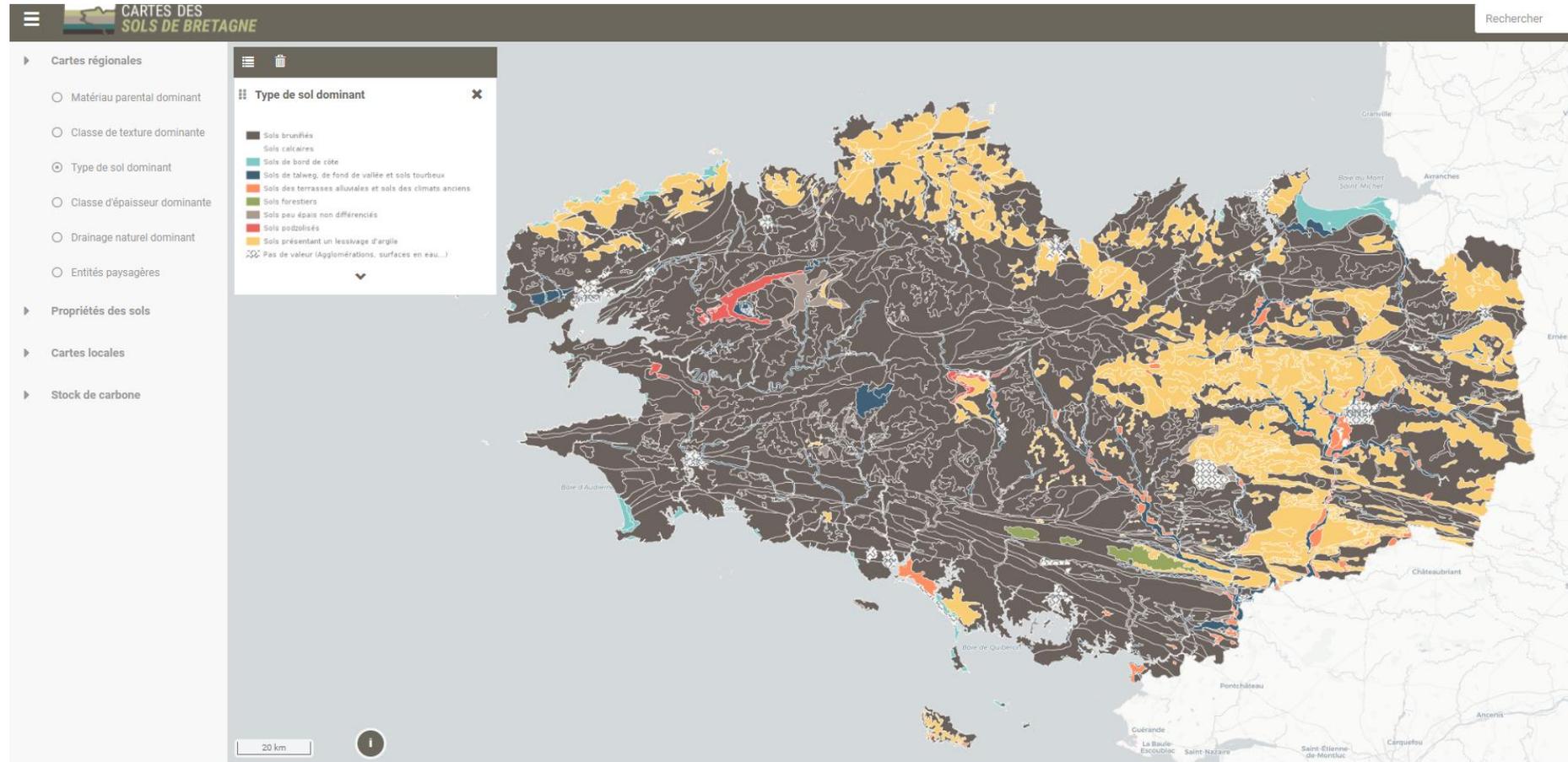


Séance 1

BG-B Les sols



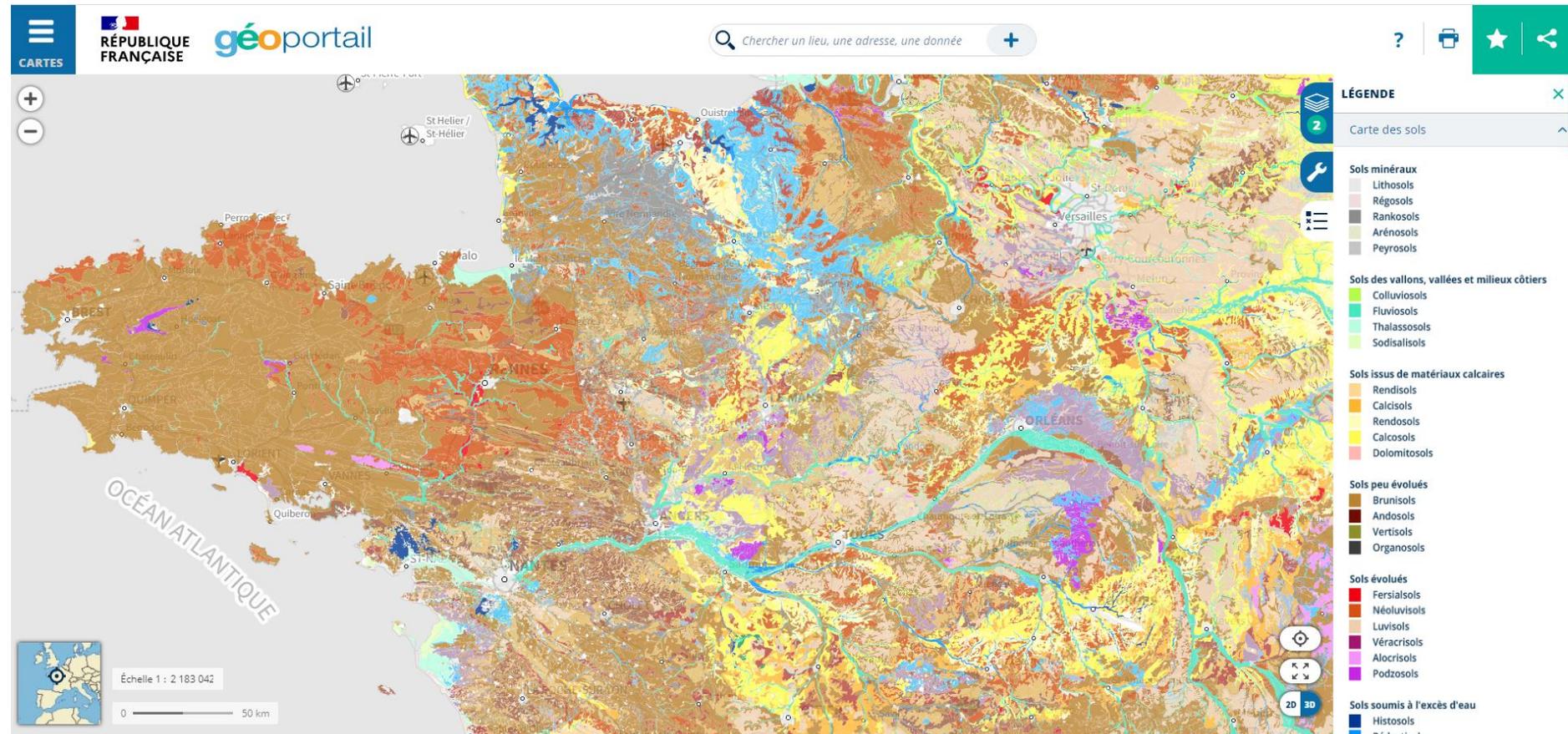
Diversité des sols : consulter <http://geowww.agrocampus-ouest.fr/solsdebretagne/#>



OU géoportail :

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

Carte de sol



1- Le sol : un système écologique complexe dont la composition reflète l'origine plurielle

1.1 Le sol : interface hydrosphère, atmosphère, lithosphère et biosphère : l'exemple d'un sol brun (brunisol)



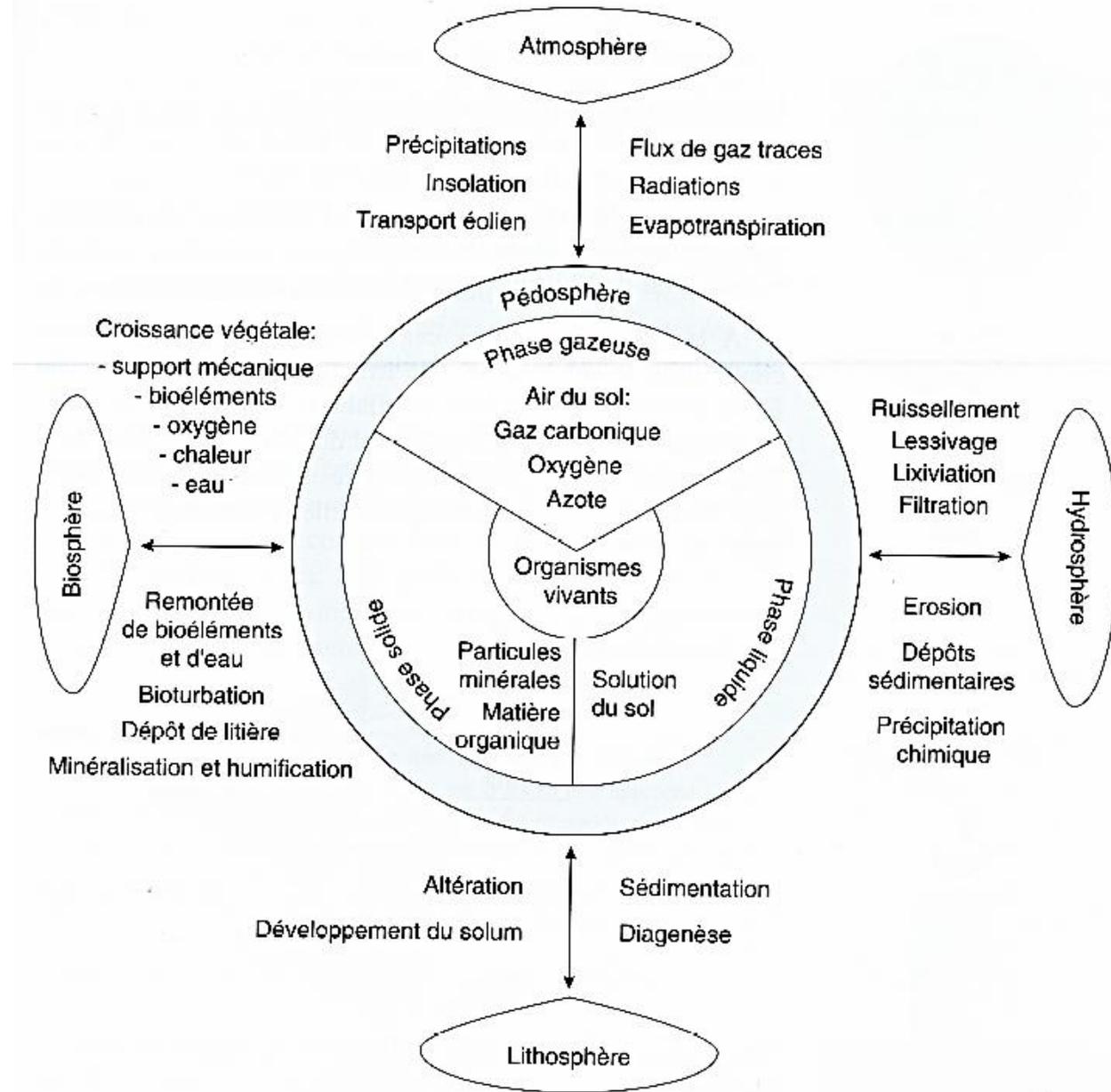


Fig. 1.1 La complexité externe et interne du sol.

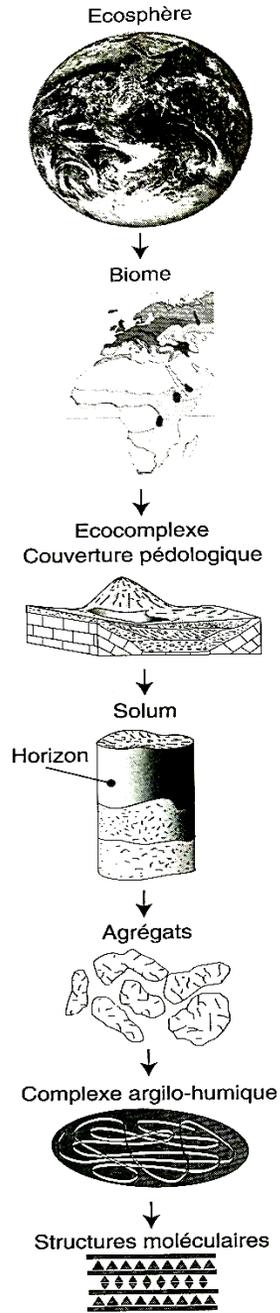


Fig. 1.3 L'organisation spatiale multiscalair du sol.

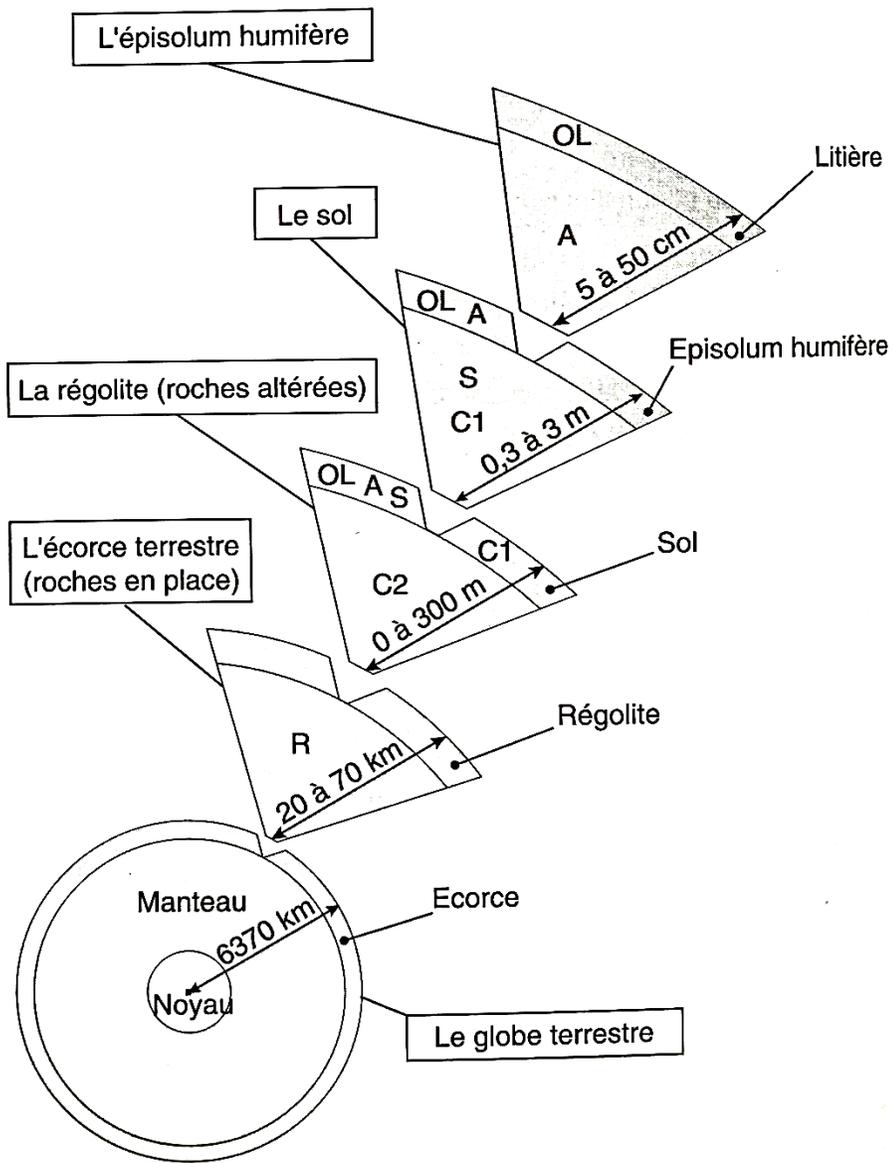
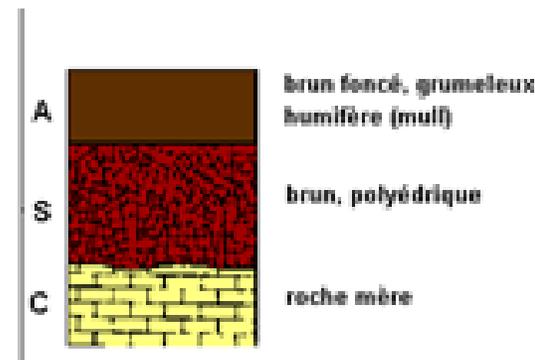


Fig. 1.2 L'épaisseur du sol et celle de l'épisolum humifère comparées au globe terrestre (pour la nomenclature des horizons, voir tab. 5.13).

Profil d'un sol



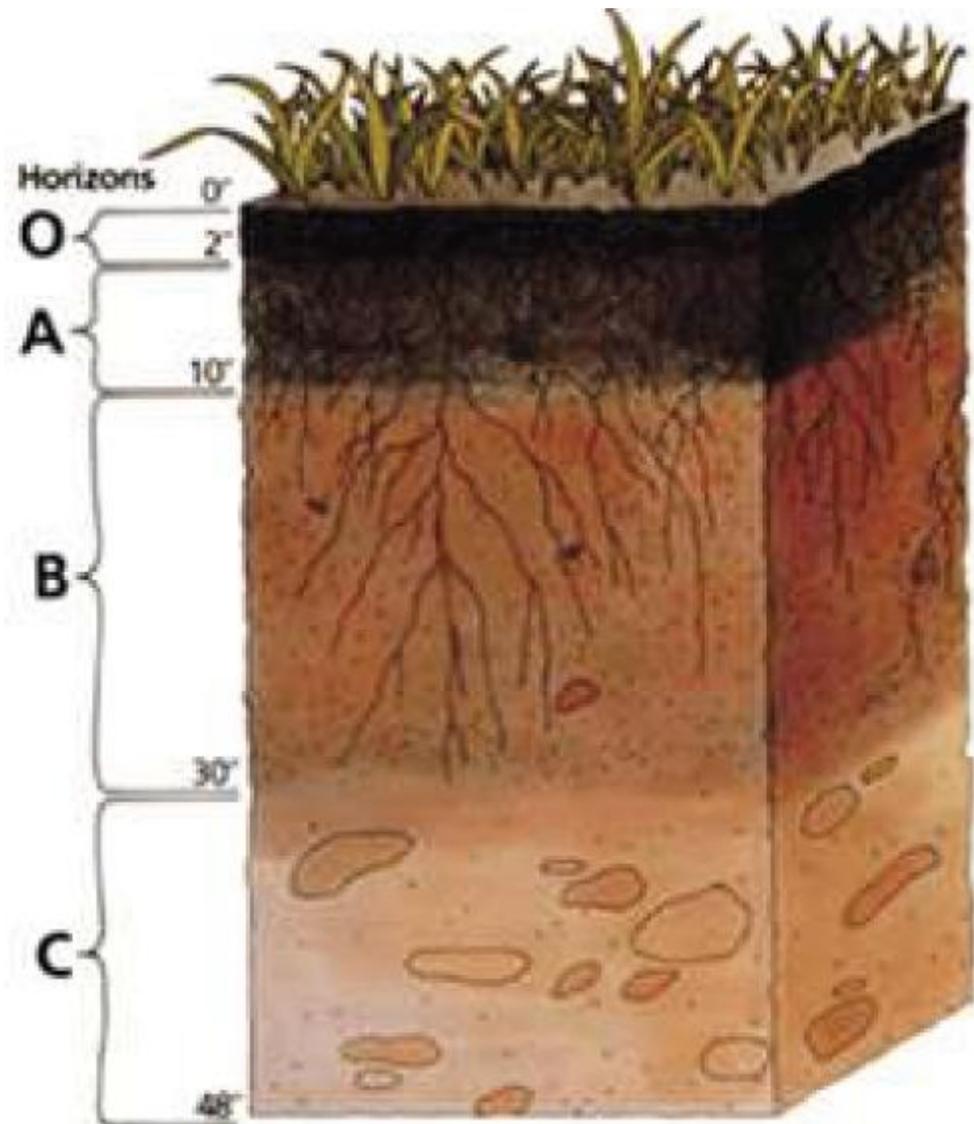
Observation des horizons d'un sol : Exemple de profil d'un sol brun typique (brunisol)

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

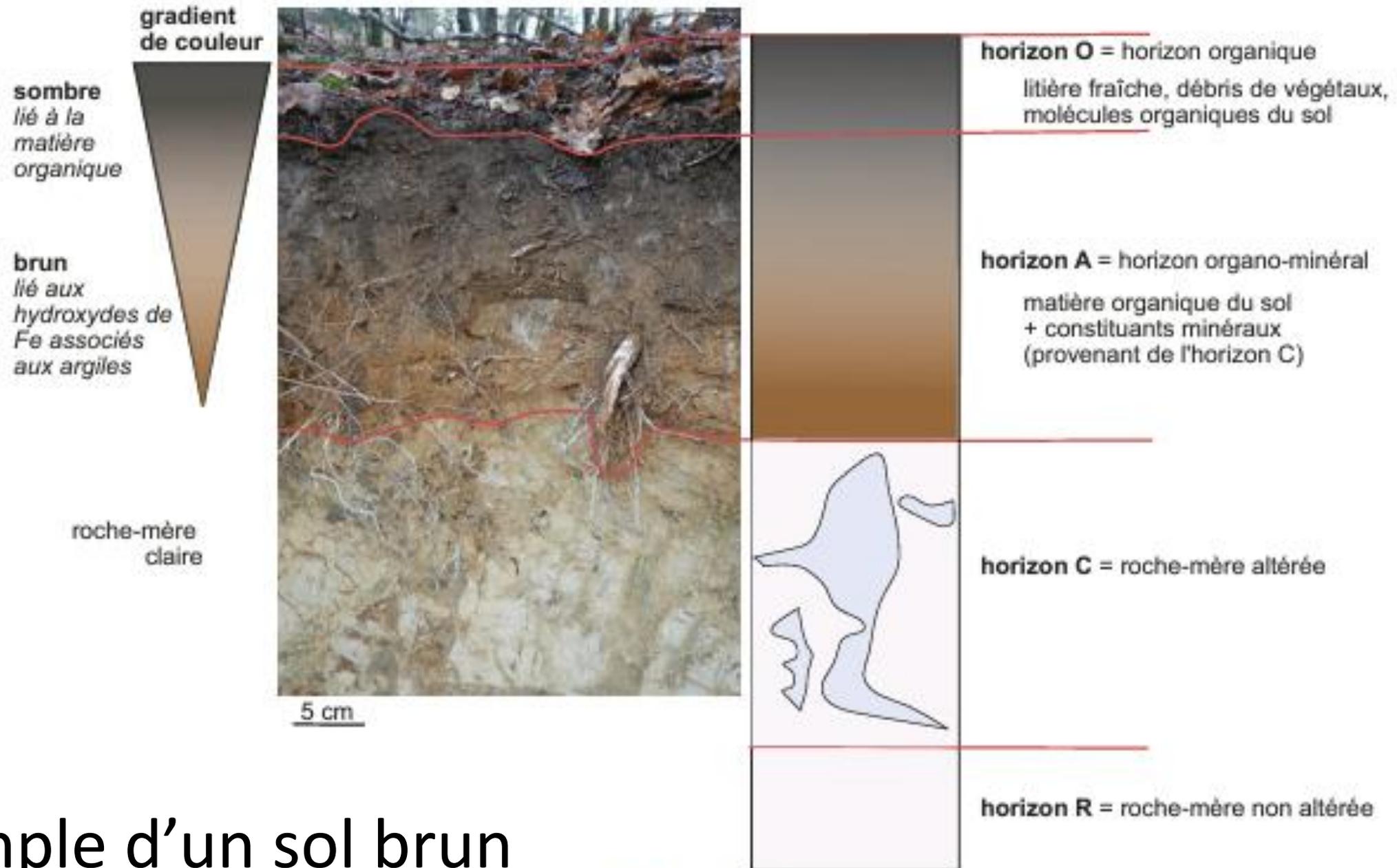


Coupe pédologique d'un sol brun. © Soil-net.com CC by-nc-sa 2.0

Horizons d'un sol



horizon		nom et définition
O	Ol	horizon organique, litière
	Of	horizon organique, litière fragmentée
	Oh	horizon organique, humus
A		horizon organo-minéral
E		horizon éluvial (lessivage des argiles)
B		horizon minéral d'altération
Bt		horizon minéral d'accumulation (illuvial)
C		roche mère en cours d'altération
R		roche mère non altérée



Exemple d'un sol brun

Figure 25.1 Profil d'un sol brun.

Exemple du sol brun, succession des horizons O / A / S (=B) / C

Horizon O : Horizon organique avec humus type **mull**

Horizon A : Ils sont constitués d'un mélange de matière organique et de matière minérale. Ils sont situés 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 (ou B): ils sont formés par l'altération des minéraux primaires (hydrolyses, oxydation, décarbonatation...) qui libèrent notamment des argiles et des oxydes / hydroxydes de fer. Ils dépendent donc de la roche mère. Ils correspondent aux horizons B des anciennes classifications.

