMENT (5)

## Une concurrence néfaste pour la vigne ?

Il a été dit que l'enherbement serait responsable:

- d'une concurrence en eau et nutriments
- de faibles rendements
- de fermentations languissantes (déficit en N des moûts)
- de retards de débourement

Les échecs d'enherbement doivent plutôt être attribués à:

- une mauvaise compréhension du sol
- des fumures inadéquates
- un équilibre racinaire non atteint
- un objectif à trop court terme (il faut 2-4 ans)

Un sol enherbé doit augmenter considérablement sa MO (humus), son CAH, son azote et sa biomasse, mais par petits apports réguliers.

# MO ET MALADIES DU SOL

L'enfouissement de MO dans le sol favorise le développement de champignons pathogènes car il provoque un environnement trop riche pour ceux-ci. La virulence est favorisée par un sol compact et humide.

Les champignons se développent en taches concentriques (pourridié) comme une mycose sur la peau. Car le champignon se déplace facilement dans la terre par la croissance de son mycélium, contrairement aux maladies bactériennes (ou nématodes) du sol.

Le champignon se développe plus facilement sur un sol stérile (pas d'effet concurrent avec la microfaune) ou dans un sol avec de la MO enfouie.

Il faut éviter des foyers de pathogènes par des apports de MO mal répartis, trop importants et enfouis (souches en train de mourir).

Il s'agit d'éliminer rapidement toutes souches contaminées avec le maximum de racines. Leur mort génère de la MO enfouie qui peut être l'inoculum de la tache. Attendre 1-3 ans avant de replanter.

De manière générale, un sol riche en microfaune a plus de mal à ce qu'une espèce pathogène de champignon, bactérie ou nématode, prenne le dessus sur les autres espèces dans le sol en raison de la concurrence.

# MO *in situ*

MO = chlorophylle + CO<sub>2</sub> + soleil + H<sub>2</sub>O + azote (élément limitant)

Au lieu d'apporter la MO de l'extérieur, on la cultive sur place dans le rang :

- + enherbement cultivé ou naturel
- + apport d'azote rapide au printemps: pour les microbes (vigne et l'enherbement)
- + fauchage en fonction de l'encombrement → MO, effet allopathique sur le contrôle des adventices.
- + puits de carbone = réserve de MO.

Rendement moyen en MO (prairie) ~ 23 t/ha de

# UN BON MULCHAGE

C/N idéal 20 -30

Matières	C/N_	
Végétaux verts	7	} → Donne de l'azote au sol
Gazon	10	
Fiente de volailles	10	
Fumier de bovin frais (pauvre en paille)	20	
Marc de raisin	20	
<b>Indice idéal</b>	<b>30</b>	
Paille d'avoine	50	} ← Consomme l'azote du sol
Sarments	90	
Paille de blé	100	
Ecorce	150 - 200	
Sciure de bois	200 - 500	

Nécessite un apport d'azote au sol pour une bonne minéralisation

# LE NON – LABOUR (1)

En été, alors qu'il fait sec et chaud, la vigne est en pleine activité photosynthétique (mûrissement des baies, accumulation des réserves). **La vigne doit synthétiser des sucres, ce processus est très grand consommateur d'eau** (photosynthèse + évapotranspiration).



Seule une hydrosphère racinaire installée (enherbement à l'équilibre et mycorhizes) pourra fournir cette eau en quantité suffisante. Attention aux labours destructeurs.

De plus, l'herbe fauchée va faire une couverture allélopathique permettant le contrôle des adventices.

# LE NON - LABOUR (2)

Le sol est organisé en strates (horizons O, A, B, C) bien délimitées et dans lesquelles vit une biomasse très spécifique suivant un gradient décroissant (de la surface du sol horizon O à B). Le labour va détruire cette structure et va désorganiser complètement la vie du sol (vers de terre, mycorhizes, bactéries, etc.). Il faudra 1-3 ans au sol pour qu'il se restructure. C'est d'autant plus grave s'il y a un enherbement.

Ainsi, le labour systématique des anciens, ou celui qui ne sert qu'à contrôler l'enherbement, ou encore à augmenter la minéralisation, n'a pas de justification biologique.

Quant à la gestion de l'enherbement, si on ne veut pas utiliser les herbicides et la charrue, c'est le fauchage. Le travail du sol pour augmenter la minéralisation est un gaspillage de MO et une pollution en CO<sub>2</sub> (destruction du puits de C du sol).

Lorsqu'il s'agit de plantes pérennes (vigne ou arbres fruitiers), le travail du sol est encore plus difficilement justifiable.