1.2 Les composants minéraux du sol

a. Désagrégation physique et / ou altération

Lien sup : altération des roches



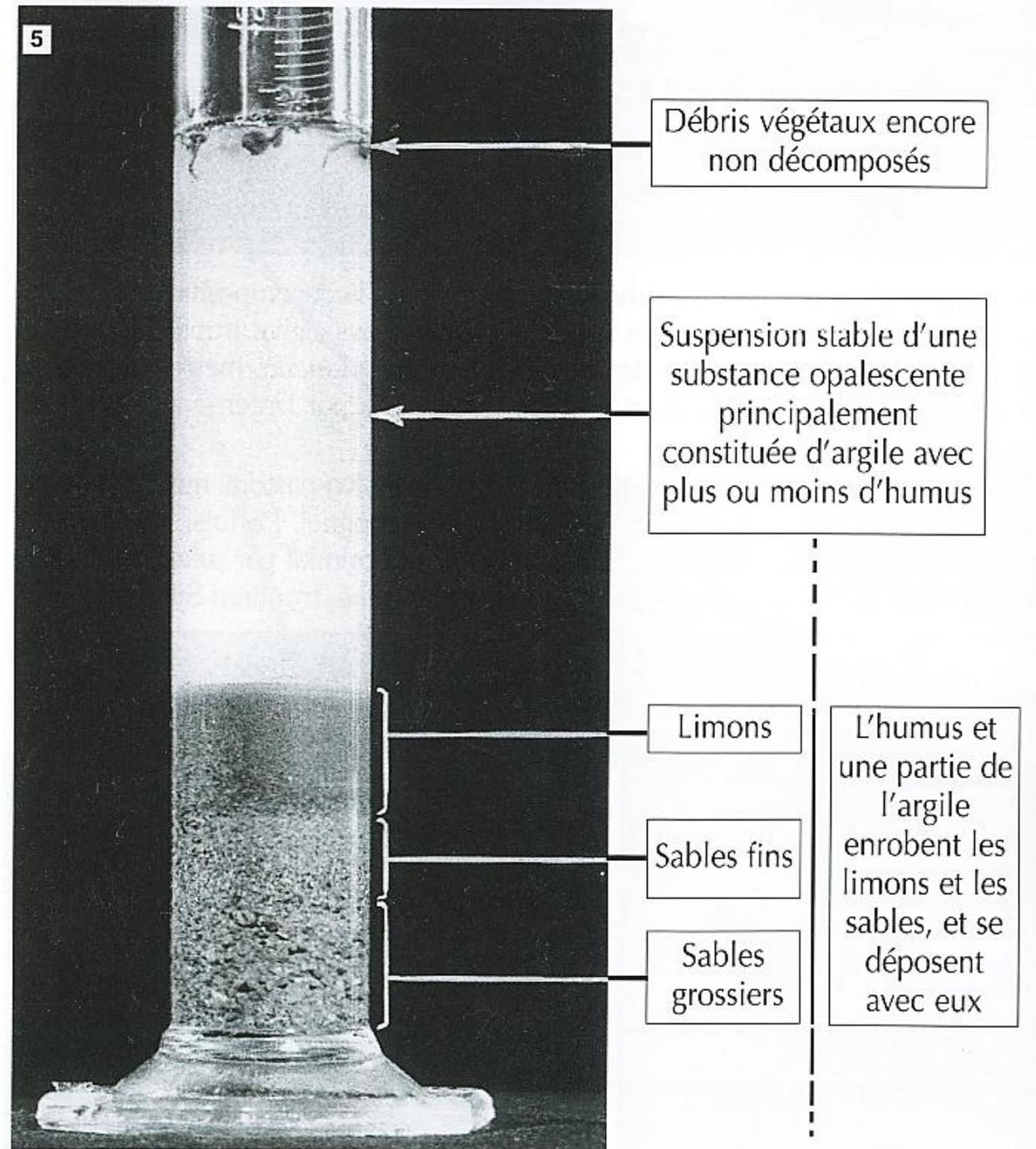
Photographie : Pierre Thomas

1.2 Les composants minéraux du sol

a. Désagrégation physique et / ou altération.

- **Désagrégation** physique : eau, gel ou vent fractionnent les roches en morceaux plus ou moins petits, **mais de même composition que la roche de départ.**
- **L'altération** biogéochimique peut se faire suivant 5 voies principales :
 - **Hydratation** : adjonction de molécules d'eau dans le réseau cristallin, le fragilisant. Exemple : l'hématite (Fe_2O_3) s'hydrate en goethite (FeOOH)
 - **Dissolution**, exemple : dissolution des carbonates en milieu acide :
 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ donne $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$
 - **Oxydation** : par exemple passage du fer ferrique (Fe III) en fer ferreux (Fe II)
 - **Réduction** (réaction inverse : Fe II donne Fe III, si le milieu est mal aéré
 - **hydrolyse** : réarrangement du réseau cristallin

b. Analyse granulométrique : texture du sol

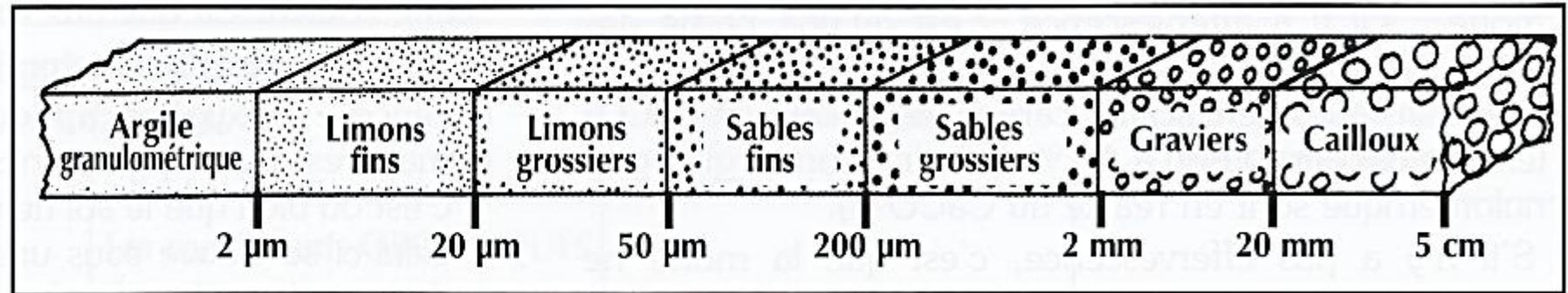


b. Analyse granulométrique : texture du sol

Figure 1-11

LES CLASSES GRANULOMÉTRIQUES

adoptées par la plupart des laboratoires de sols, dérivent de l'échelle d'Atterberg (1926)



b. Analyse granulométrique : texture du sol

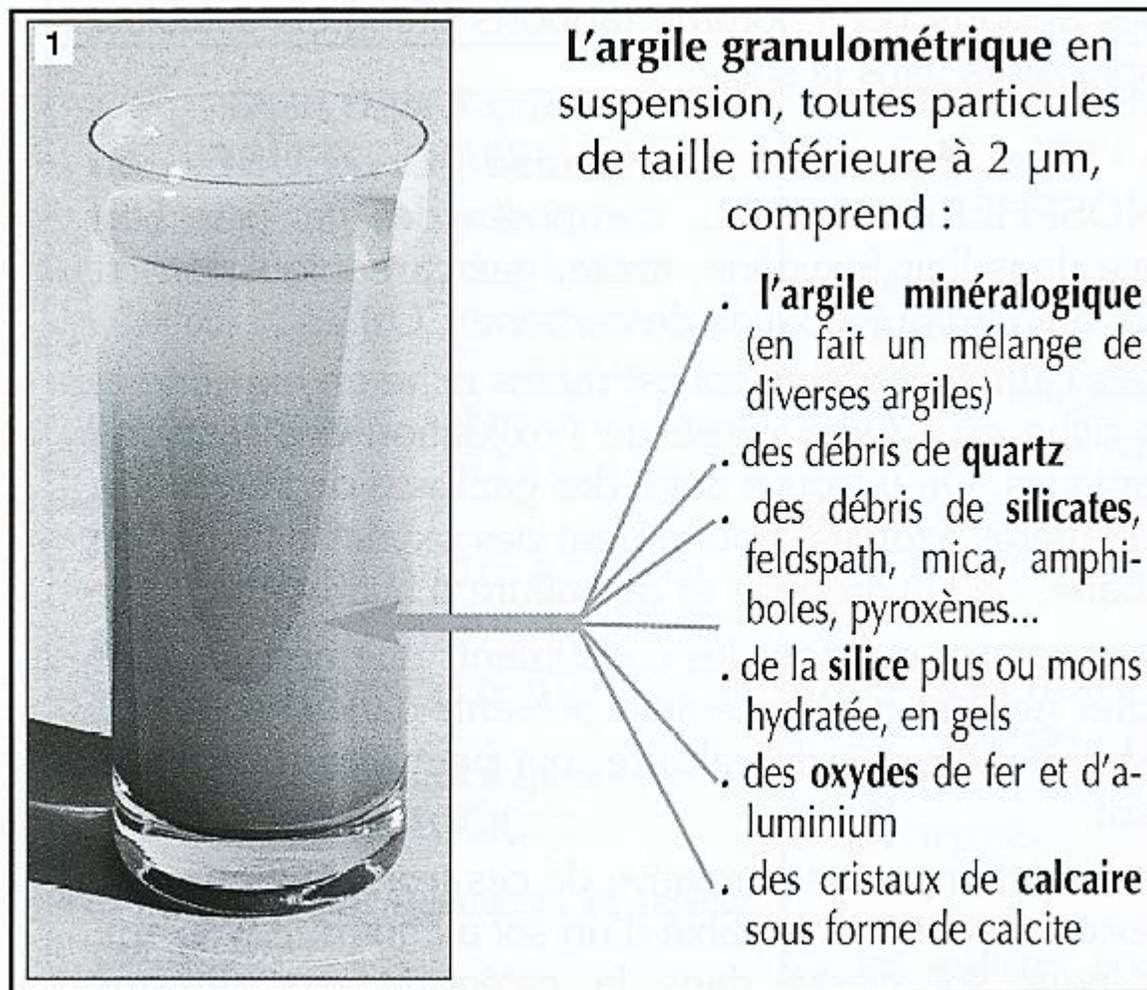
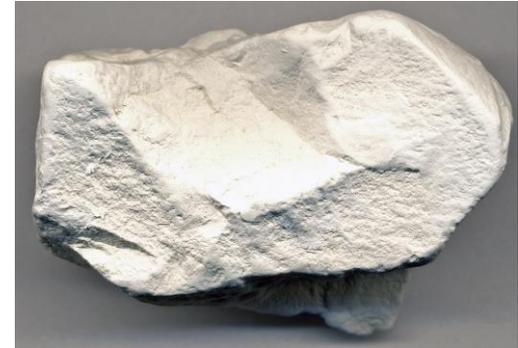
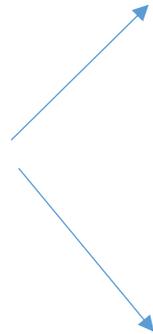


Figure 1-12 - NE PAS CONFONDRE ARGILE GRANULOMÉTRIQUE ET ARGILE MINÉRALOGIQUE (Photo 1)

Argiles

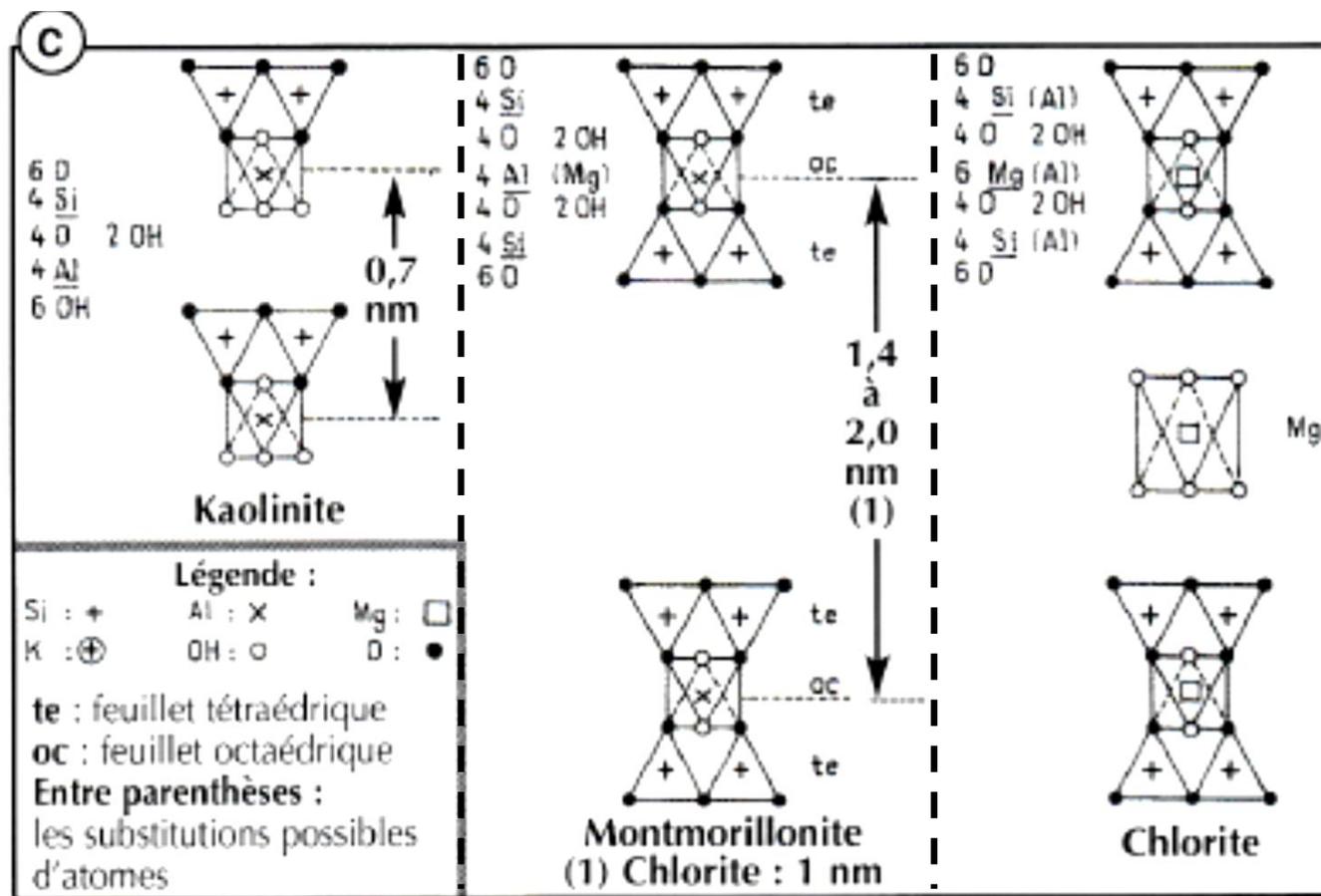
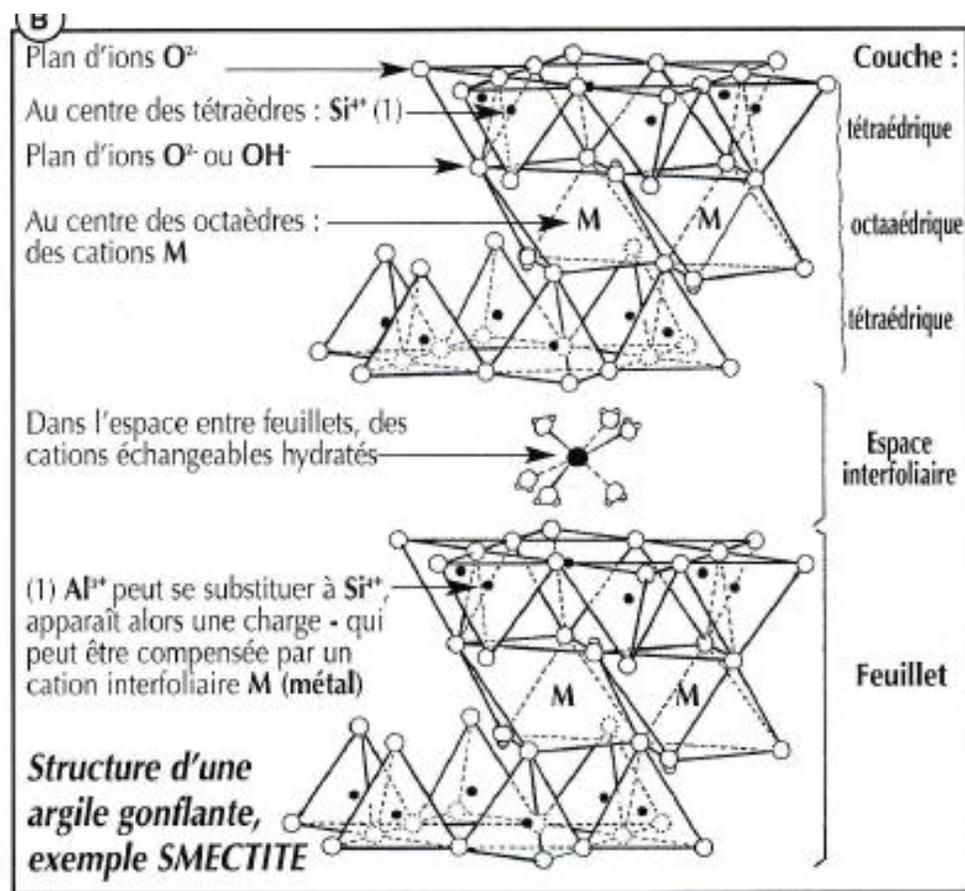
Deux sens possibles

Argiles pour le géologue : phyllosilicates en feuillet

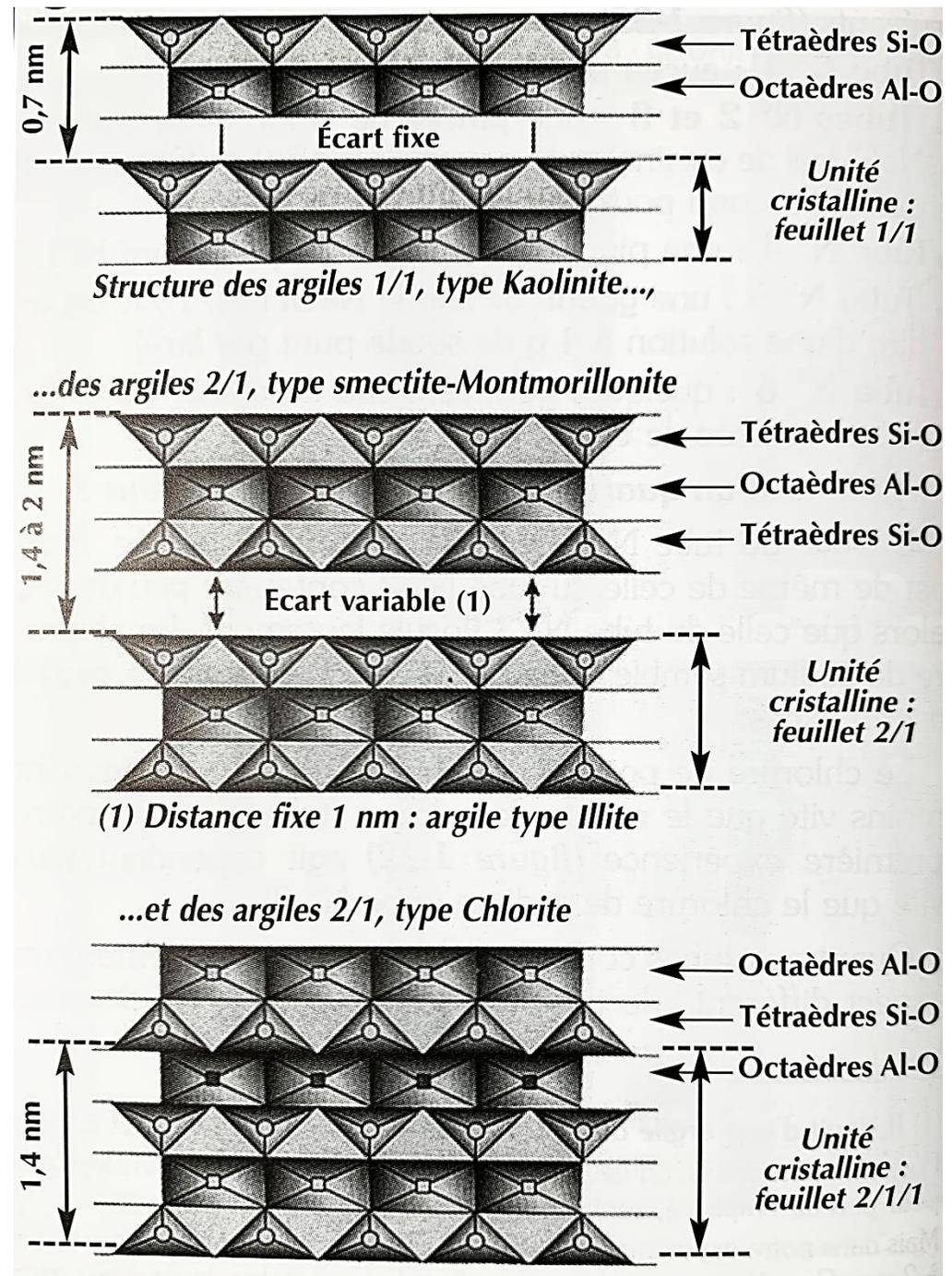


Argiles pour le pédologue : particule minérale de taille $< 2 \mu\text{m}$
(donc un quartz $< 2 \mu\text{m}$ est une particule argileuse pour le pédologue...)

Rappel de sup sur les argiles

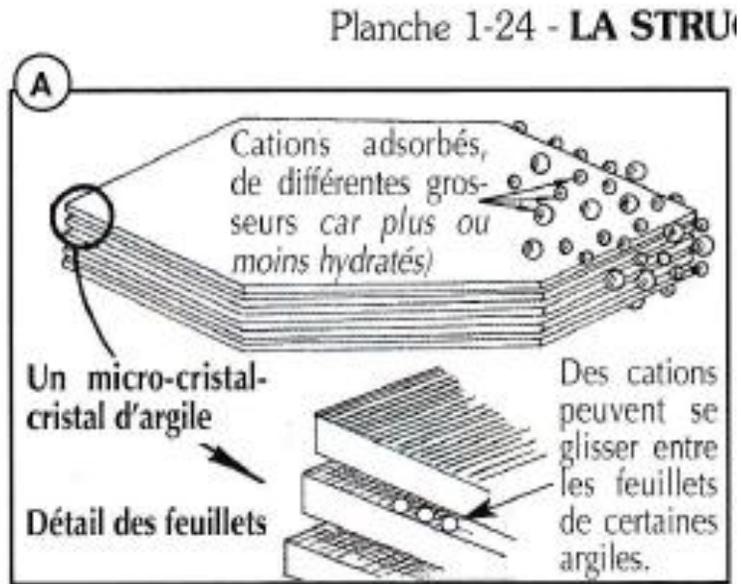


Rappel argiles



Feuillet argileux et gonflement / retrait

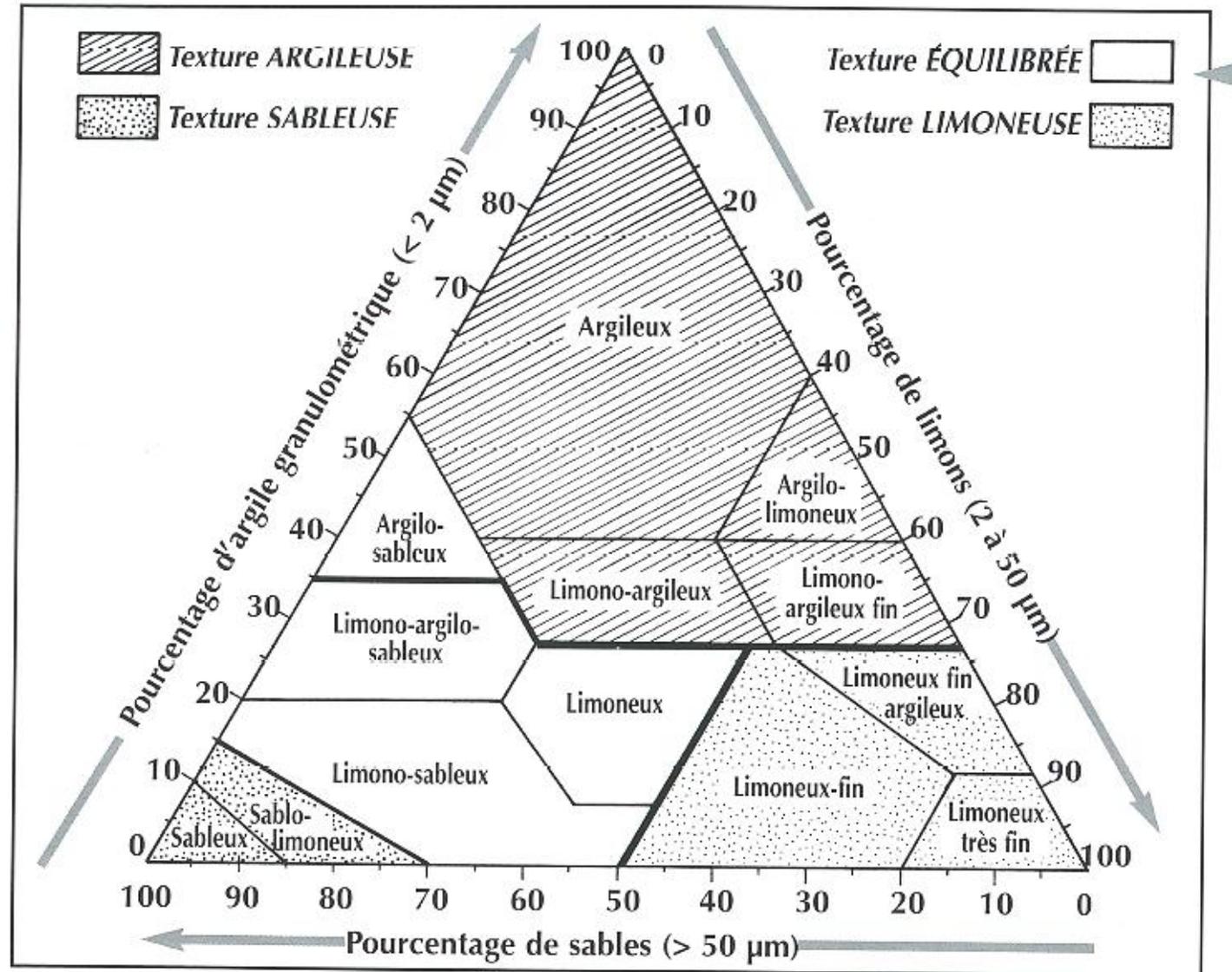
Feuillet et eau entre les feuillets

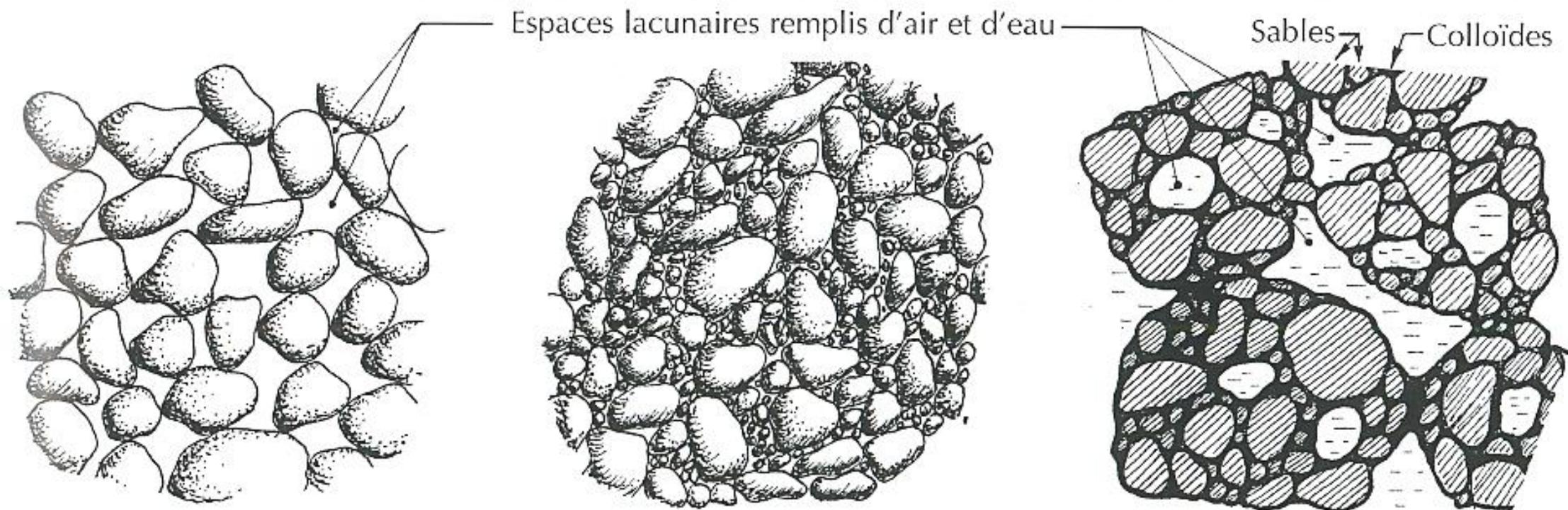


Détermination des textures pour un sol

Triangle des textures

La taille des particules du sol permet de caractériser la **texture** du sol.





Si les sables grossiers dominent, ils laissent entre eux des vides où circulent aisément l'air et l'eau.

Mais l'absence de colloïdes (argile et humus) limite le pouvoir de rétention de l'eau : **le sol a tendance à être FILTRANT.**

Si des sables fins et des limons accompagnent les sables grossiers, ils colmatent les vides laissés entre ces derniers.

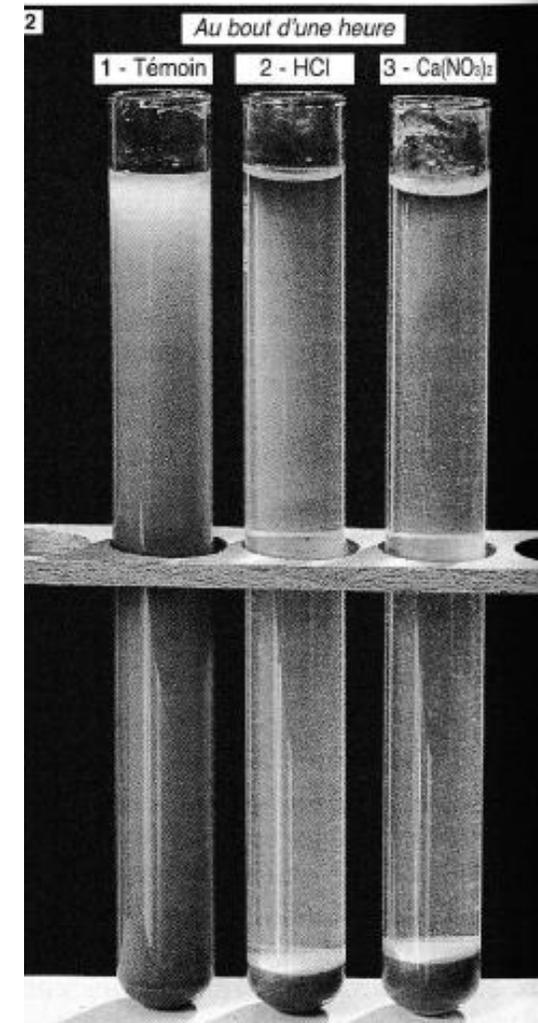
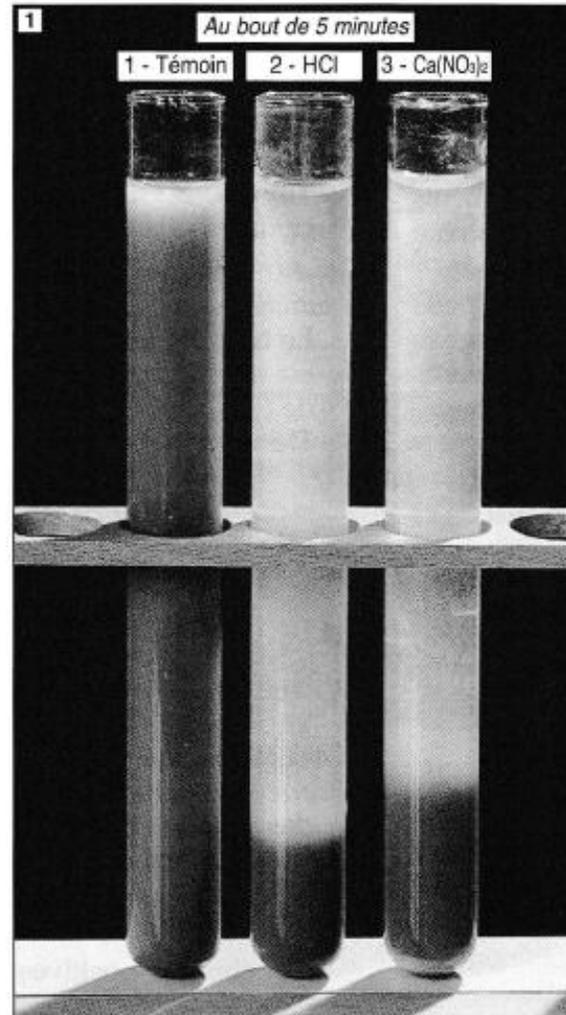
Le sol se tasse facilement sous l'effet de la pluie : **il devient BATTANT**, se croûte en séchant, et donc imperméable à l'eau et à l'air.

Si suffisamment d'argile et d'humus accompagnent les sables et les limons, la formation d'agrégats est possible.

Il s'agit de petits grumeaux laissant circuler l'eau et l'air, mais retenant assez d'eau pour les plantes. **Le sol est CONSTRUIT, il a une STRUCTURE.**

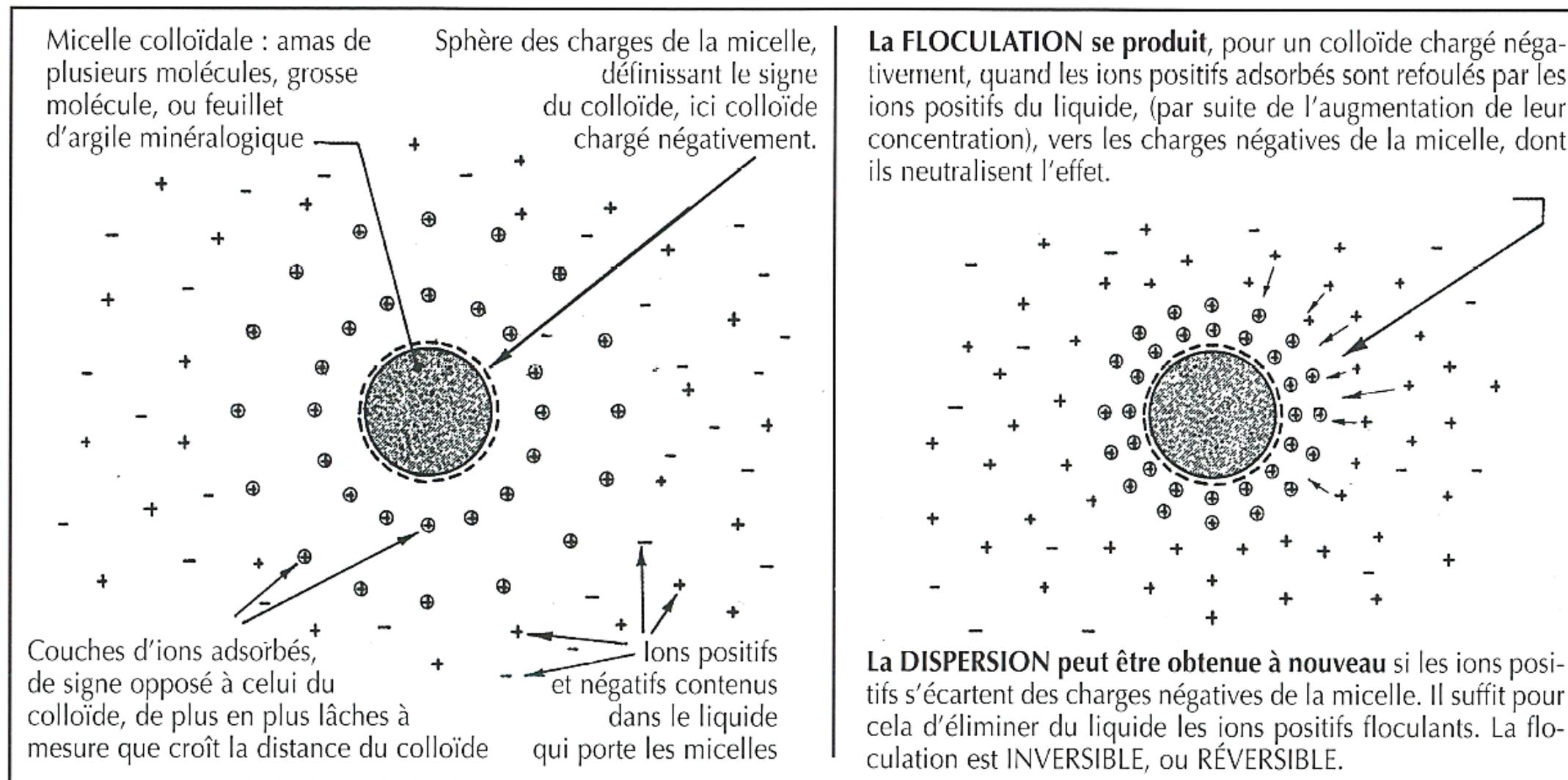
c. Flocculation des argiles et conséquences sur la structure du sol

- Argiles dispersées
- Argiles flocculées



Floculation réversible

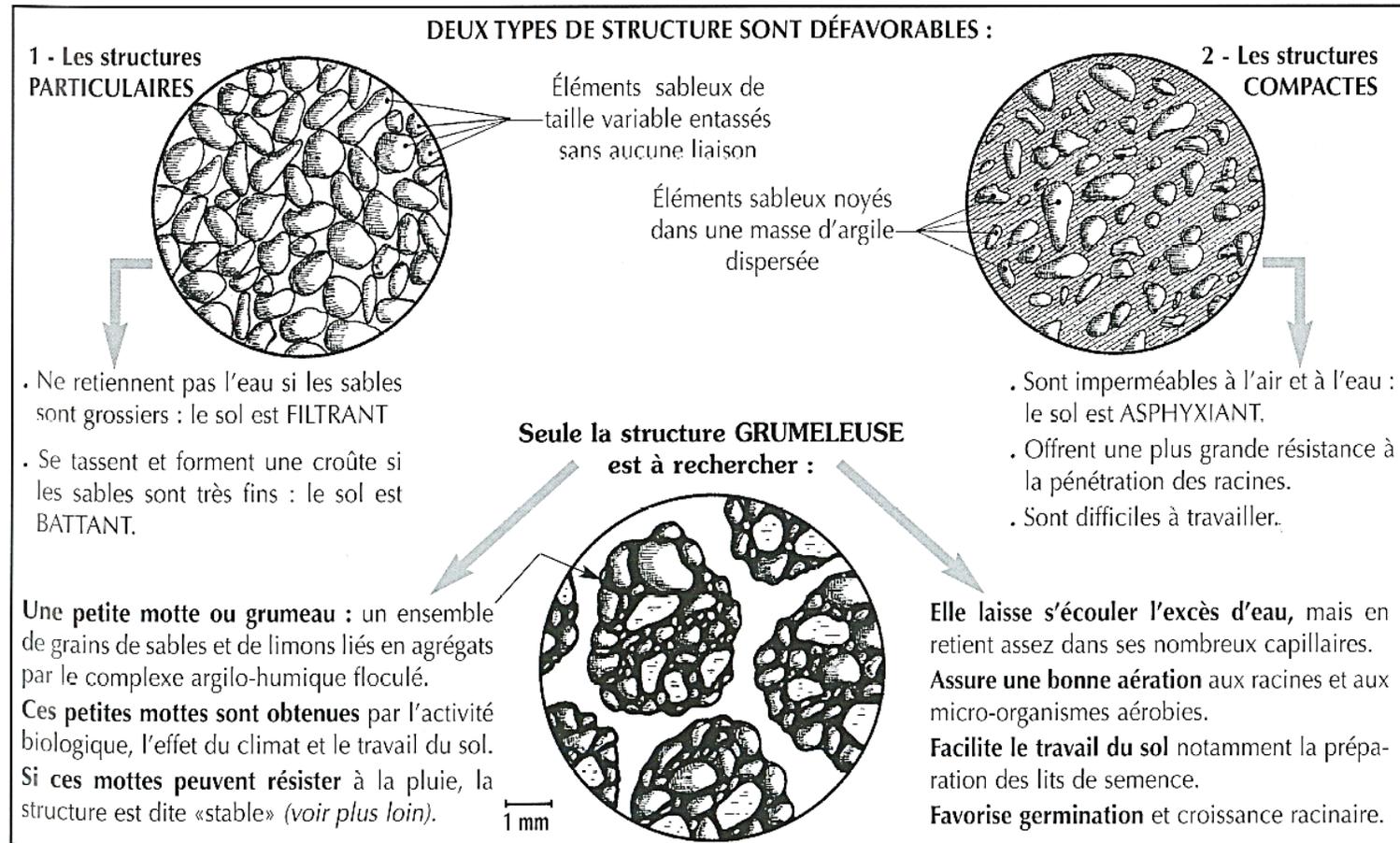
Colloïde : dispersion / suspension d'une à plusieurs substances dans un liquide



Notion de structure du sol

structure : particulaire, compactes ou grumeleuse

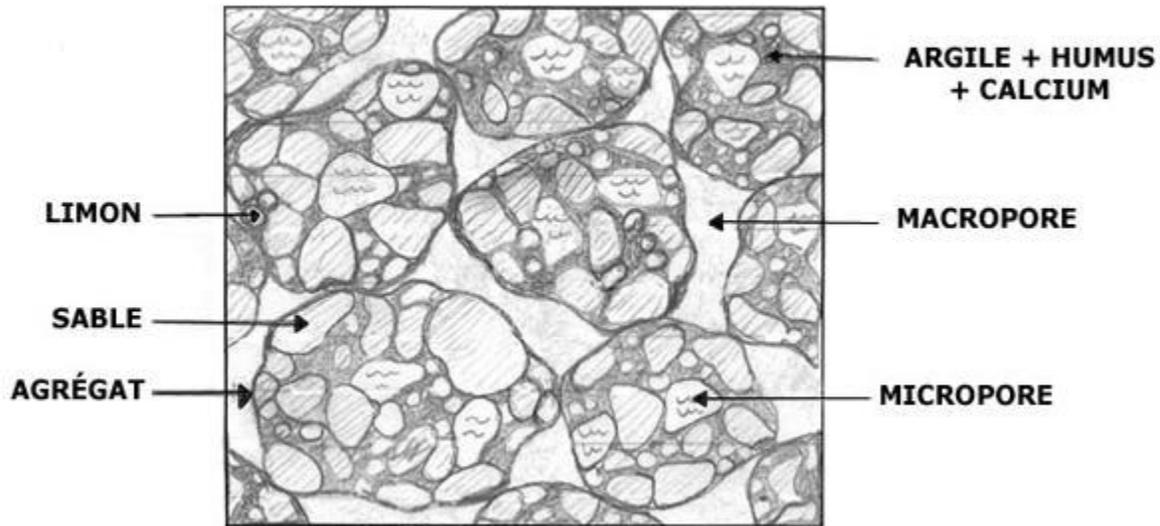
Figure 2-16 - EN BREF : LES AVANTAGES D'UNE STRUCTURE GRUMELEUSE



Importance de la structure grumeleuse

Nombreux agrégats et des pores

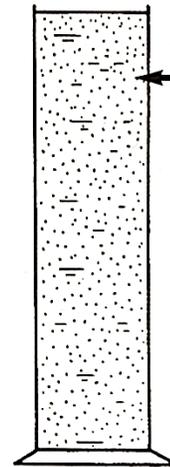
Si argiles flocculées : sol stable et structure **grumeleuse**



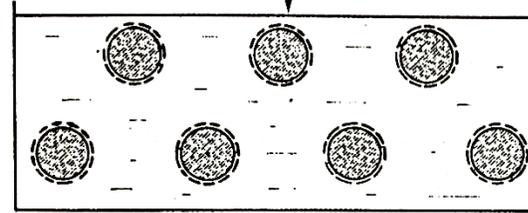
Conséquence sur la structure du sol

Argiles dispersées : sol instable, compact et asphyxiant

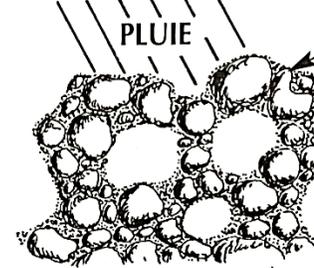
L'argile à l'état dispersé...



...donne, dans l'eau, un trouble permanent. Ce trouble est dû à la présence de charges électriques de même signe négatif entourant les micelles d'argile : elles se repoussent sans cesse, ne pouvant se déposer.



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



Agrégats terreux...

...détruits

Sables lavés

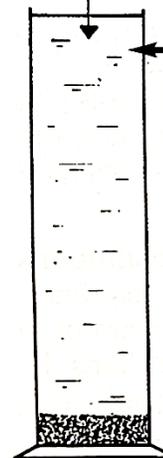


Sel de Ca

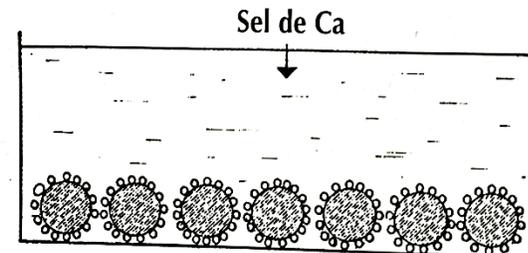
Si l'on ajoute à cette suspension un sel de calcium ou de l'eau de chaux, l'argile floccule :

L'argile à l'état flocculé...

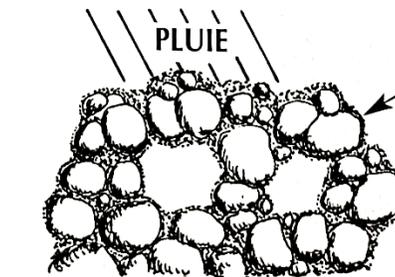
Argiles flocculées : sol stable, aéré et meuble



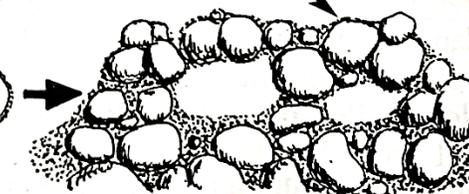
...se dépose au fond, se séparant de l'eau qui devient limpide. Cette flocculation est due à la neutralisation des charges négatives des micelles d'argile par les charges positives des ions Ca^{2+} .



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



Argile flocculée : agrégats solides

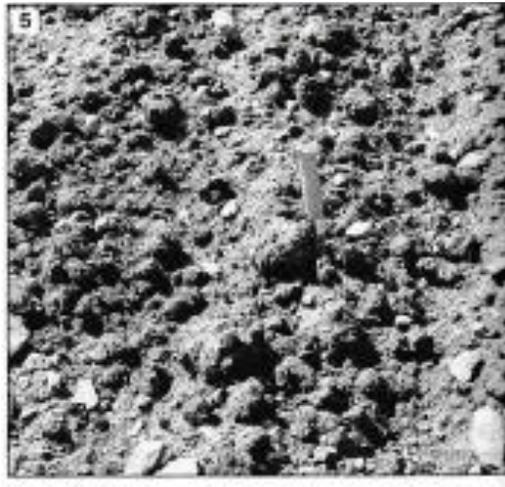


Importance de la floculation

Argiles dispersées (après la pluie et après dessèchement) :



Argiles floculées :
peu de désagrégation



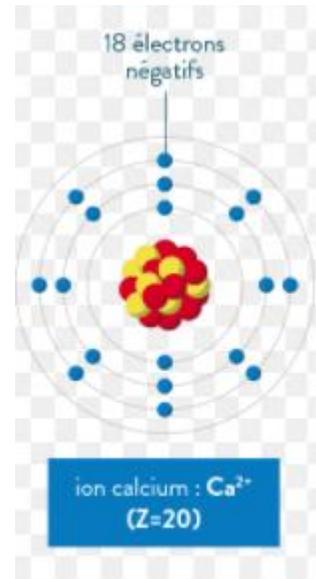
d. Les principaux constituants chimiques du sol

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-})
- 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)



Cations échangeables

- Calcium : chaulage
 - améliore la structure du sol évite les croutes de battance
 - compense l'acidification donc empêche la repousse d'adventices préférant les sols acides
 - compense la perte de calcium due aux prélèvements par les récoltes ou au lessivage

Anions

- Phosphore :
 - Les ions phosphates sont retenus par complexation au calcium ou aux ions fer et aluminium, ce qui limite la lixiviation

- Azote :
 - Abordé plus loin dans le chapitre

Ions métalliques au rôle pédologique et physiologique

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

Notion **d'oxydoréduction**

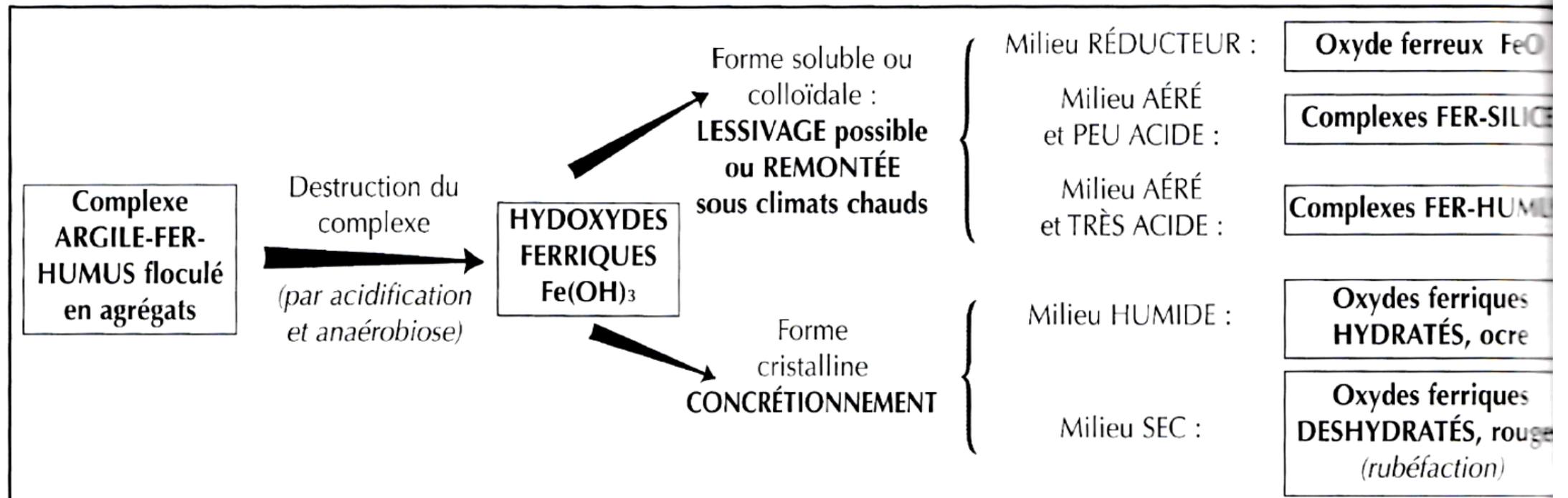


Ions métalliques au rôle pédologique et physiologique

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)



Ions métalliques au rôle pédologique et physiologique

- Aluminium :
 - toxicité pour les végétaux lorsqu'il est trop abondant (sols acides, notamment en zone intertropicale) : inhibition de la croissance des racines par blocage des divisions cellulaires, voire des organes aériens
 - inhibe l'activité de la microflore et d'une partie de la microfaune (champignons, bactéries) du sol
 - l'aluminium présent sur le complexe absorbant du sol s'oppose, par effet « tampon », à tout relèvement du pH tant qu'il n'est pas complètement éliminé du complexe
 - complexation du phosphore sous forme de phosphates d'alumine empêchant sa migration dans la plante.