Les labours en terres humides et chaudes sont catastrophiques (semelle) et entraînent des nitrifications estivales par accélération de la minéralisation de MO. Elles enrichissent les tissus en azote, ce qui favorise la virulence des pathogènes.

On peut exceptionnellement considérer un labour de mise en place, ou pour corriger des sols très tassés, mais il faut immédiatement planter derrière pour que les racines maintiennent la structure du sol.

# LE NON - LABOUR (3)

L'activité végétale du cep va débuter lorsque la microfaune du sol commencera à se développer pour libérer les premiers paquets de nutriments provenant de la MO, c'est-à-dire à partir d'une température du sol de  $\sim 13^{\circ}\text{C}$ . Le premier symptôme de cette activité est la poussée racinaire (pleurs de la vigne). Les racines ont commencé à absorber les minéraux, ce qui provoque une pression osmotique dans la racine qui est transmise dans le bois.

La mise en route du système racinaire, comme l'activité biologique du sol, ont une certaine inertie et ne seront optimales que lorsque les conditions climatiques du printemps se seront un peu stabilisées. Une journée ensoleillée ne fait pas le printemps.....

Une terre nue qui vient d'être labourée au printemps n'aura pas le volant d'inertie biologique d'une terre correctement enherbée et installée.

Le moindre pic de chaleur après un hiver va donner de faux signaux aux ceps en terre nue qui ne sauront pas correctement interpréter le déroulement de leur développement en raison de l'absence d'inertie biologique d'un enherbement. Le labour de printemps aura peut-être détruit une partie des racines de surface et les filaments des mycorhizes impliquées dans l'absorption des nutriments.

# LE NON - LABOUR (4)

Donald Reicosky a démontré que le relargage de  $\text{CO}_2$  après un labour était proportionnel au volume de terre travaillé. Cette perte de  $\text{CO}_2$  se fait aux dépens de la MO du sol et expliquerait pourquoi les labours conventionnels (profonds avec retournement) ont conduit à l'appauvrissement dramatique des sols agricoles en MO.

Les résultats expérimentaux suggèrent qu'il faut diminuer le volume du sol labouré à son strict minimum en ne labourant que le volume du sol nécessaire pour faire, par exemple, le lit de la graine, et laisser le reste du sol non perturbé afin d'en conserver sa structure.

Les paramètres influant sur la minéralisation de la litière ou de la MO sont (i) l'humidité du sol, (ii) la température), (iii) l'aération favorisée par le travail en surface du sol.



# L'EXPORTATION DES ELEMENTS PAR LE RAISIN

Rendement 0.78 Kg/m<sup>2</sup> ou 0.6 L/m<sup>2</sup>

Répartition	Eléments en Kg/ha/an				
	N	P <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg
vieux bois	17	7	14	15	2
raisin	15	6	32	6	1
sarments	3	1	8	6	0.6
<b>total exporté</b>	<b>35</b>	<b>14</b>	<b>54</b>	<b>27</b>	<b>3.6</b>
feuilles	24	4	14	32	3

Fe > Mn > B > Zn : 600 – 100 g/ha/an

# NORMES DE FUMURE - VIGNE

	U/ha/an				
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg
<b>EXTRANTS</b> <sup>1</sup> Vendange, sarments	35	14	54	27	3.6
<b>INTRANT</b> N <sub>2</sub> atmosphérique Vers de terre	15 - 30		<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<b><u>INTRANTS</u></b> <sup>2</sup> <b><u>théoriques</u></b>	<u>5 - 20</u>	--	<u>54</u>	--	<u>18</u>
<b>INTRANTS</b> <sup>3</sup> suggérés par la littérature	35	14	54	--	18

<sup>1</sup> Pour un sol satisfaisant et un rendement de vendange: 0.78 Kg /m<sup>2</sup> (0.6 L/m<sup>2</sup>)

<sup>2</sup> Tenir compte des analyses ; <sup>3</sup> souvent trop haut

Si sol riche en K maintenir fumure Mg à la norme (antagonisme avec K et lessivage)  
B ,1 U/ha/an

# MINERALITE D'UN VIN ≠ ROCHE-MÈRE !

**Minéralité d'un vin:** Terme qui définit un arôme ou influence de la roche-mère?

Quand on parle de la minéralité d'un vin en termes d'arôme, il s'agit d'une notion positive, qui évoque une complexité aromatique et une certaine pureté. Le terme s'applique surtout aux vins blancs. Or il s'agit d'une appréciation subjective, qui n'a rien à voir avec la minéralité du terroir, donc avec les minéraux présents dans le sol ou la roche-mère.

**Pour mémoire:**

La vigne se nourrit dans la terre végétale située dans une zone de 20 à 70 cm du sol. Les racines profondes (en direction de la roche-mère!) ne pompent principalement que de l'eau (cf. diapo racines).

La structure et la complexité d'un vin sont le résultat d'un savant mélange d'eau, d'alcool, d'acides organiques, de sels minéraux (K, Mg, Ca), d'arômes et de bien d'autres choses.

C'est la raison pour laquelle on trouve d'excellents et de mauvais vins issus (1) d'excellents terroirs et (2) de terres où la roche-mère se situe à des dizaines de mètres ou à des dizaines de centimètres de profondeur.

En utilisant des engrais (N, P, K, Mg, Ca), souvent en excès, mal dosés, à la composition mal choisie, en procédant à des chaulages non justifiés, le viticulteur modifie significativement la minéralité de son terroir et donc aussi la « minéralité » de son vin.

Les interventions inutiles, nuisibles ou mal appropriées sont légion dans la fabrication d'un vin et modifient de manière plus prépondérante encore la « minéralité »:

**conduite de la vigne** : travail du sol, engrais, rendement, hygiène, traitements

**vendanges** : maturité phénolique, vendange en vert, tri, hygiène du raisin (pourritures, moisissures)

**vinification** : éraflage, débourbage, pressage, ensemencement, hygiène de cave

# BIODYNAMIE

Elle s'appuie sur les règles de la **culture bio**, mais rajoute des **pratiques ésotériques**:

- **dynamisation** des traitements (agitation, vortex)
- **dilution homéopathique**
- **préparations étranges** (corne de vache remplie de bouse ! (500), fleurs de camomille dans un intestin de vache ! (503) le tout enterré dans la vigne
- **calendrier lunaire**
- **astrologie**

Ces rituels agricoles mystiques sont censés renforcer l'activité de ces préparations et doivent permettre d'influencer positivement les végétaux qui les ont reçus!

## ET ÇA MARCHE !

De prestigieux domaines s'y sont mis!

## MAIS POURQUOI ?

Ça marche aussi bien que le bio grâce aux traitements au **Cuivre** et au **Soufre** qui sont **les fongicides** sans lesquels le bio, comme la biodynamie, ne seraient pas possibles.

## ET ALORS !

Le bio évidemment. Mais les pratiques ésotériques n'ont aucune influence sur le sol et sur le végétal, mais en ont une sur le consommateur crédule.

# REFERENCES

*Vers de terre:* <http://www.regenwurm.ch/fr>

Séquestration du carbone dans le sol. Archives de documents de la FAO.  
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y2779F/>

Les mycorhizes. <http://www.wsl.ch/publikationen/pdf/5191.pdf>

Botany on line. <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e00/index.htm>

Aux origines des plantes. Francis Hallé, Fayard, 2008

Biologie végétale. Sciences sup. Série Atlas. E. Duhoux, M. Nicole. Dunod 2004

Biologie. Campbell & Reece. 2<sup>ième</sup> édition. De Boeck, 2004.

Transformations de l'azote dans deux sols froids ...Karen Clark. Thèse 2007. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Université Laval. Québec. Ca.

Reicosky DC *in* Sustaining the global Farm. Stott & Steinhardt /eds), p 481-485; 2001. Purdue University, USA.

Vitousek P.M., Gosz J.R., Grier C.C., Melillo J.M., Reiners W.A. A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. *Ecol. Monogr.* 1982;52:155-177.

Long-Term Effects of Nitrogen Fertilization on Nitrogen Availability in Coastal Douglas-Fir Forest Floors  
H.N. Chappell , C.E. Prescott and L. Vesterdal. *Soil Science Society of America Journal* 63:1448-1454 (1999)

Huggins DR & Reganold JP No-till: The quiet revolution. *Scientific American*, Inc, 2008, p 70-77

Conservation agriculture from the United Nations Food and Agriculture Organization. [www.fao.org/ag/ca](http://www.fao.org/ag/ca)

Clarholm, M., 1985. Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. *SoilBiology&Biochemistry* 17, 181–187.

Bonkowski, M., 2004. Protozoa and plant growth: the microbial loop in soil revisited. *New Phytologist* 162, 617–631.

Bonkowski, M., Brandt, F. (2002): Do Soil Protozoa Enhance Plant Growth by Hormonal Effects? *Soil Biology & Biochemistry* 34: 1709-1715.

Biodiversité du sol et fonctionnement des écosystèmes. Jérôme Mathieu *Laboratoire d'écologie des sols tropicaux UMR 137, IRD* , <http://www.jerome.mathieu.freesurf.fr>

*Le vin bio, mythe ou réalité ?* Bazin Jean-François; Hachette éd., 2003