Séance 2

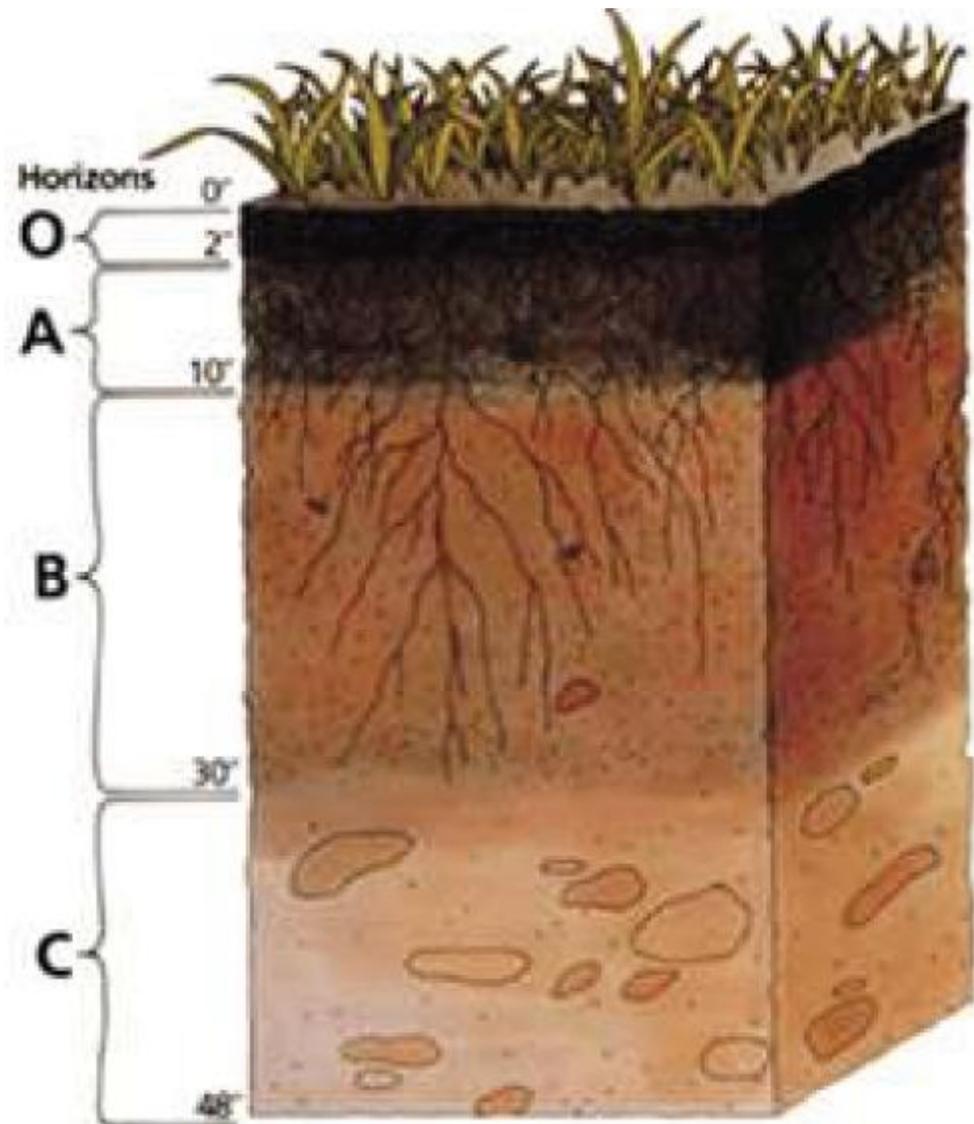
1.3. Les constituants organiques

a. La litière : source de la matière organique du sol

Litières : ensemble des matières organiques encore intactes ou peu transformées



Horizons d'un sol



horizon		nom et définition
O	Ol	horizon organique, litière
	Of	horizon organique, litière fragmentée
	Oh	horizon organique, humus
A		horizon organo-minéral
E		horizon éluvial (lessivage des argiles)
B		horizon minéral d'altération
Bt		horizon minéral d'accumulation (illuvial)
C		roche mère en cours d'altération
R		roche mère non altérée

Constituants organiques de la litière

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



Constituants organiques de la litière

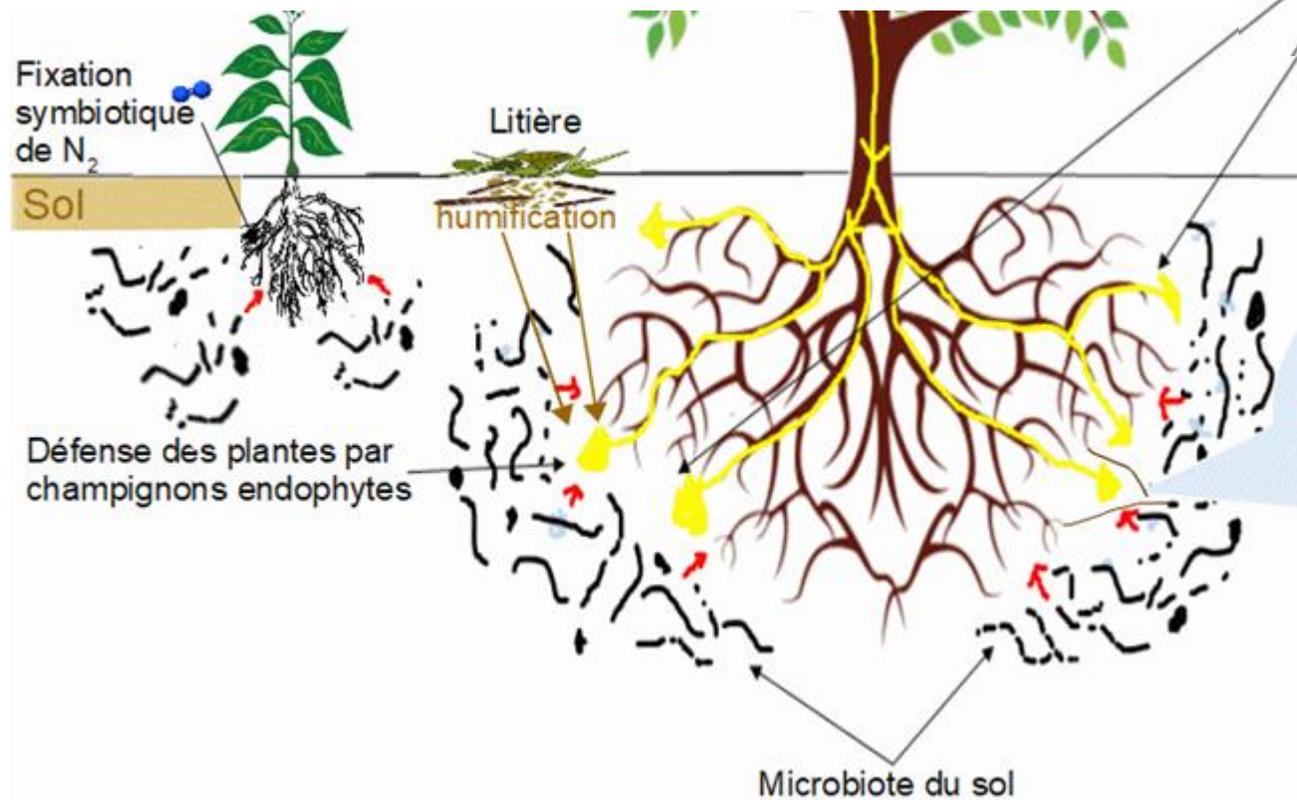


Biomasse aérienne,
biomasse racinaire

La part des racines est souvent difficile à estimer pour des raisons techniques mais Fitter estime que 99 % de la production racinaire se fait sur les racines les plus fines (< 2 mm). **La biomasse racinaire varie de 15 à 25 % pour une forêt jusqu'à 75 % pour les prairies.**

Constituants organiques de la litière

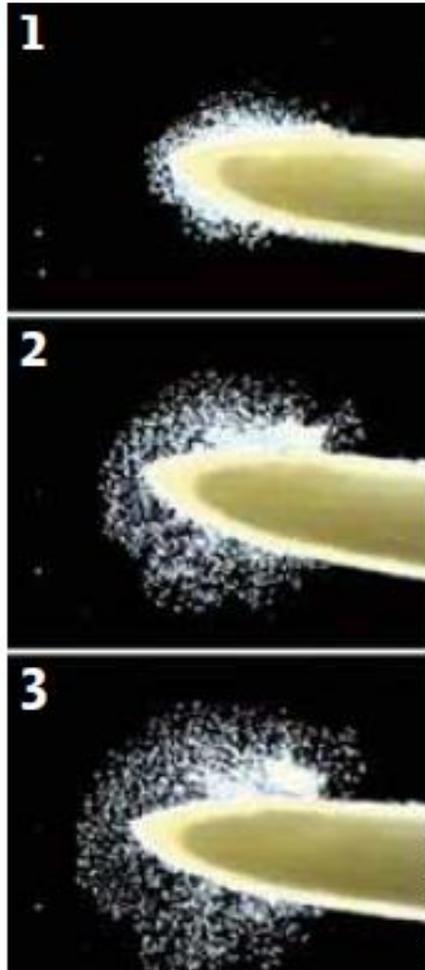
Exsudats et urines complètent la litière



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



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.

Rétroaction au niveau de la rhizosphère

Complément 5

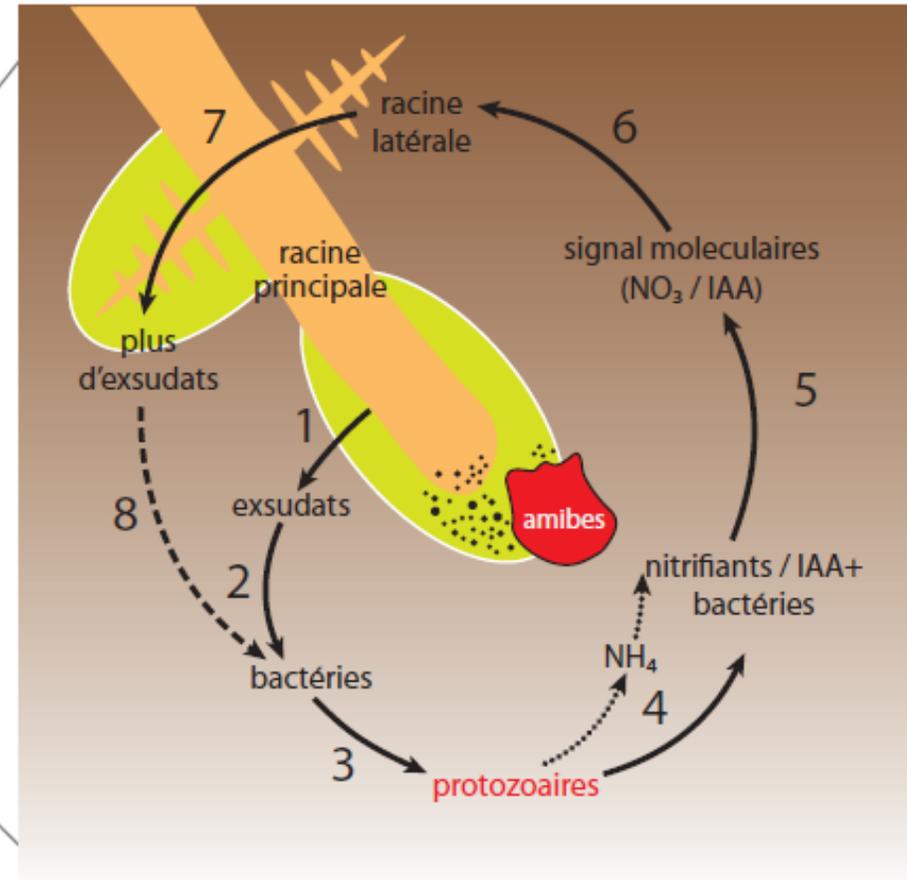
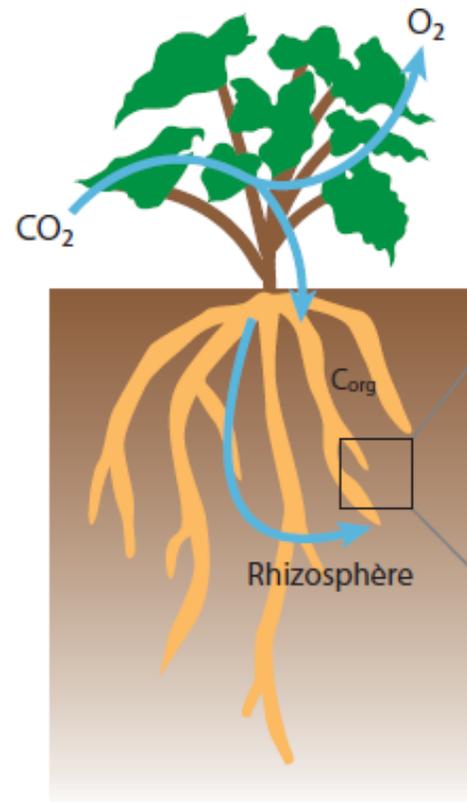


Fig. 2,23 : Modèle conceptuel de boucles de rétroaction au sein d'une rhizosphère impliquant les différents membres de la chaîne alimentaire du sol. L'exsudation racinaire (1) stimule la croissance de communautés bactériennes variées (2) et par la suite, consommateurs tels que les protozoaires (3). L'ammoniac 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 NO_3^- 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

Importance du rapport C/N de la litière

L'équilibre nutritionnel des microorganismes est situé à un rapport C/N de 24. **En dessous de ce rapport, l'azote est en excès et sera donc libéré, à la disponibilité des plantes. Au-dessus, de l'azote sera prélevé dans la solution du sol pour subvenir aux besoins des microorganismes.** D'où :

- $C/N < 15$: production d'azote, la vitesse de décomposition s'accroît ; elle est à son maximum pour un rapport $C/N = 10$
- $15 < C/N < 20$: besoin en azote couvert pour permettre une bonne décomposition de la matière carbonée,
- $C/N > 20$: pas assez d'azote pour permettre la décomposition du carbone (il y a compétition entre l'absorption par les plantes et la réorganisation de la matière organique par les microorganismes du sol, c'est le phénomène de "faim d'azote"). L'azote est alors prélevé dans les réserves du sol. La minéralisation est lente et ne restitue au sol qu'une faible quantité d'azote minéral.

Il est couramment admis que, plus le rapport C/N d'un produit est élevé, plus il se décompose lentement dans le sol mais plus l'humus obtenu est stable.

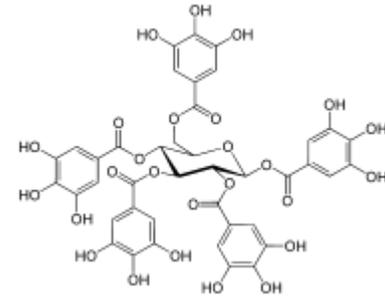
Litière améliorante ou acidifiante

Améliorantes : herbacées ou certains feuillus

Acidifiantes : conifères, rhododendrons, bruyères



Tanins :



b. Evolution de la litière : transformation de la matière organique morte en humus.

Fragmentation par la faune du sol

Lien TP Sol n°2 et partie 1.1.d

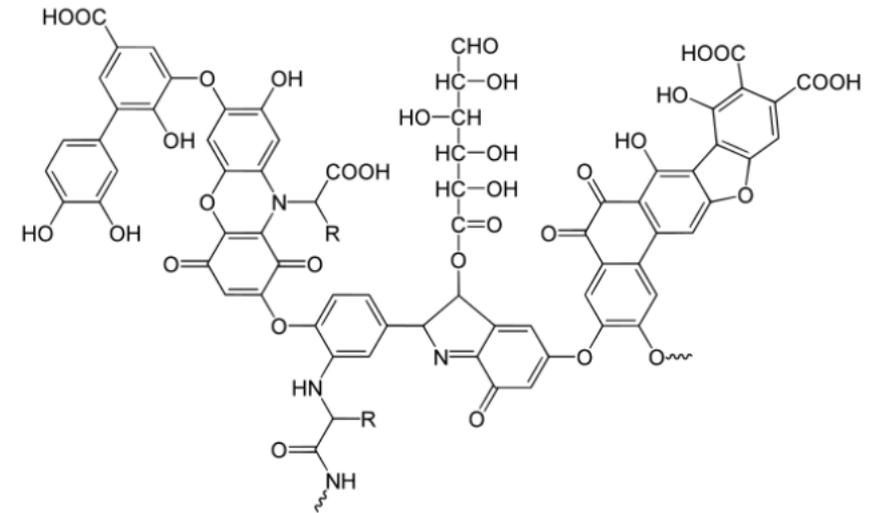


Constituants organiques l'horizon A

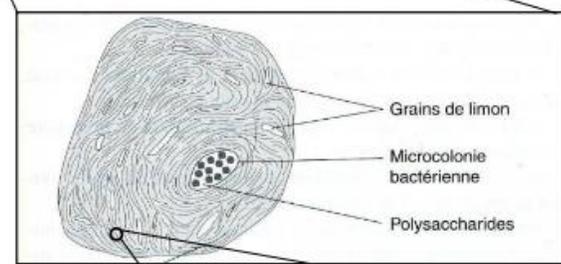
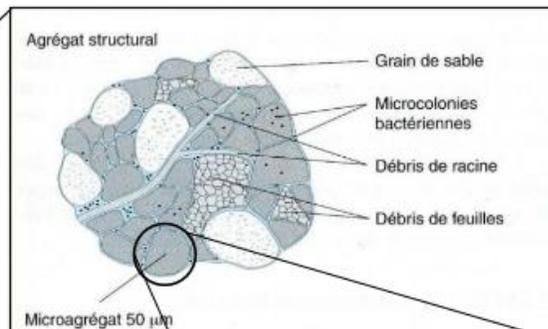
3 catégories de substances constituant l'humus en fonction de leur solubilité dans différentes contextes chimiques

- l'acide fulvique
- l'acide humique
- l'humine

L'existence de ces 3 composants de l'humus dans les sols est remise en cause, ils n'auraient qu'une « existence » expérimentale en réactions aux traitements chimiques subis « hors sol ».

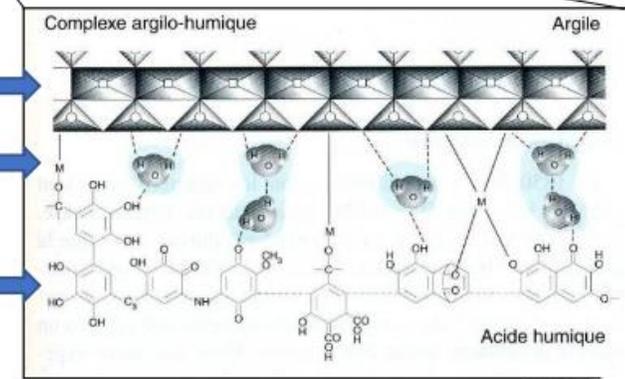


Un acide humique,
composant de l'humus



Cet édifice réactif était anciennement appelé « complexe argilo-humique »

Argile
Calcium
Humus

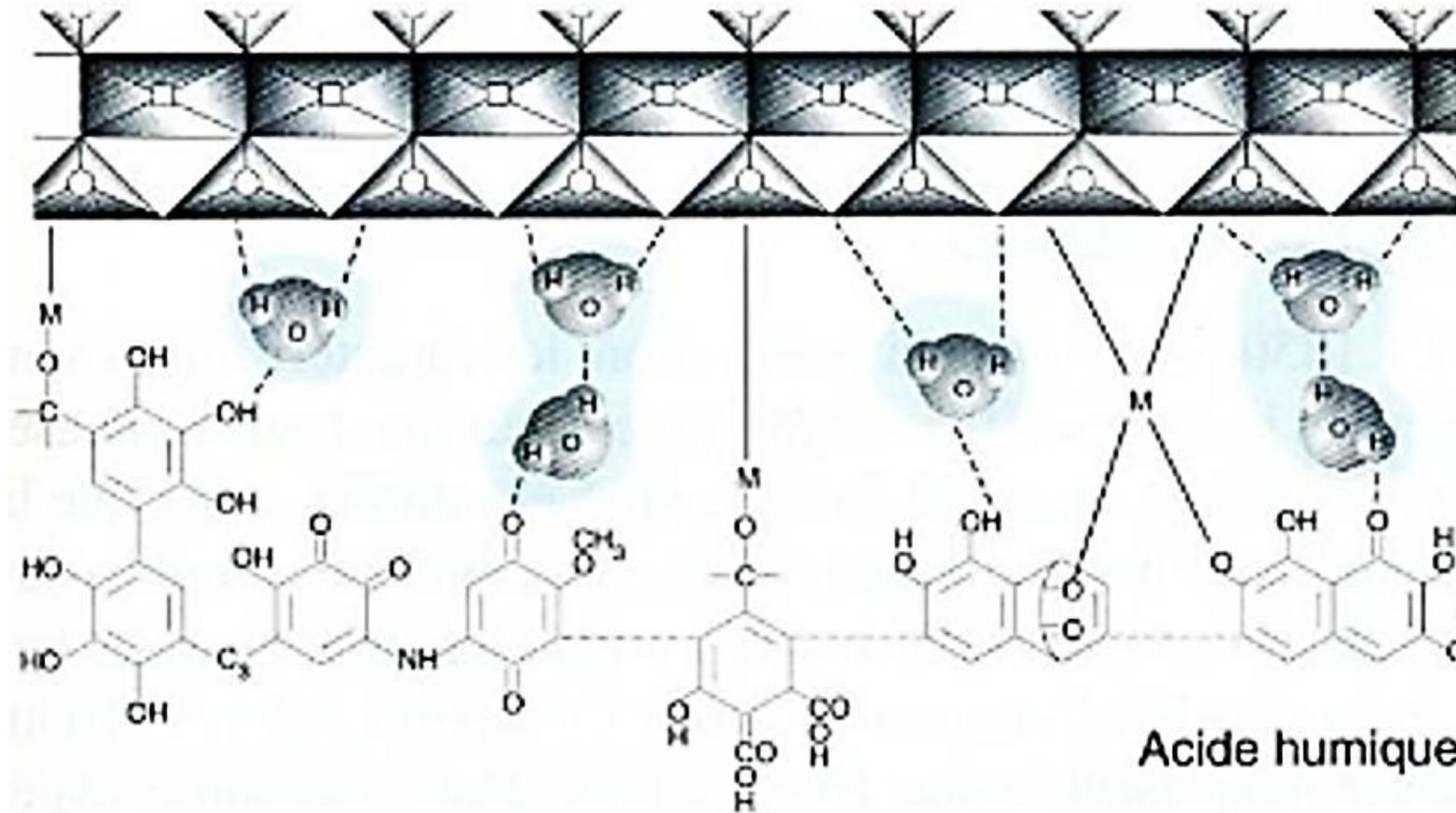


Source: Le sol vivant - Bases de pédologie, biologie des sols. Gobat J.-M., Agagno M. et Matthev W., 2003, Presses polytechniques et universitaires romandes

Le complexe argilo-humique

Complexe argilo-humique

Argile

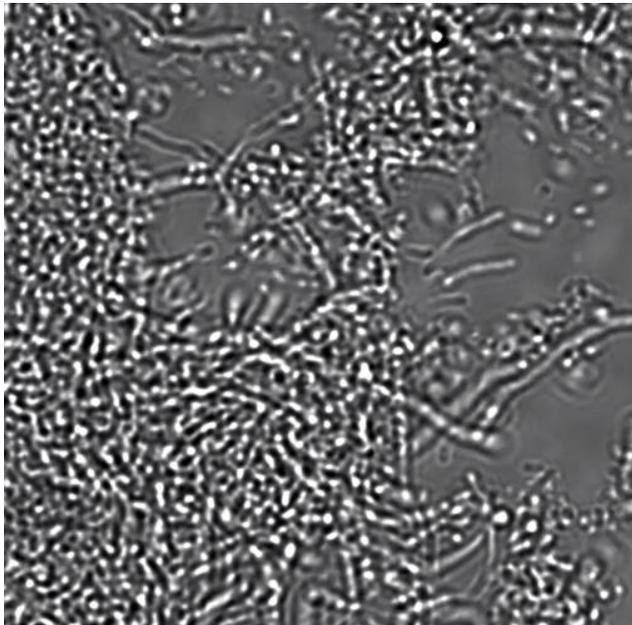


Argiles minérales et acides humiques, tous deux porteurs de charges négatives, peuvent se retrouver associés par l'intermédiaire de cations minéraux (calcium ou fer le plus souvent), ils forment alors des complexes argilo-humiques.

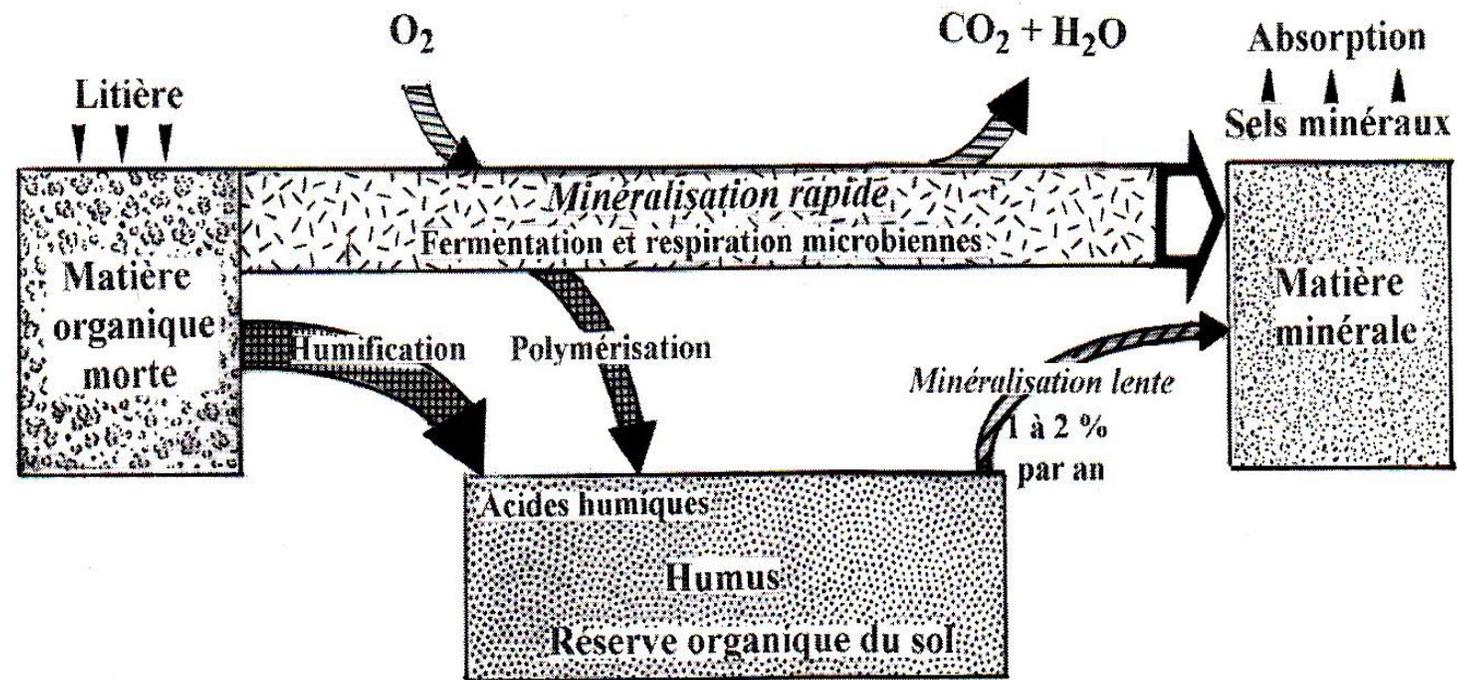
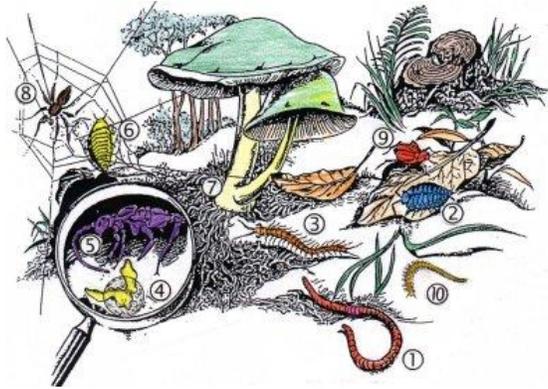
Développé plus loin

Action des décomposeurs : bactéries et champignons du sol

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



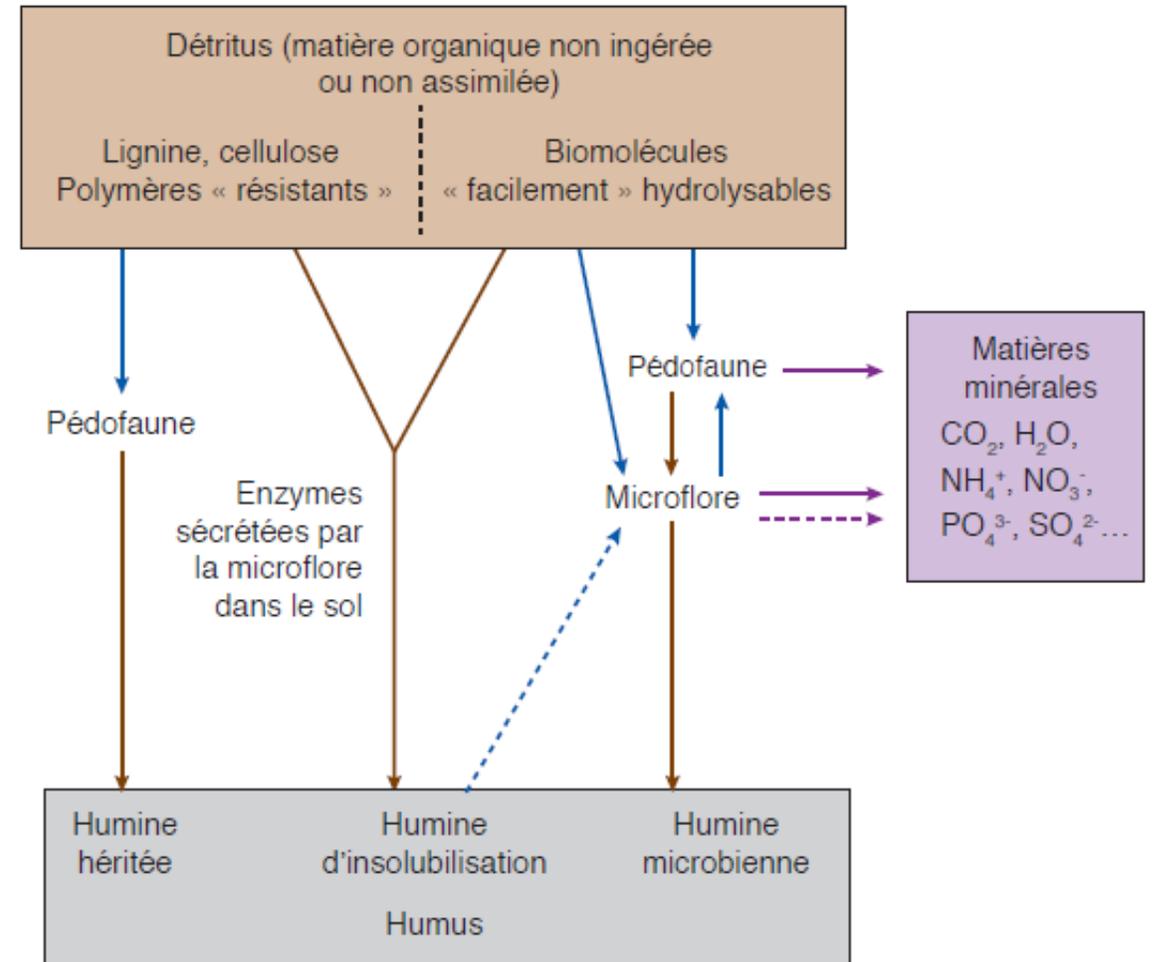
Minéralisation primaire à l'origine de l'humus et d'ions minéraux.



Humification

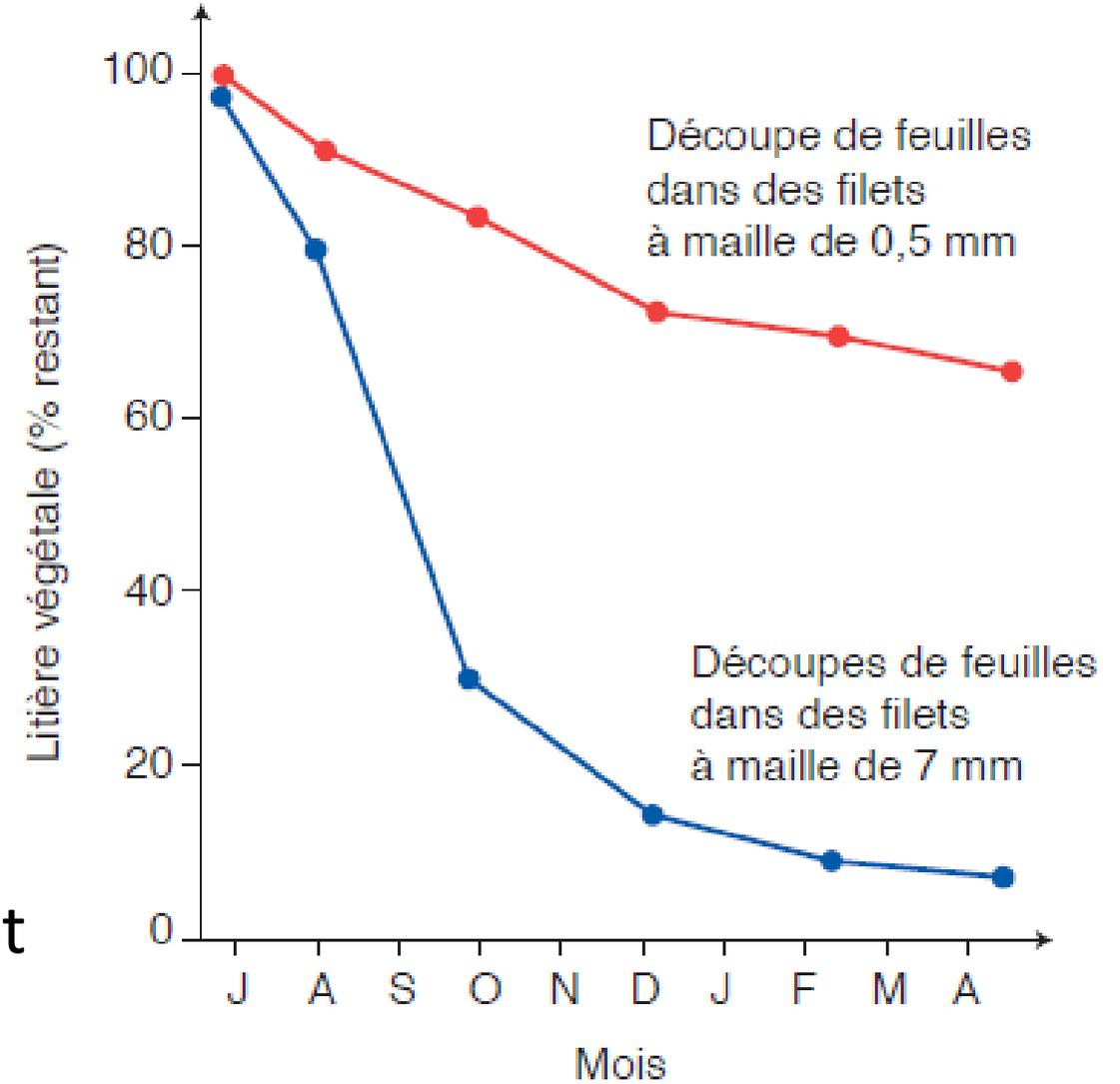
Trois types
d'humification conduisent
à l'humus

**Devenir des matières
organiques contenues dans
les débris au niveau du sol**
**Traits pleins : processus
d'humification et de
minéralisation primaire**
**Traits pointillés : processus de
minéralisation secondaire.**



- Transfert de matière organique par consommation et transformation
- Transfert de matière organique non ingérée ou non assimilée et transformation
- Minéralisation et transfert de matière minérale

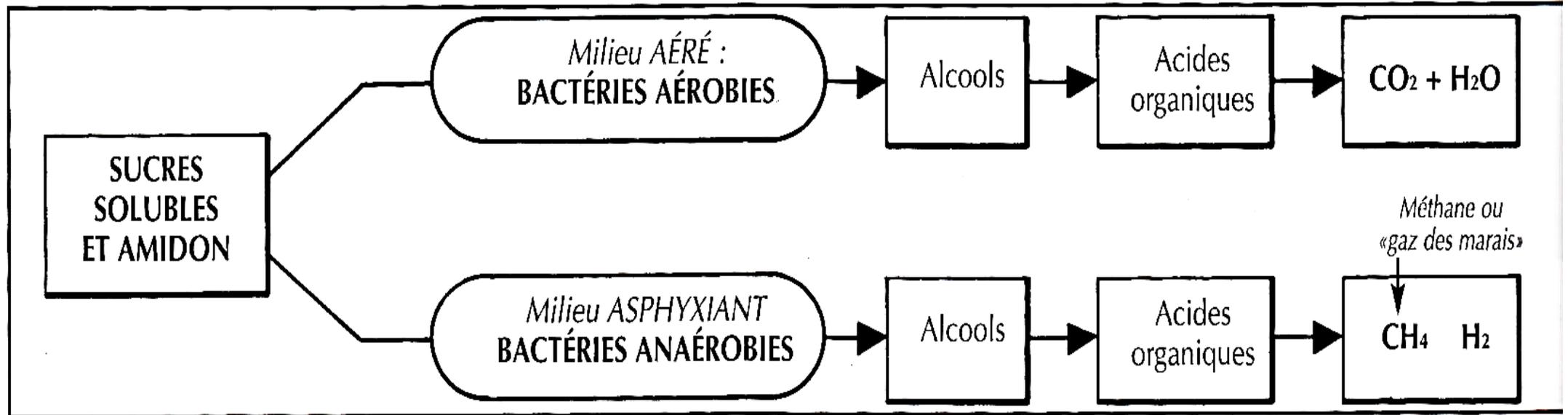
De la litière est enfermée dans des filets à mailles de 7 mm et des filets à mailles de 0,5 mm. Les mailles de 7 mm permettent à la pédofaune de « grande taille » comme des vers de terre et des myriapodes de passer les filets et d'accéder à la litière, les mailles de 0,5 mm ne laissent passer que bactéries, champignons et petits acariens. Les mois sont désignés par leur initiale. L'expérience commence au mois de juillet (J). d'après Edwards et Heath (1963) tiré de Ricklefs R.-E (2005) Écologie



Décomposition des glucides simples

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

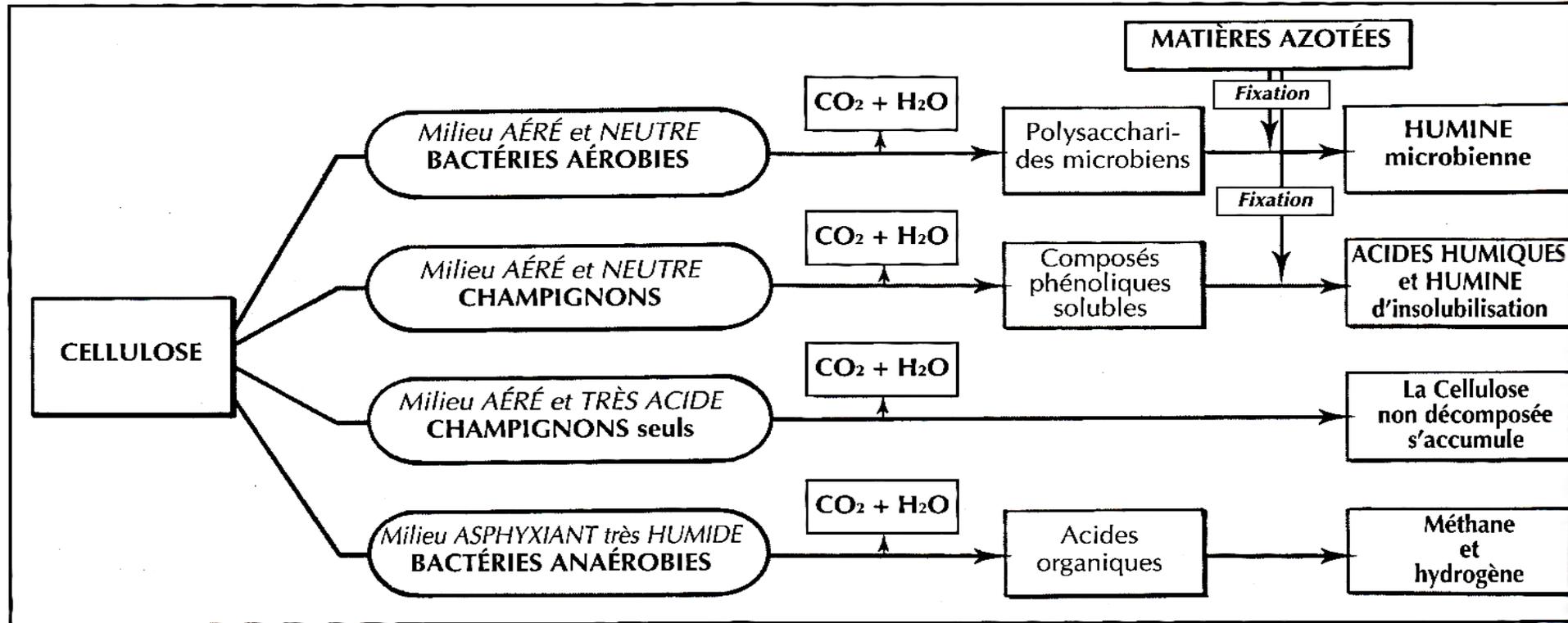
En milieu AÉRÉ, les sucres solubles et l'amidon sont les premiers attaqués : ils provoquent la prolifération des bactéries, qui les oxydent complètement, restituant ainsi au sol et à l'atmosphère le CO₂ et l'eau qui ont servi à les construire par la photosynthèse



Décomposition de la cellulose

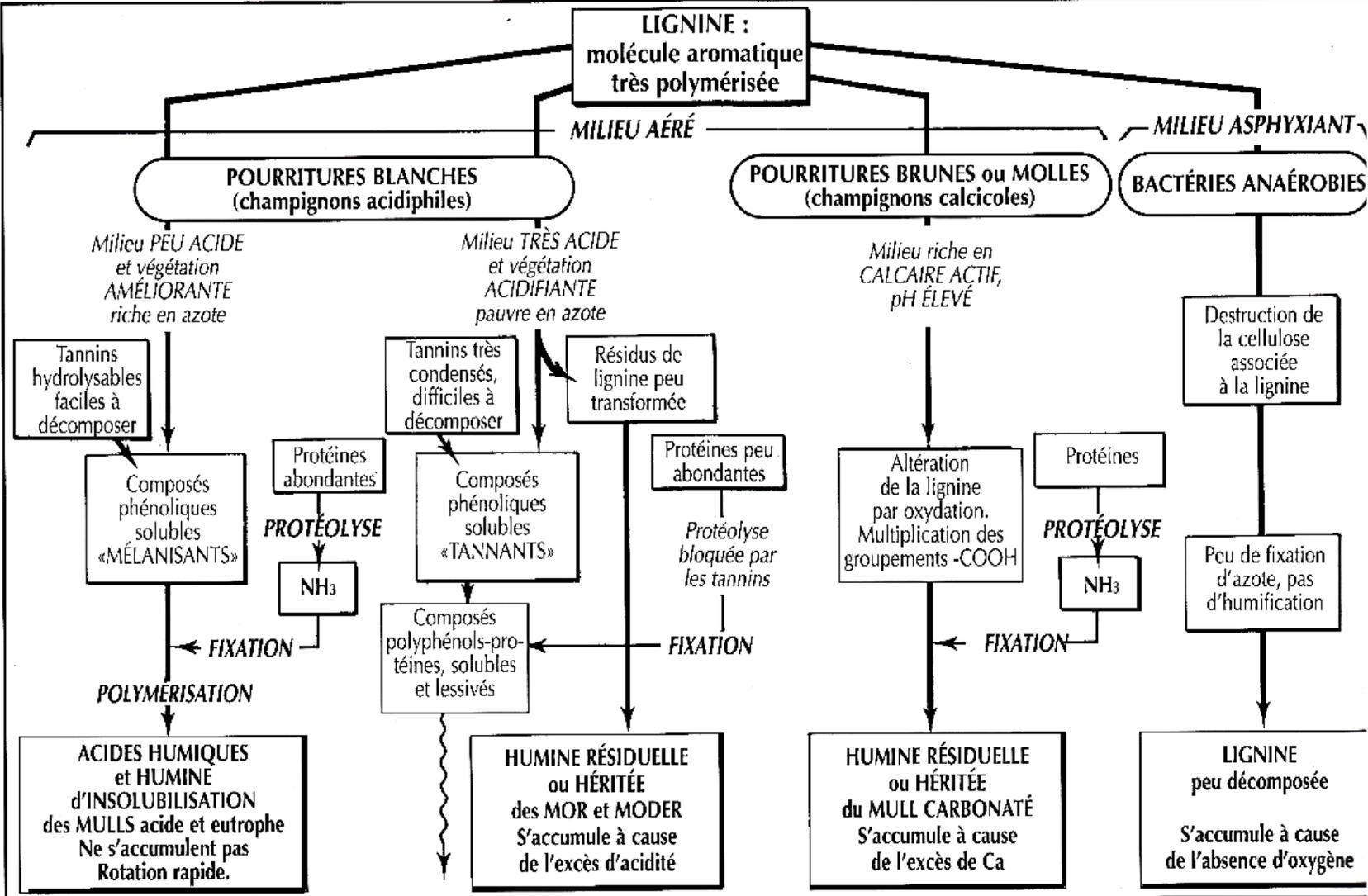
Figure 7-3 - LA DÉCOMPOSITION DE LA CELLULOSE, ou CELLULOLYSE

- . 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 de la lignine

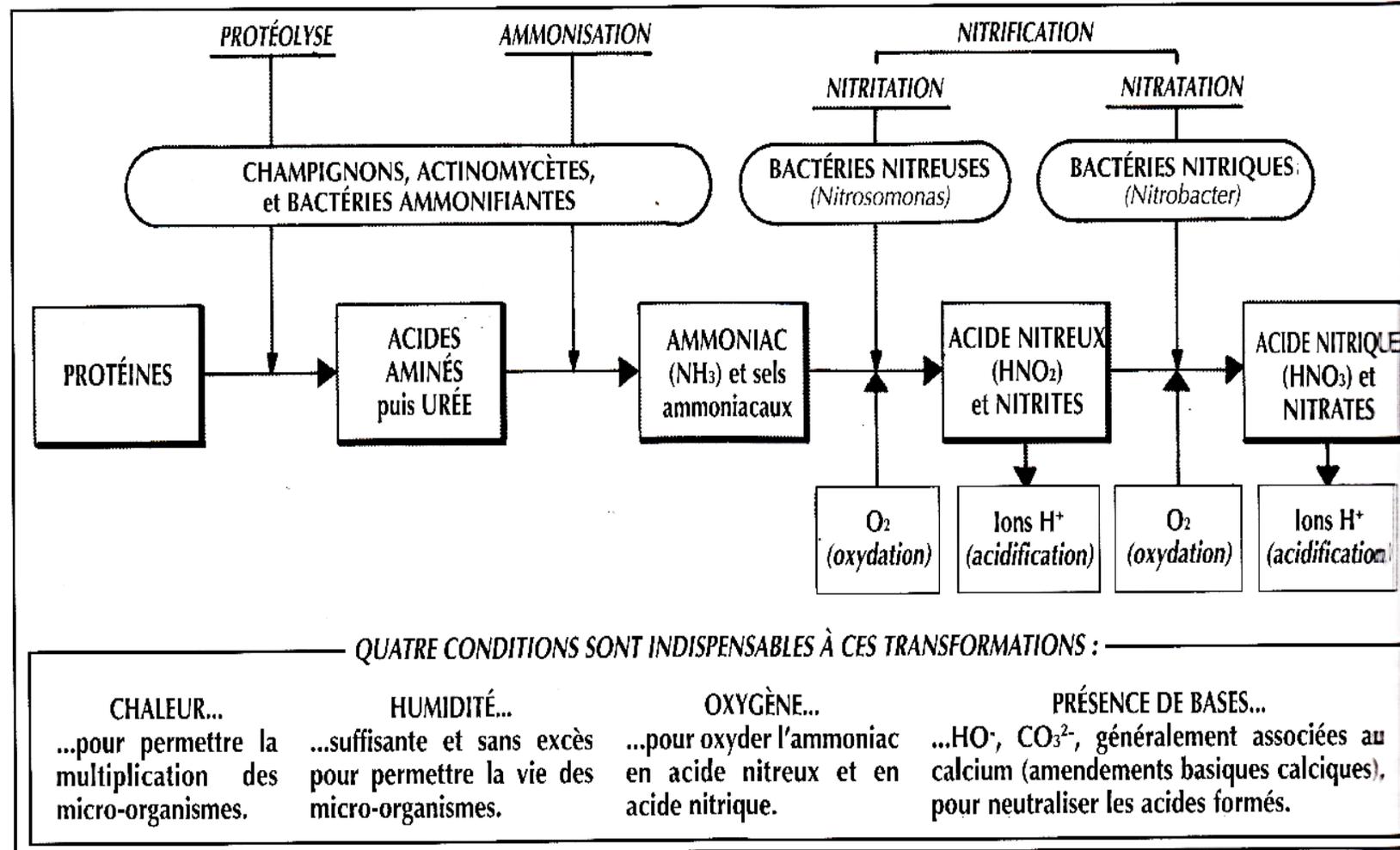
Figure 7-6 - LA DÉCOMPOSITION DE LA LIGNINE ou LIGNINOLYSE



Décomposition des protéines.

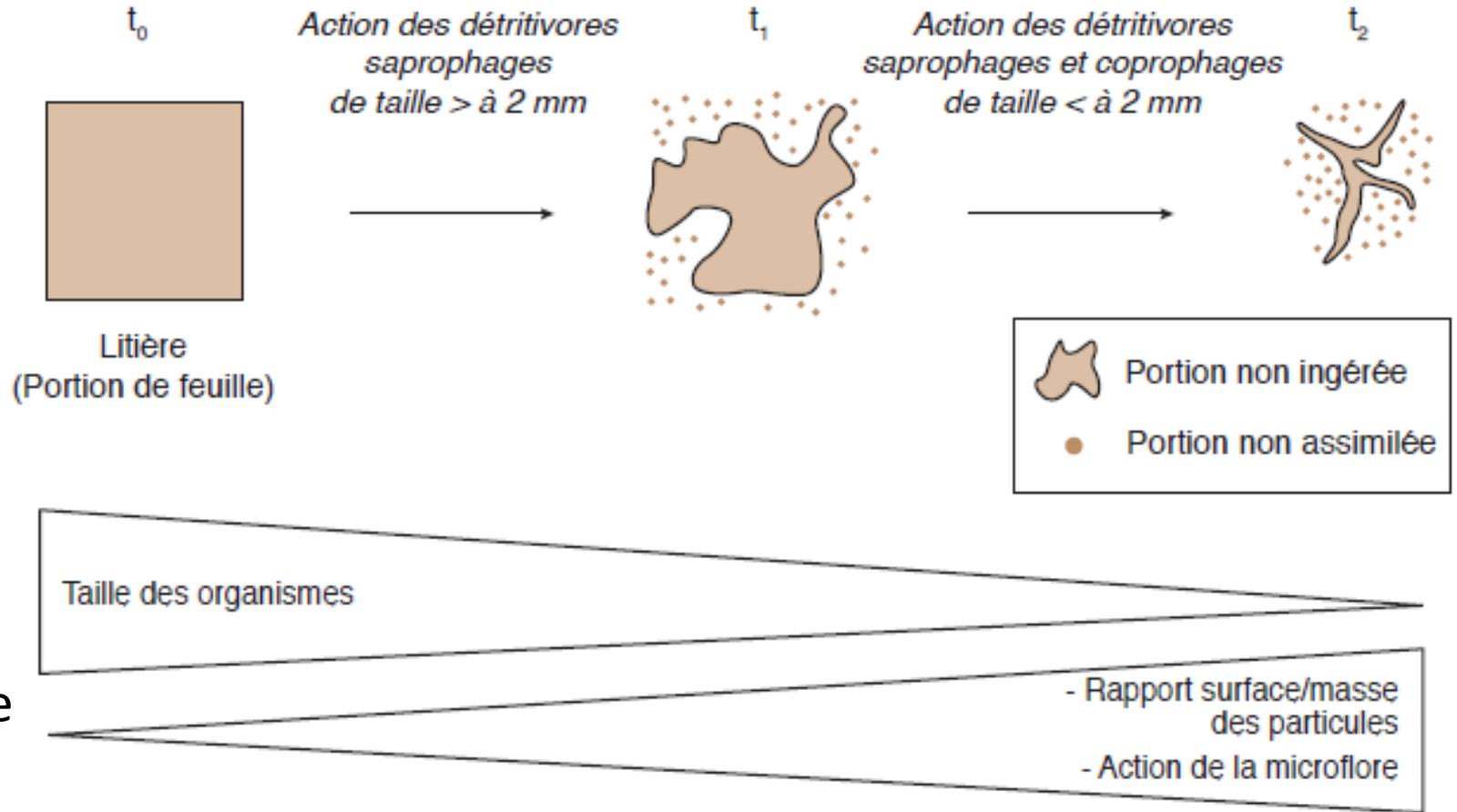
Figure 7-7 - LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES AZOTÉES ou PROTÉOLYSE, en milieu AÉRÉ et PEU ACIDE

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.

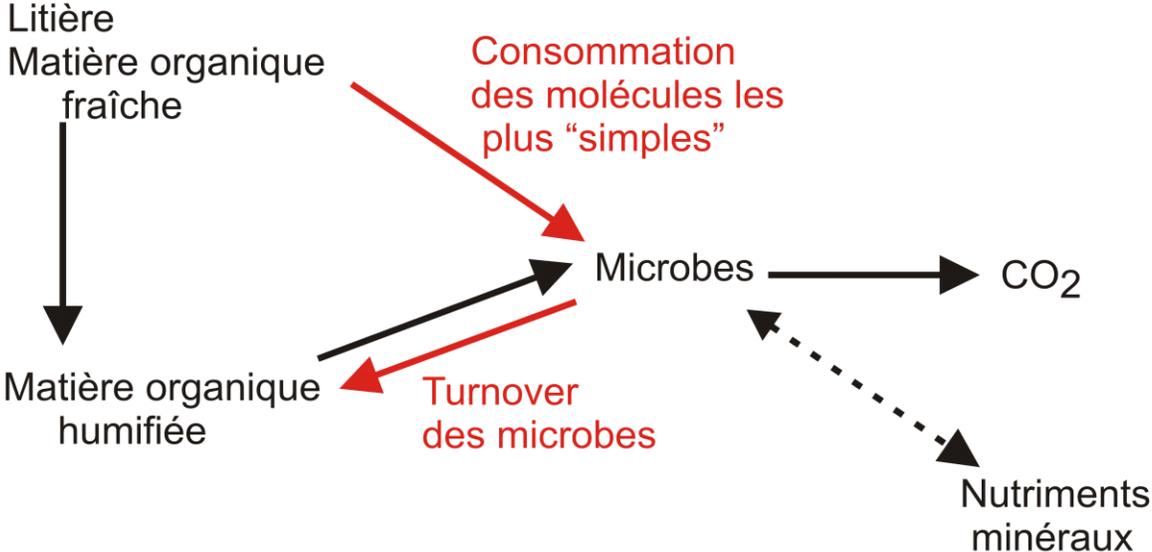


La décomposition de la litière par les détritivores est un processus **séquentiel**.

Les particules de la litière sont progressivement ingérées et assimilées par les différents organismes décomposeurs du sol. La portion non ingérée et disponible pour d'autres groupes de décomposeurs est représentée en brun sur la figure. La portion non assimilée et rejetée par les organismes est représentée par des petits points bruns.

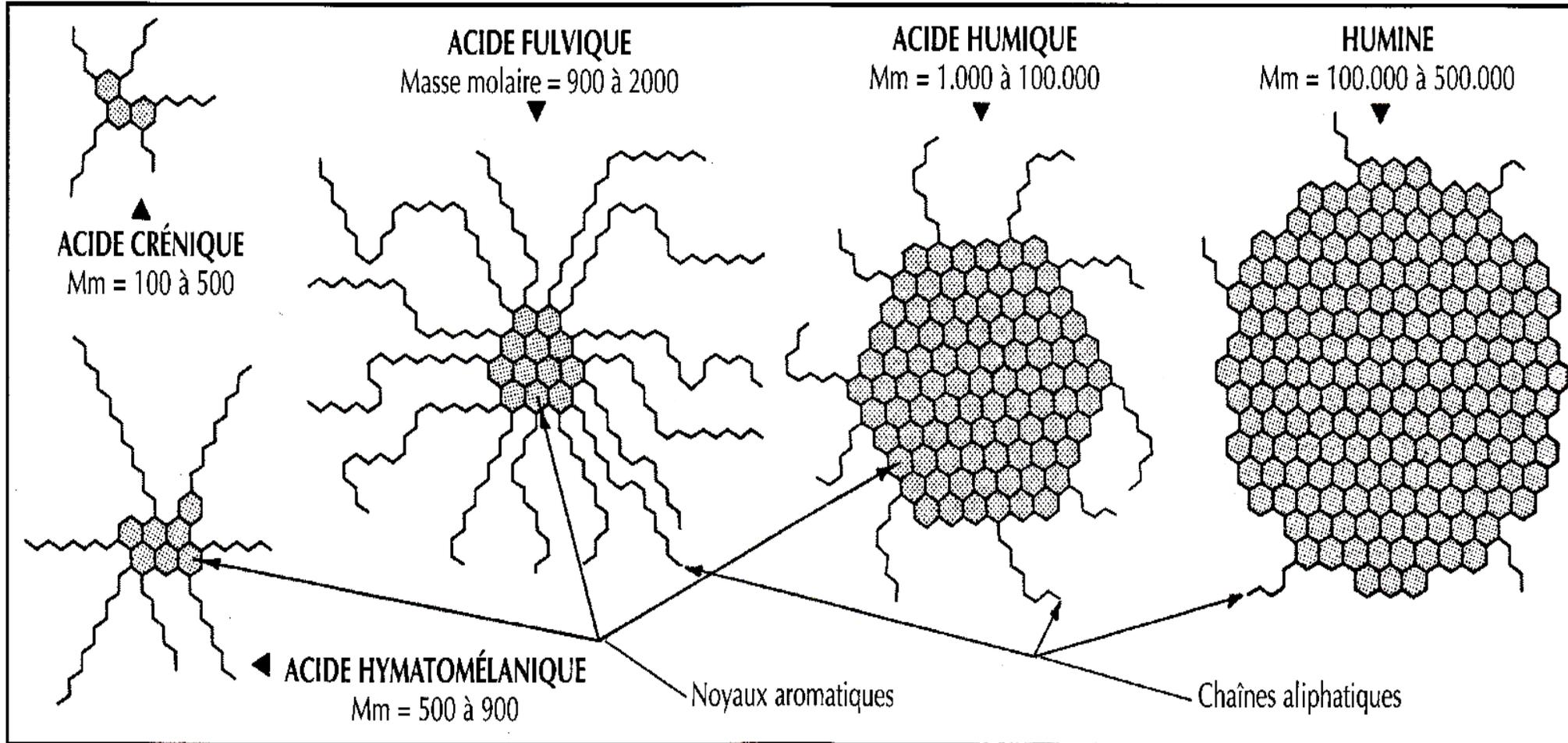


Humification



Humification

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



Humification

III - LES 5 CARACTÉRISTIQUES DE LA POLYCONDENSATION

La POLYCONDENSATION

qui fait passer les molécules humiques du stade acides fulviques au stade humine, se caractérise par :

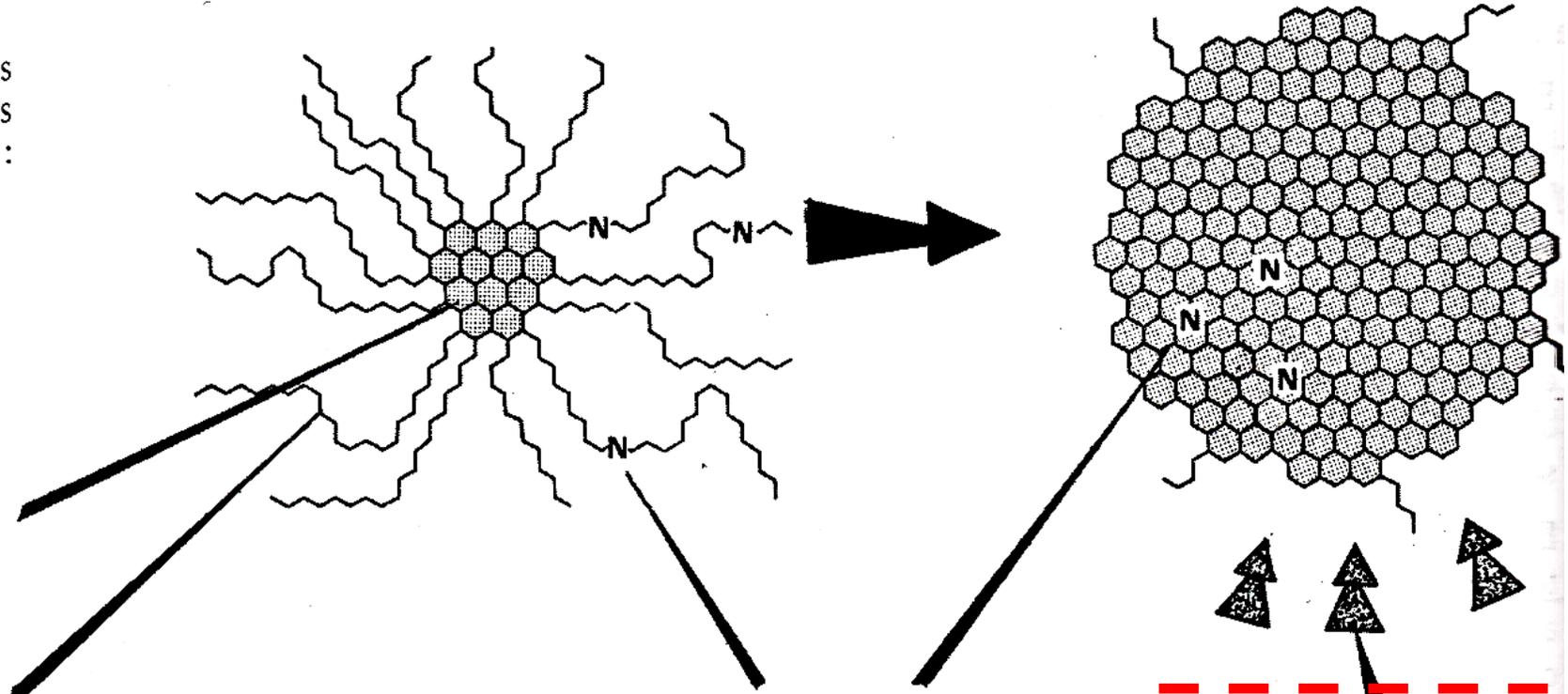
1 - L'augmentation de la taille du noyau aromatique, souvent appelé «nucleus».

2 - La diminution proportionnelle de l'importance des chaînes aliphatiques par rapport au nucleus.

3 - L'augmentation de la masse molaire et la diminution de la solubilité des molécules formées.

4 - Le passage progressif de l'azote de la forme aminée dans les chaînes aliphatiques à la forme hétérocyclique dans le nucleus.

5 - La liaison de plus en plus forte avec les constituants minéraux : argile, limons, sables.



c. Un recyclage plus ou moins rapide de la matière organique : différences entre Mull et Moder

Mull, Moder, (Mor)

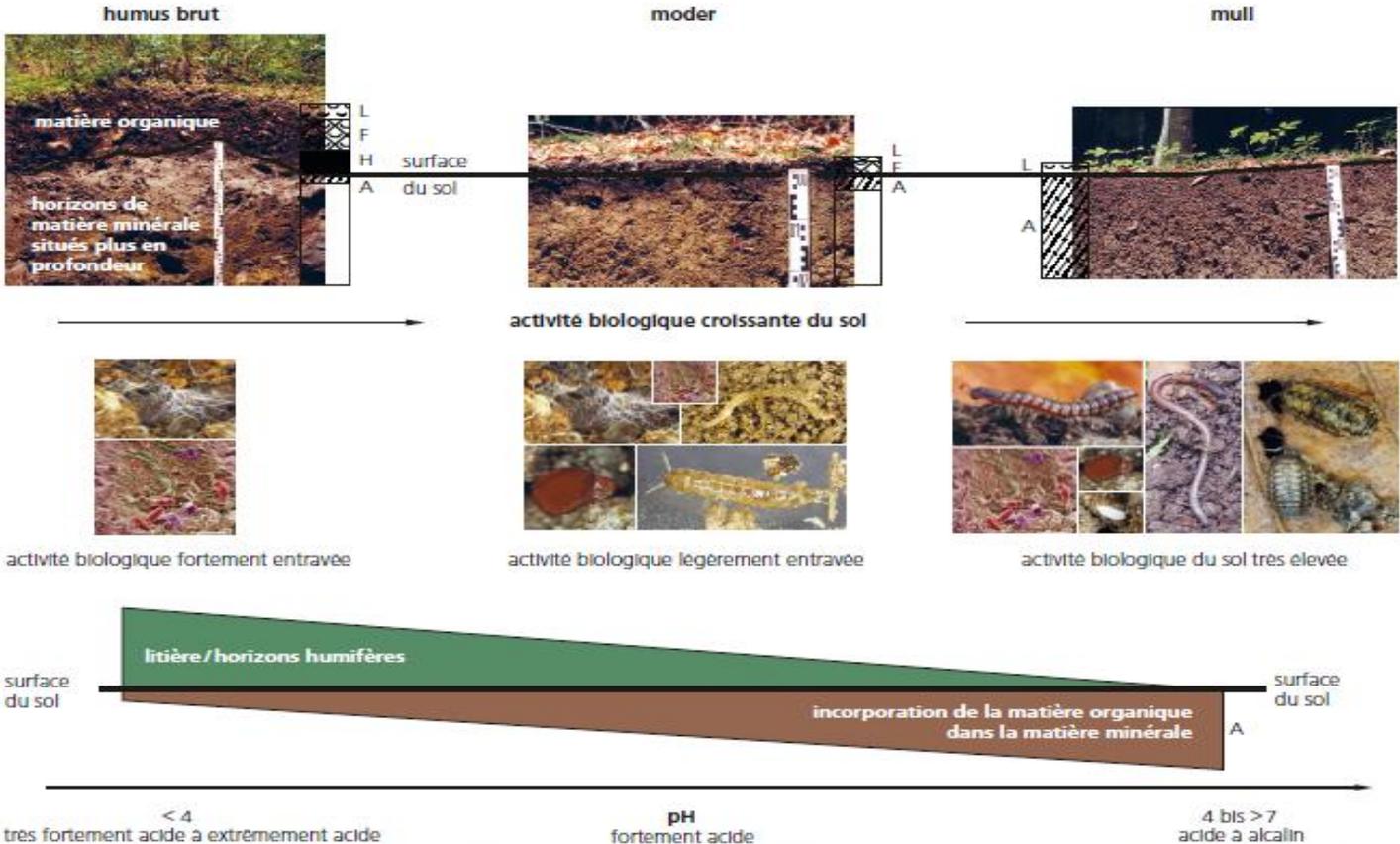


Fig. 18. Activité biologique des différentes formes d'humus. La forme d'humus est un indicateur de la capacité de transformation des éléments nutritifs dans le sol de surface et par là même du degré d'activité biologique dans le sol.

c. Un recyclage plus ou moins rapide de la matière organique : différences entre Mull et Moder

Mull

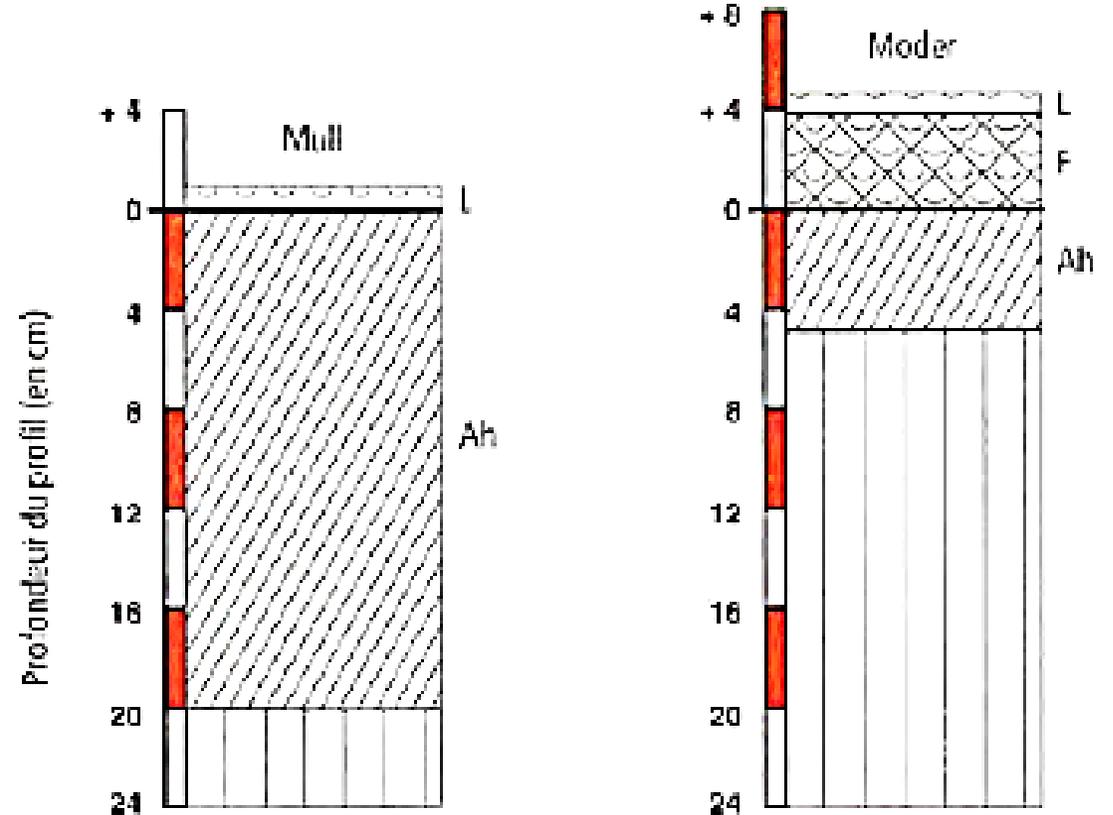


Mull. (JFP)

Moder



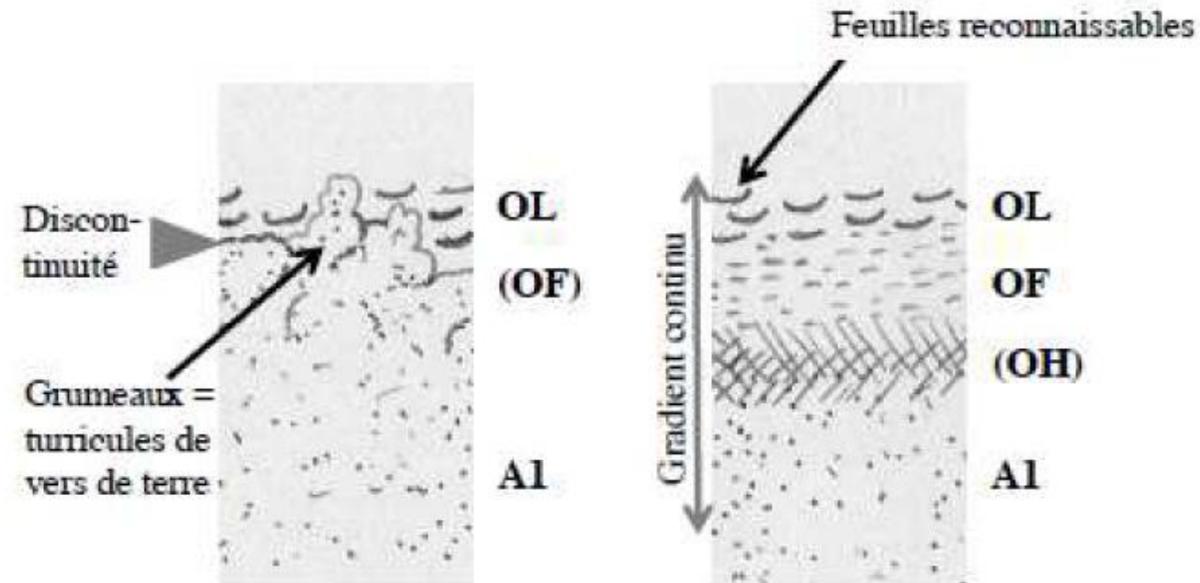
Moder. (GSa)



Horizon de fragmentation chez le Moder absent chez le Mull

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.

type d'humus	Mull	Moder
structure présumée	OL / A1	OL / OF / A1
biome	prairie	forêt de feuillus
végétaux	herbacées, ligneux à stratégie <i>r</i>	ligneux à stratégie <i>K</i>
animaux	lombrics ++	enchytréides ++, arthropodes
complexe argilo humique	abondant	peu abondant
microorganismes	bactéries ++	champignons ++
mycorhizes	endomycorhizes ++	ectomycorhizes ++
type de matière organique	cellulose++	lignine ++ tanins ++
acidité	faible acidité	acidité plus forte
dégradation de la MO	rapide et complète	lente et incomplète
rapport C/N	10 < C/N < 15	>15
enfouissement de la MO	important	faible
cycle de la matière	rapide	lent
complexe d'échange cationique	abondant et efficace	peu abondant et peu efficace

Turricules de vers de terre :

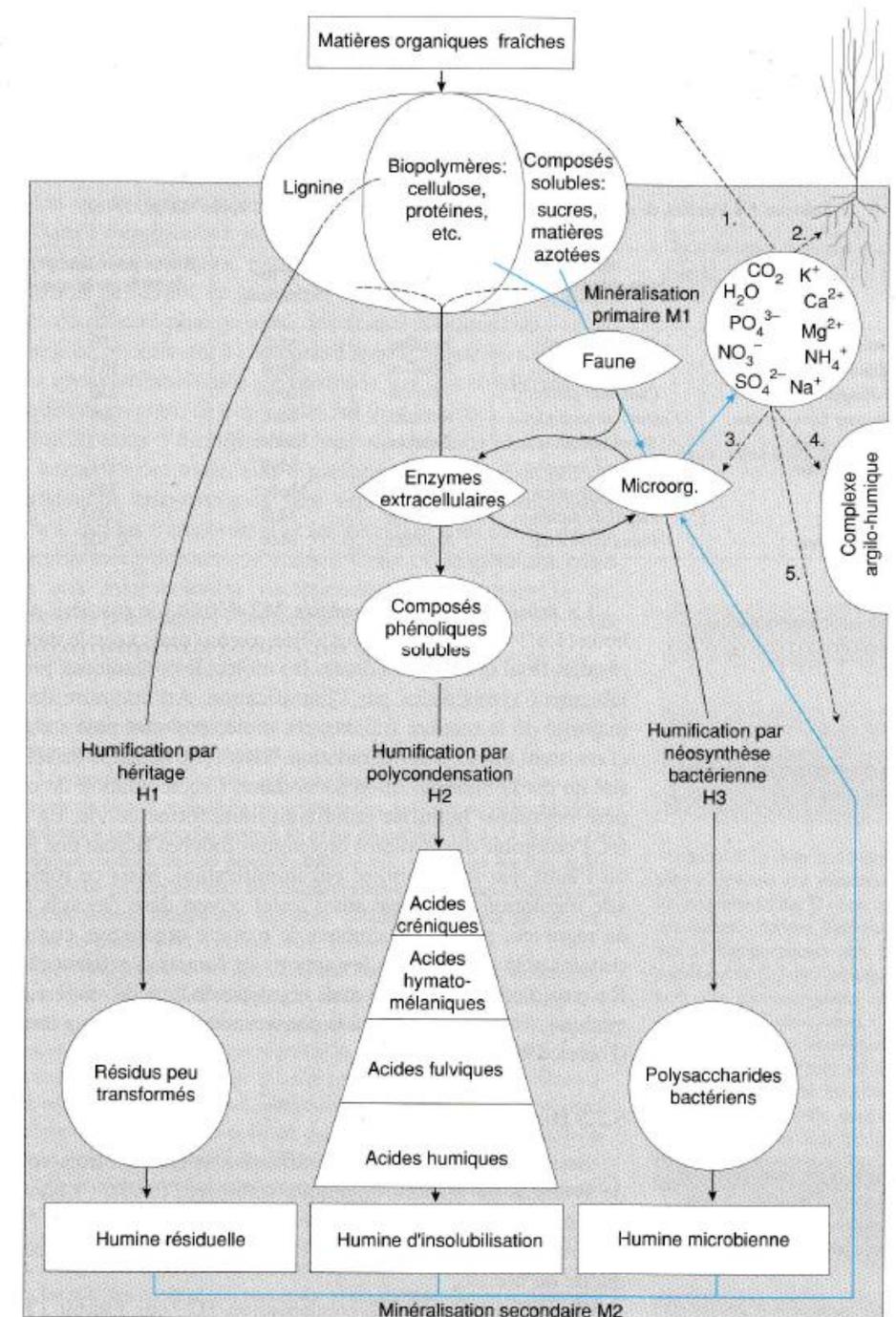


Bilan

Trois types d'humification conduisent à l'humus

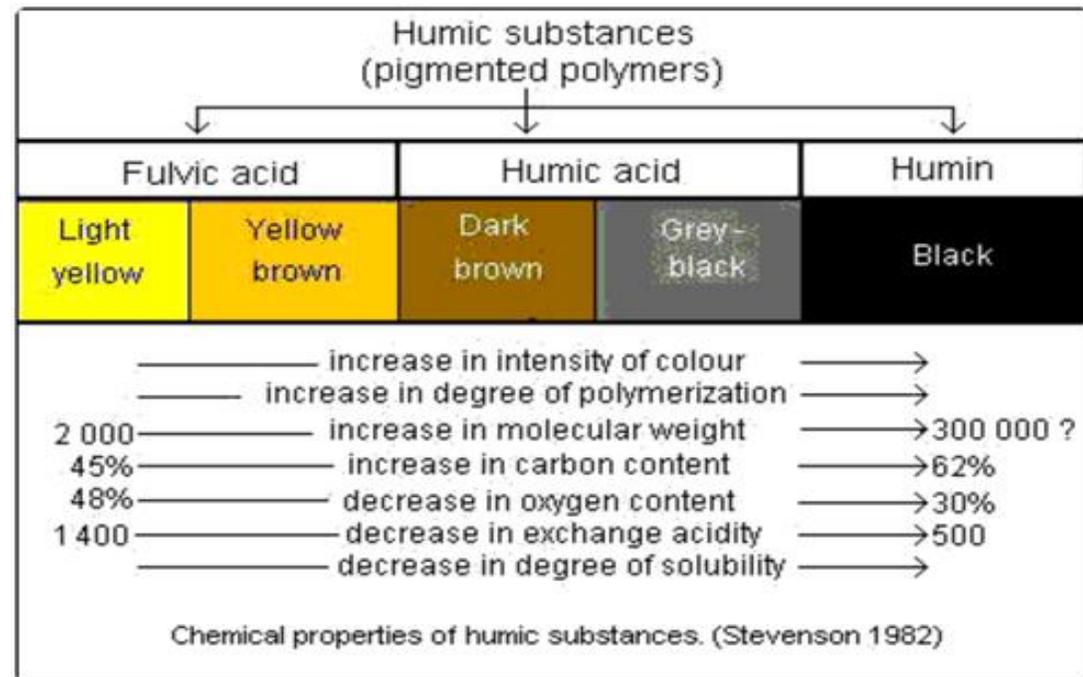
Cette transformation dépend de nombreux facteurs que l'on peut classer par ordre de hiérarchie :

- Climat (les climats froids ralentissent l'activité microbienne)
- Substrat minéral (nature protectrice de certaines argiles)
- Qualité matière organique et végétation (et notamment du ration C/N) ex : mull/moder
- Macrofaune du sol (espèce ingénieur, notamment les lombrics, dans la fragmentation de la MO)
- Communauté microbienne.



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

Coloration liée aux pigments : figure 6



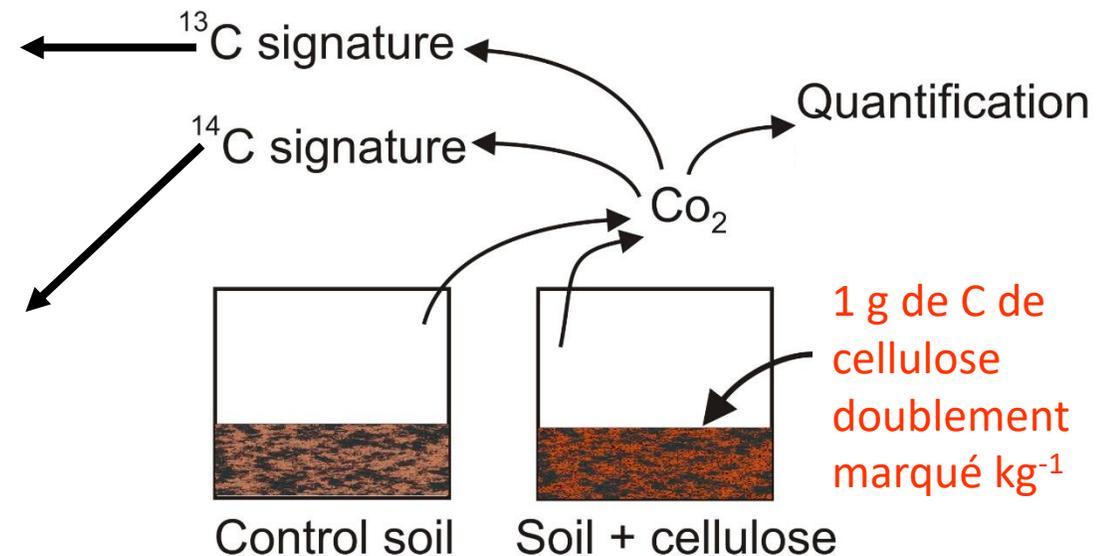
Remarque 1 : La différence de renouvellement de la matière organique en profondeur est elle due à de mauvaises conditions pour les microbes en profondeur?

→ L'activité microbienne est possible en profondeur

Minéralisation de la MO du sol

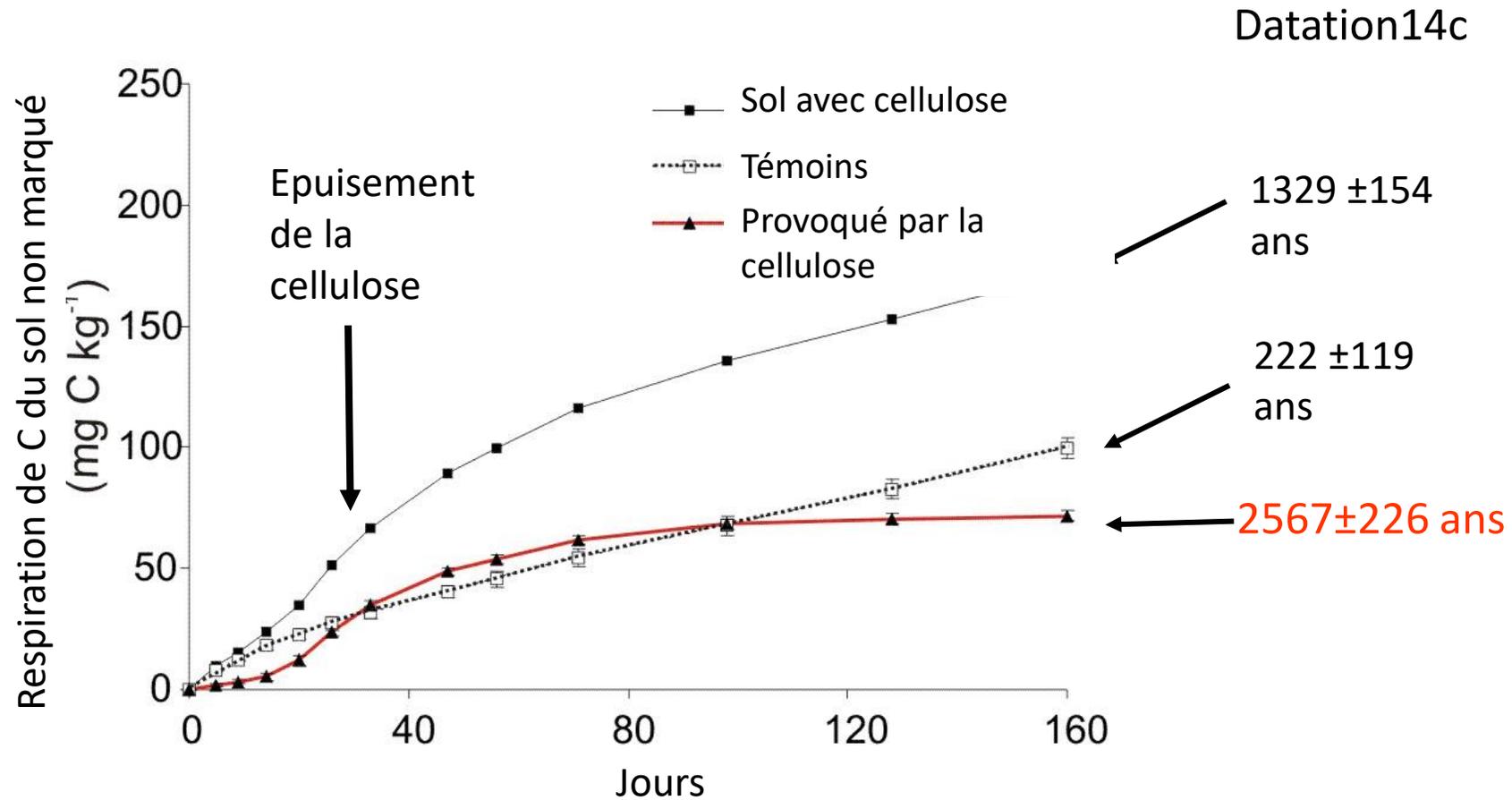
Age de la MO minéralisée

Expérience réalisée avec du sol de **profondeur** (et donc les organismes qui s'y trouvent)



3 repetitions, 161 jours d'incubation à 20 ° C

Résultats



L'apport de MO fraîche a permis de décomposer de la très vieille MO

→ L'apport de MO fraîche (cellulose) a stimulé la décomposition de la matière organique ancienne
Paradoxalement moins de MO après ajout de MO

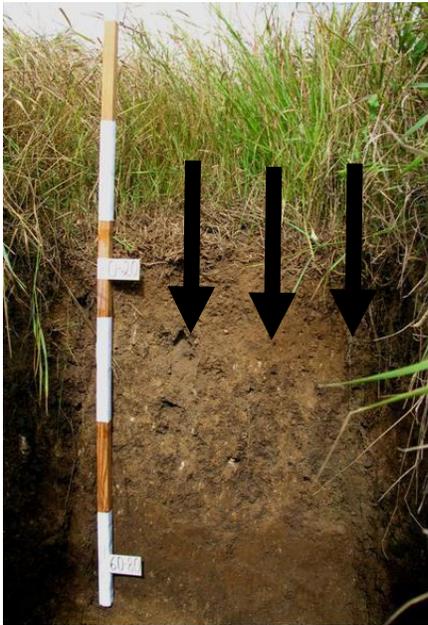
→ Mécanisme?

La plus part des microorganismes sont inactifs.
Les microbes ont besoin de MO fraîche riche en énergie pour décomposer la MO la plus récalcitrante

→ C'est un mécanisme apparemment très général
mis en évidence par ailleurs
Systèmes de culture avec apport de MO

=> Notion de priming effect

Une théorie probablement applicable à beaucoup de sols



- La matière organique fraîche vient toujours du haut (litière, racines, exsudats racinaires)
- Le priming effect a été mis en évidence dans beaucoup de sols différents (Kuzyakov 2000, Fontaine 2004 ...)

Remarque 2: 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*}

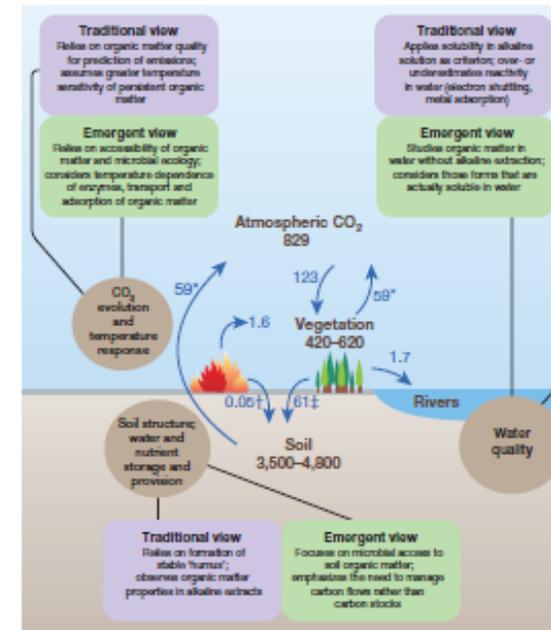


Figure 1 | Traditional and emergent views of the nature of soil organic matter affect how we predict and manage soil, air and water. Traditional 'humification' concepts limit observations of soil organic matter to its solubility in alkaline extracts, unlike the emergent view of organic matter based on 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 fluxes 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.

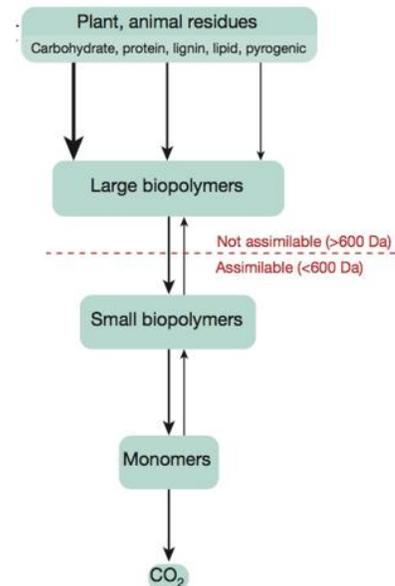
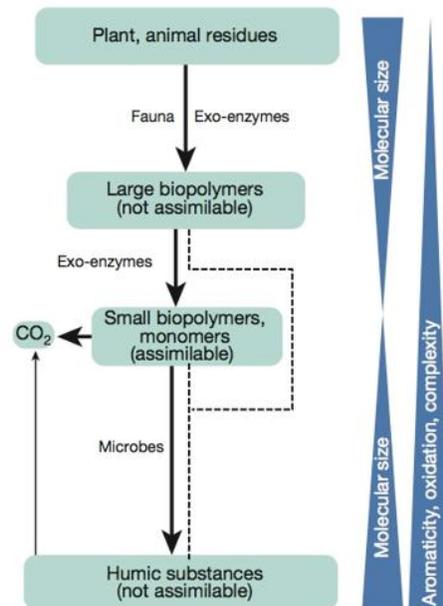
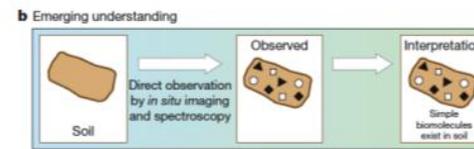
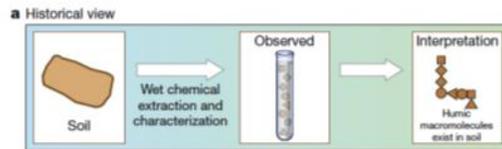
Donc deux visions différentes de l'humus

Vision moderne : molécules plus petites : complément 10

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

Vision traditionnelle : humification

Vision actuelle : continuum de dégradation



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

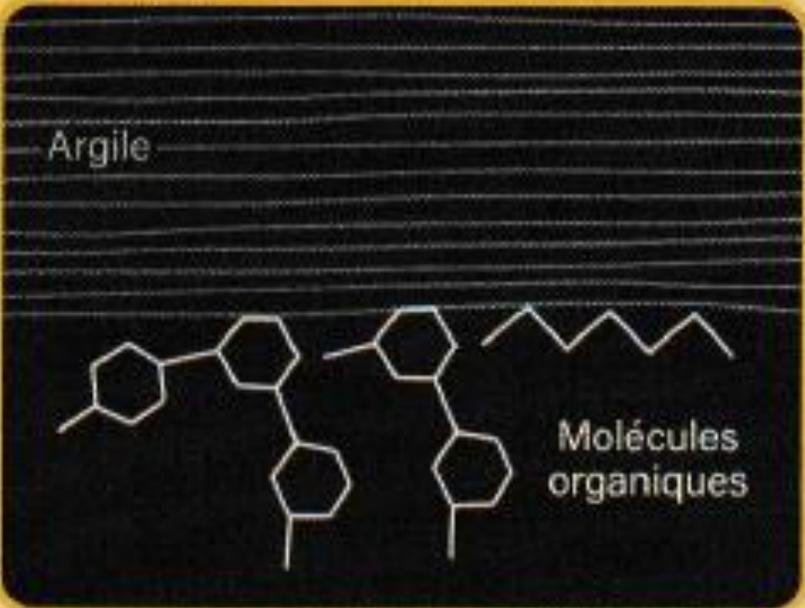


Temps moyens : décennies à quelques siècles



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).

Séance 3

1.4 Importance de la vie dans le sol

Organismes	Nombre approximatif par m ²	Biomasse moyenne (en kg.ha ⁻¹ pour 20 cm de sol)
Eubactéries	10 ¹³ à 10 ¹⁵	1500
Champignons*	n.d.	3500
Algues*	10 ⁸ à 10 ⁹	10 à 1000
Protozoaires*	10 ⁷ à 10 ¹¹	6 à 250
Nématodes	10 ⁶ à 30.10 ⁶	1 à 30
Vers de terre	50 à 400	20 à 400
Acariens	20.10 ³ à 400.10 ³	0,2 à 4
Collemboles	20.10 ³ à 400.10 ³	0,2 à 4
Larves d'insectes	Jusqu'à 500	Jusqu'à 4,5
Myriapodes	120 à 1100	1,5 à 22,5
Isopodes	Jusqu'à 1800	Jusqu'à 4

Abondance et biomasse des êtres vivants du sol. * Groupes polyphylétiques définis notamment par leur morphologie et leur métabolisme.

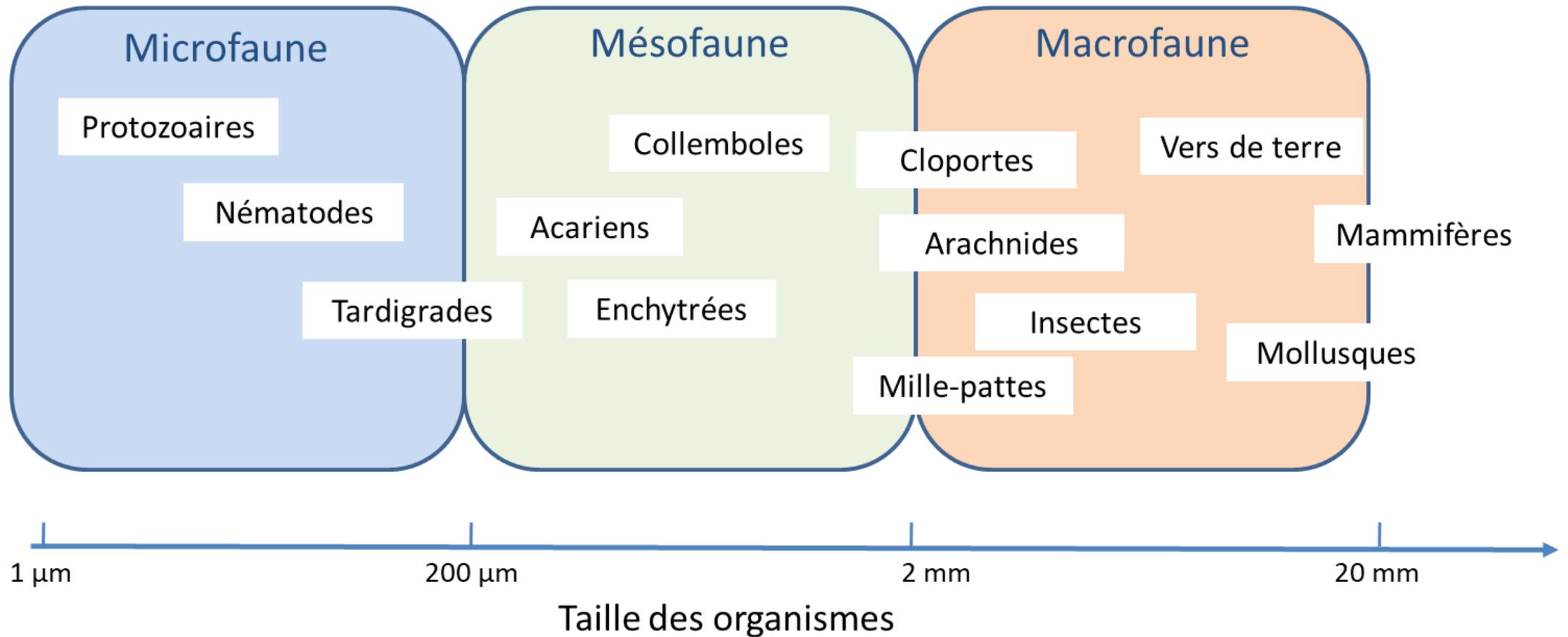
Classement / taille :

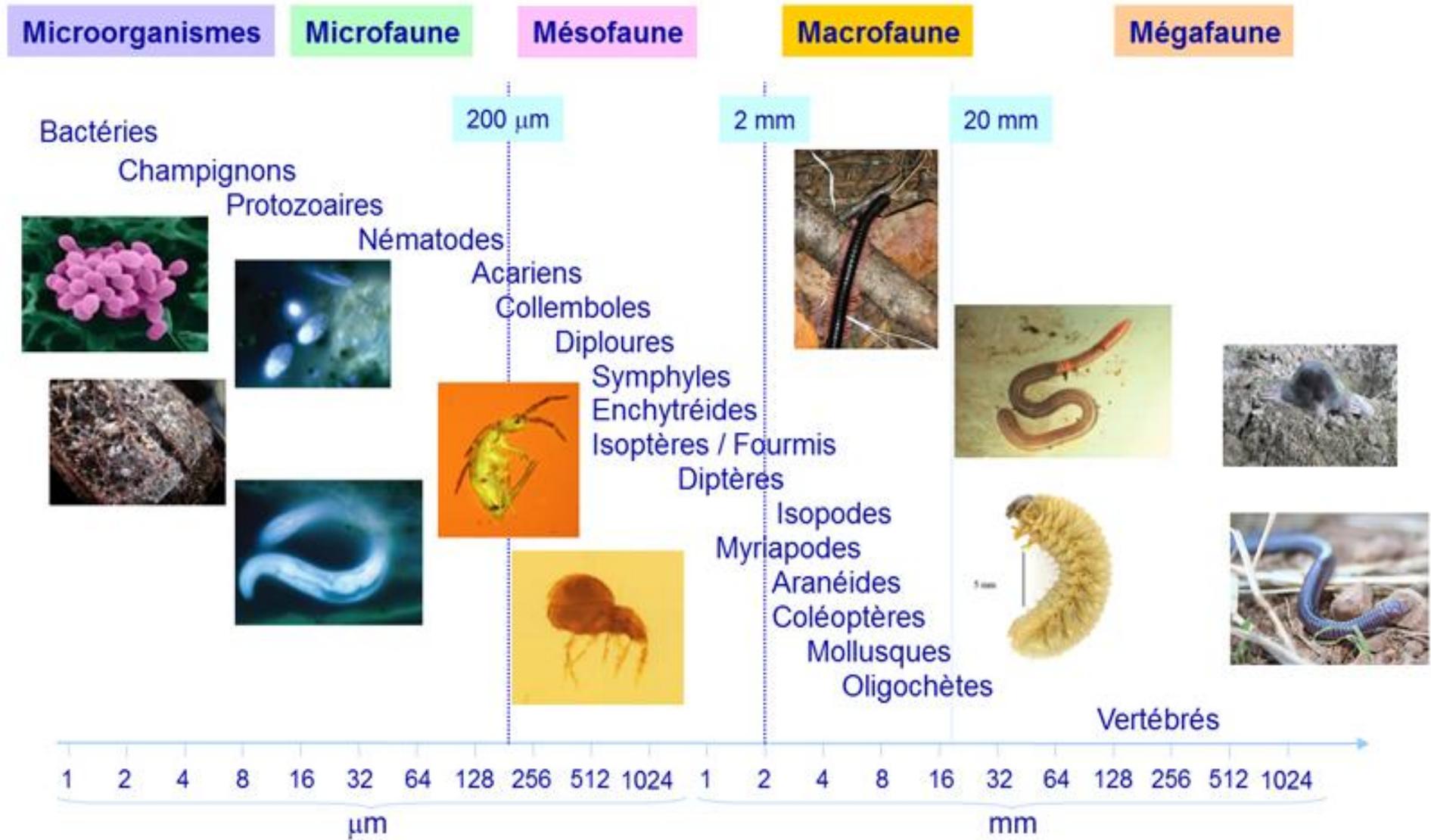
La faune du sol

Des organismes, de tailles et de formes variées vivent dans le sol



Figure 9

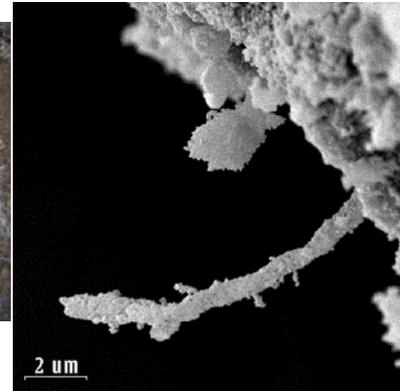
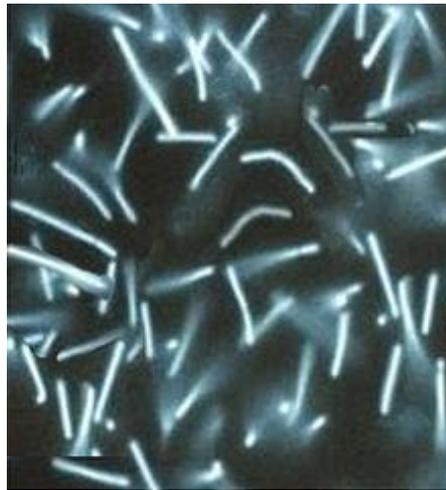
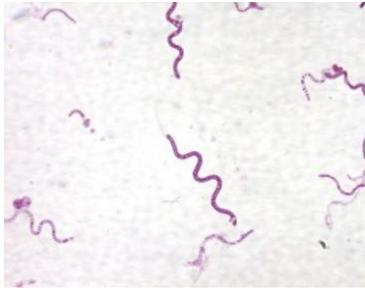




Classification des organismes du sol selon leur taille modifié d'après Swift et al. (1979)

Importance des êtres vivants du sol

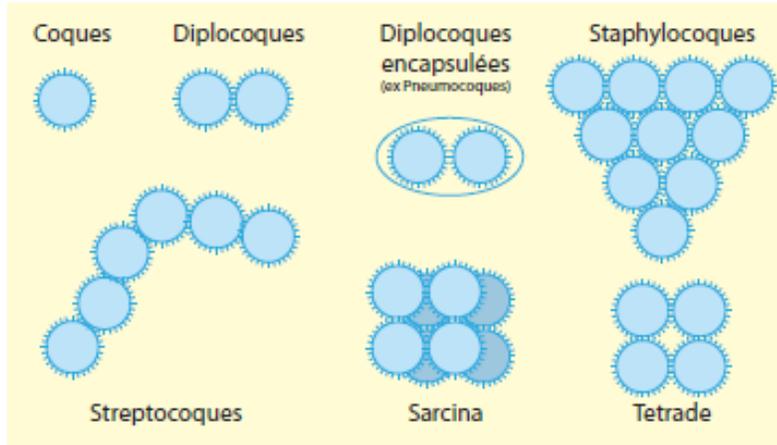
< 20 μm : microflore = bactéries (eubactéries et archées) et champignons.



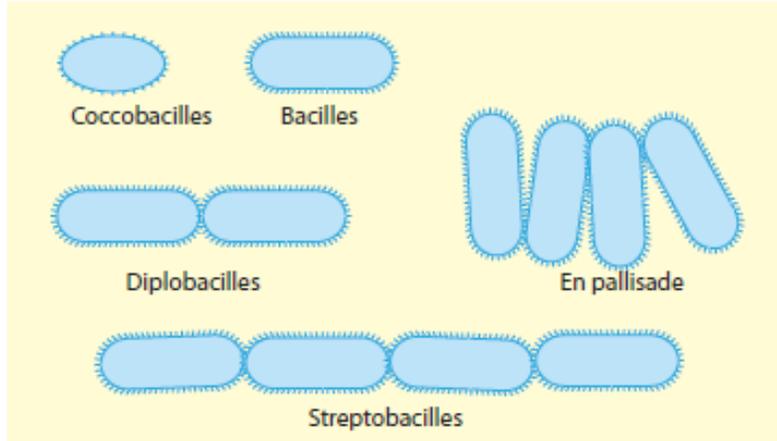
Diversité des procaryotes



Coques



Bacilles



Bactéries bourgeonnantes et/ou à pédoncules



Autres formes

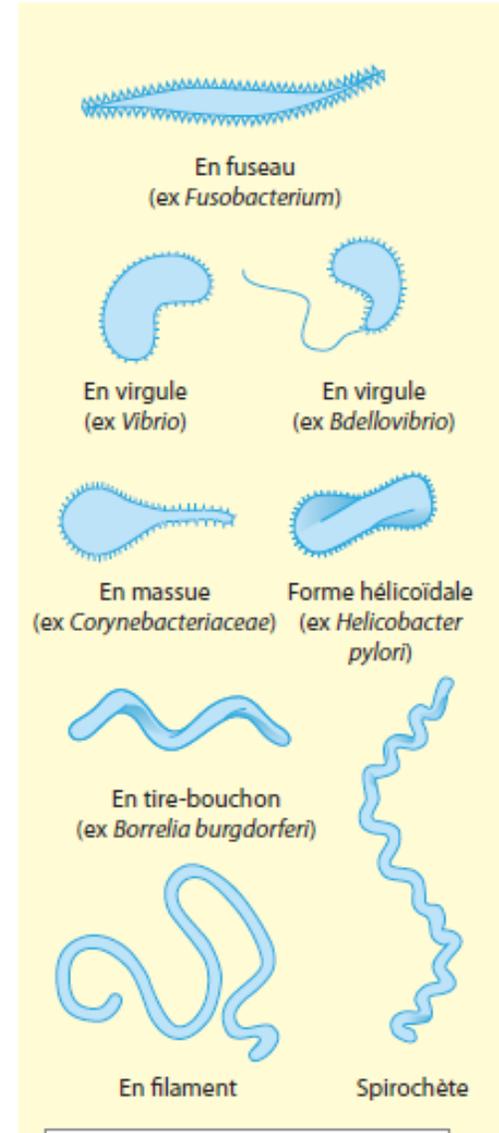


Fig. U1 : Les différentes formes de cellules procaryotiques observables au microscope. (MRV)

Importance des bactéries du sol

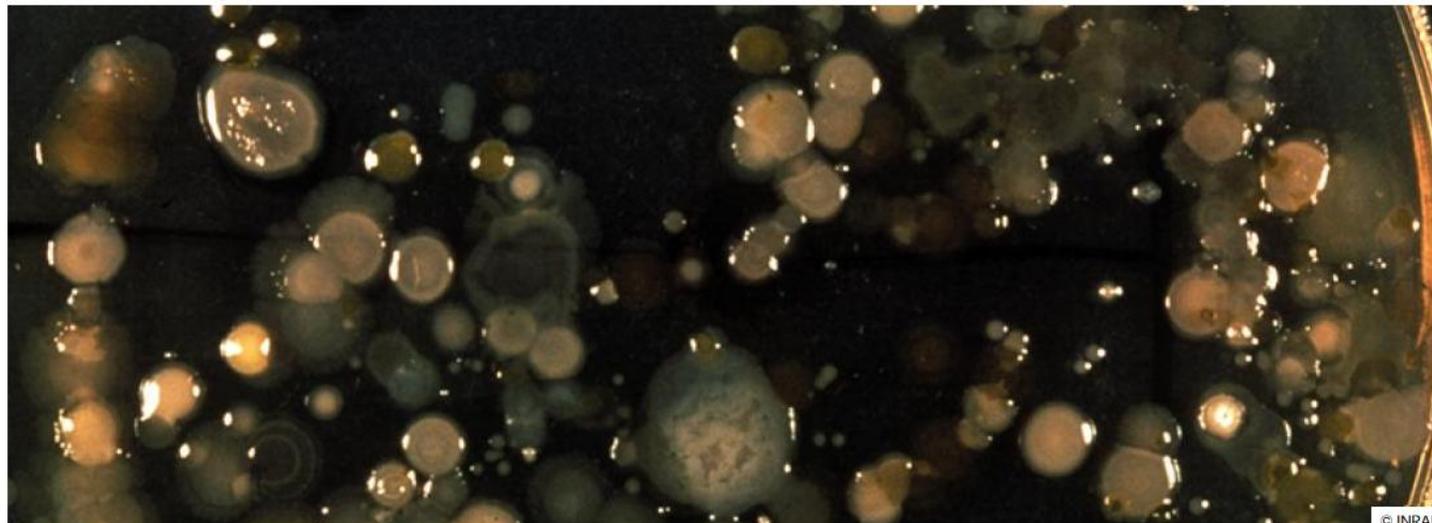
1 g de sol = un milliard de bactéries (nombre de cellules)



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

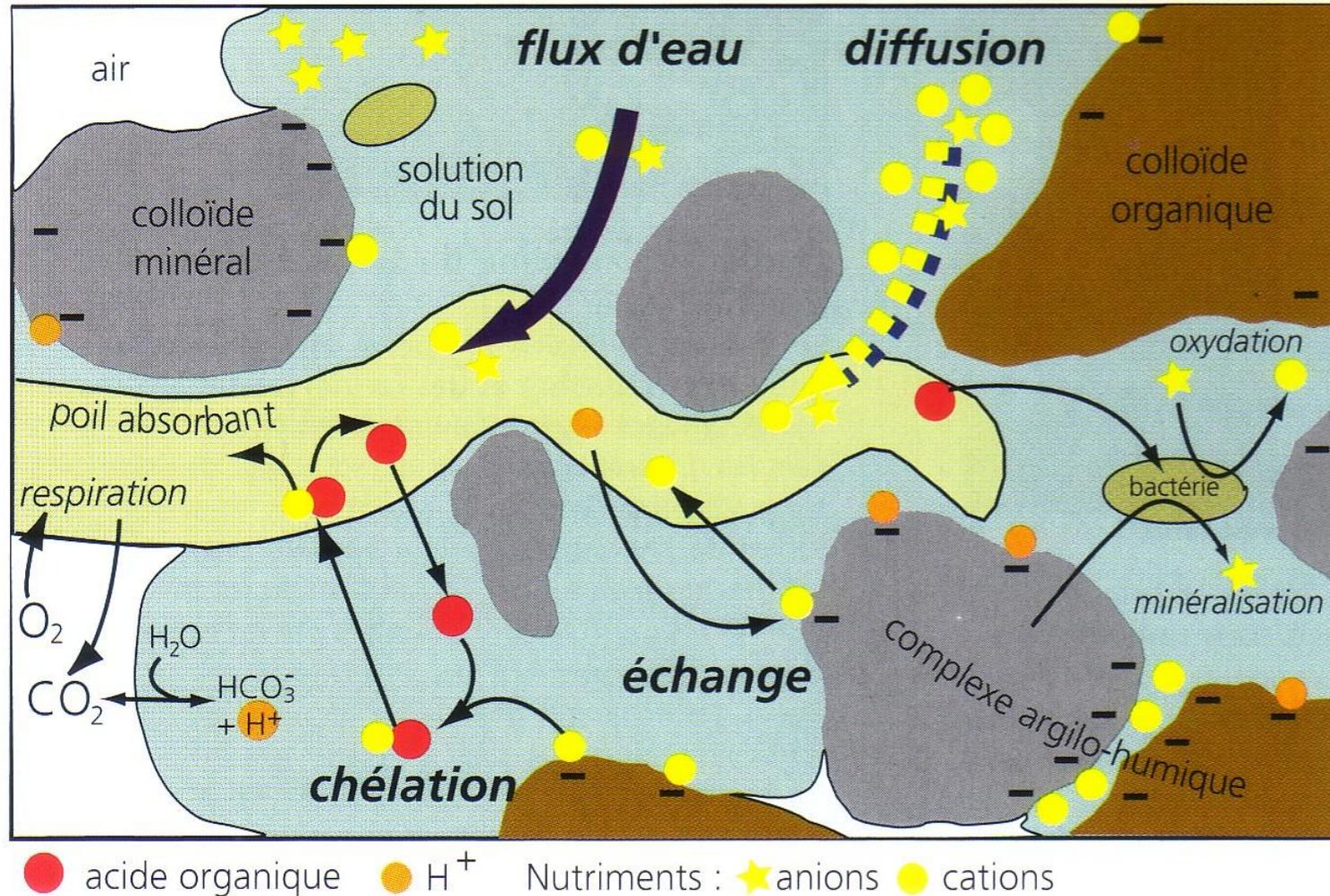


Figure 3-26: portion de rhizosphère montrant les constituants d'un sol et les échanges entre un poil absorbant et le sol

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,...*)

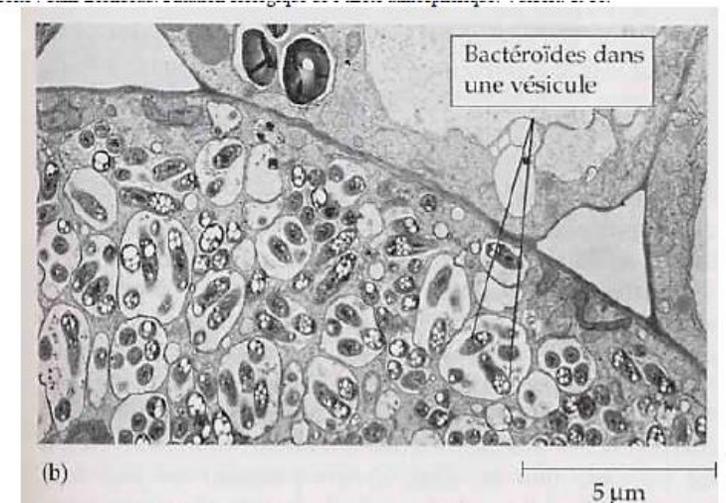
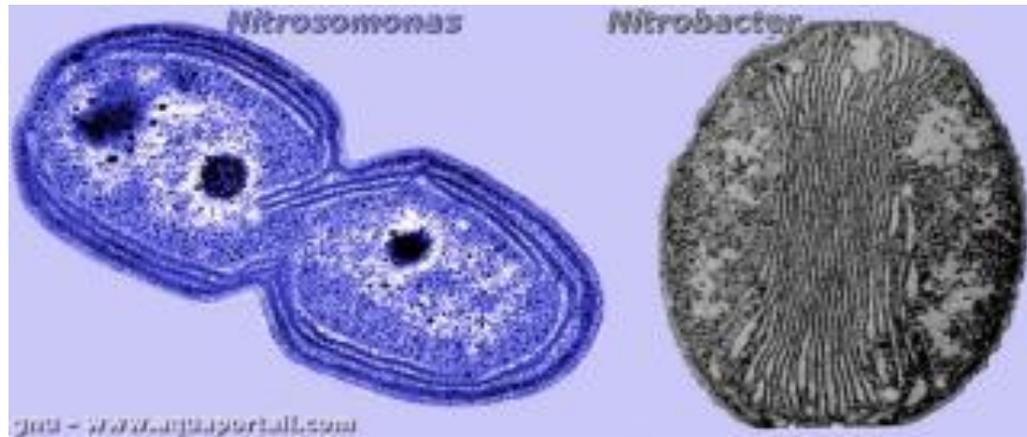
Pectinolytiques (*Pectobacterium...*)

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

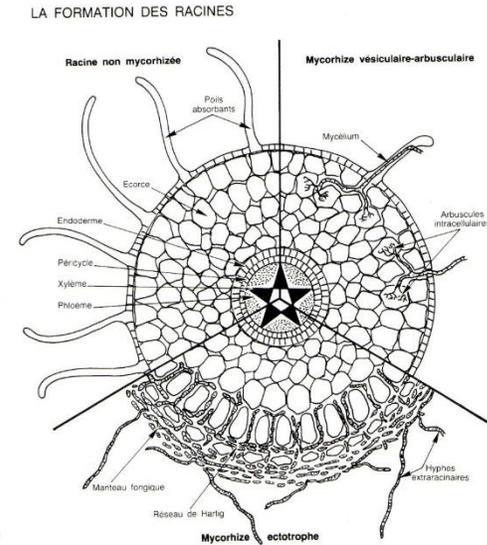


Importance des champignons

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).



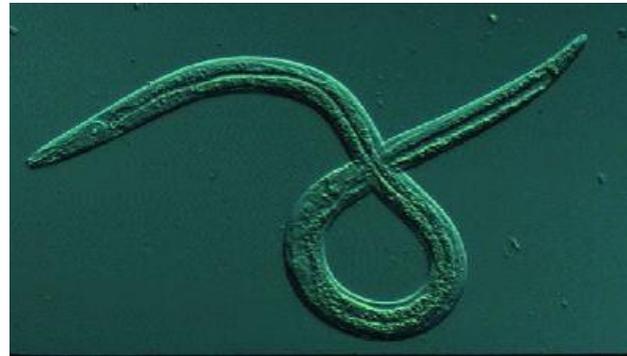
Champignons et décomposition du bois

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



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 débits 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

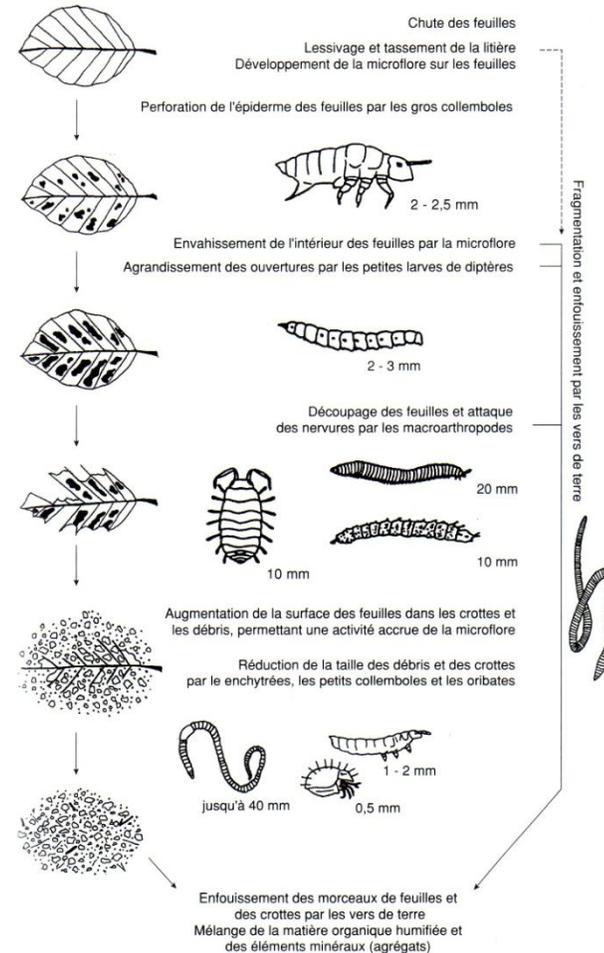


Fig. 5.6 Séquence de transformation d'une feuille morte de hêtre par les organismes décomposeurs.

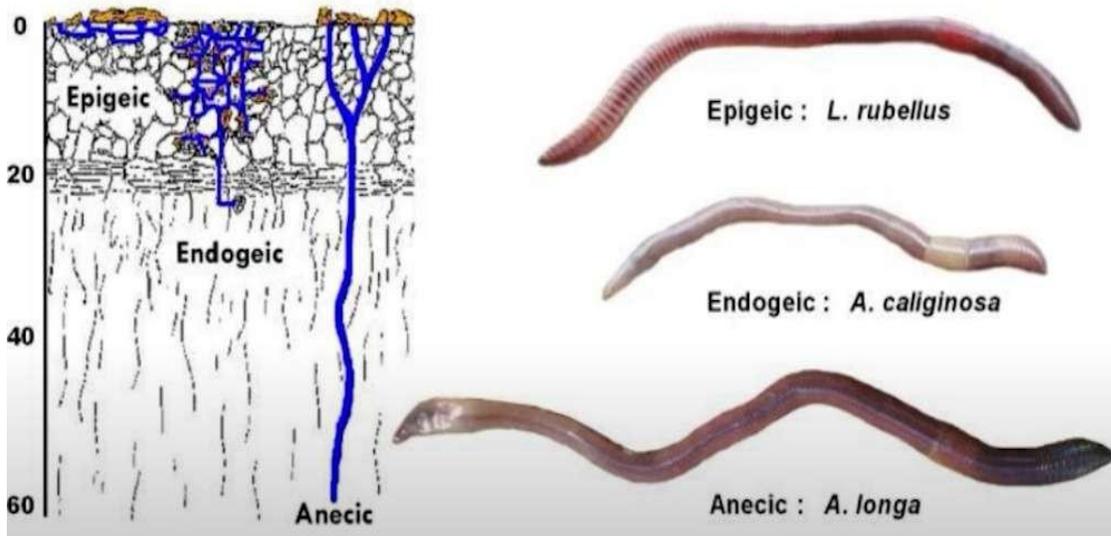
Importance des vers de terre

Brassage et aération du sol, bioturbation, turricules



Autre représentation

3 grandes catégories :



Les catégories écologiques

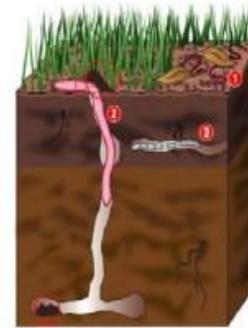
1 EPIGES

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



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

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 :

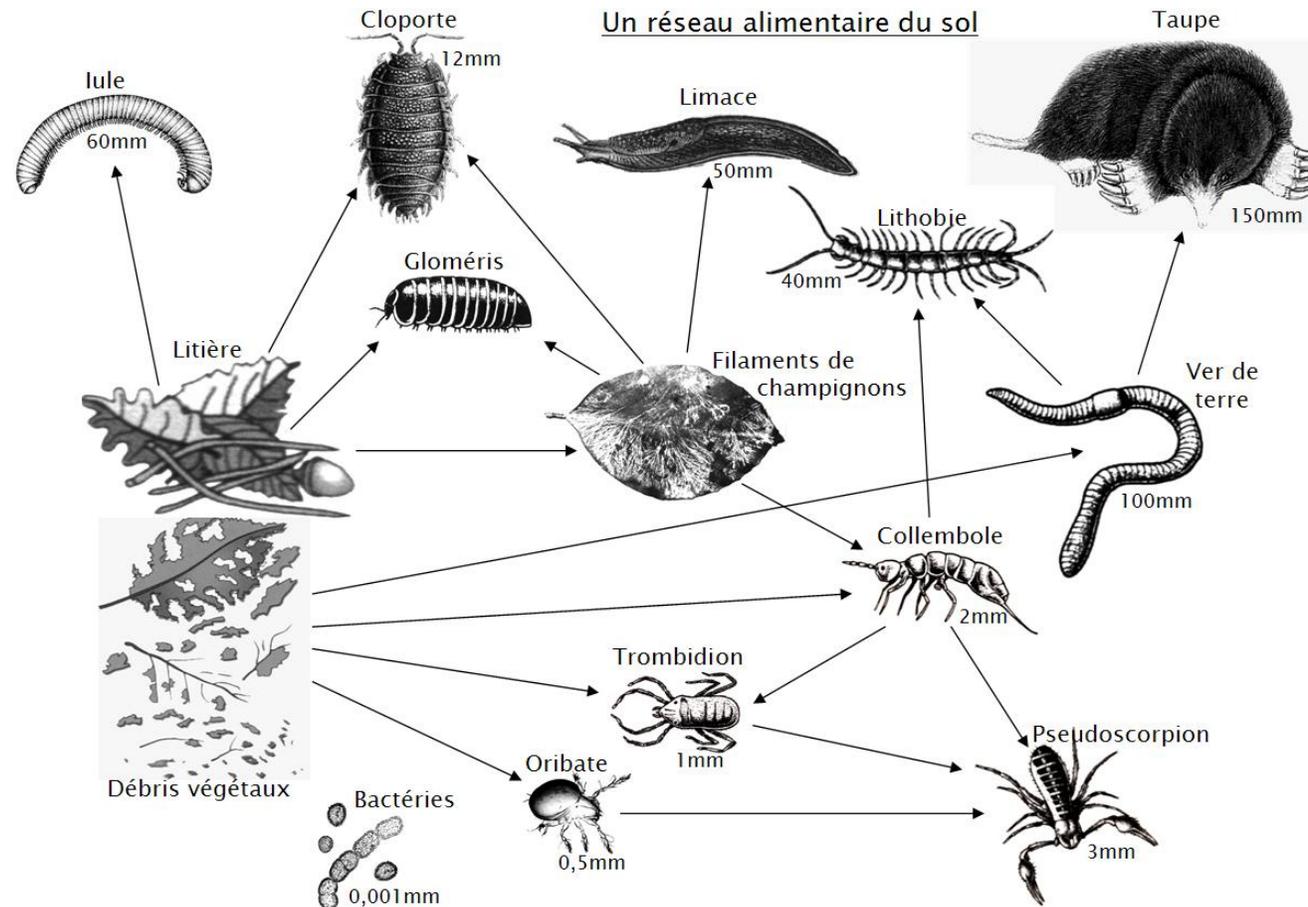
- Ils brassent et mélangent la matière organique et minérale

Quelques chiffres

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

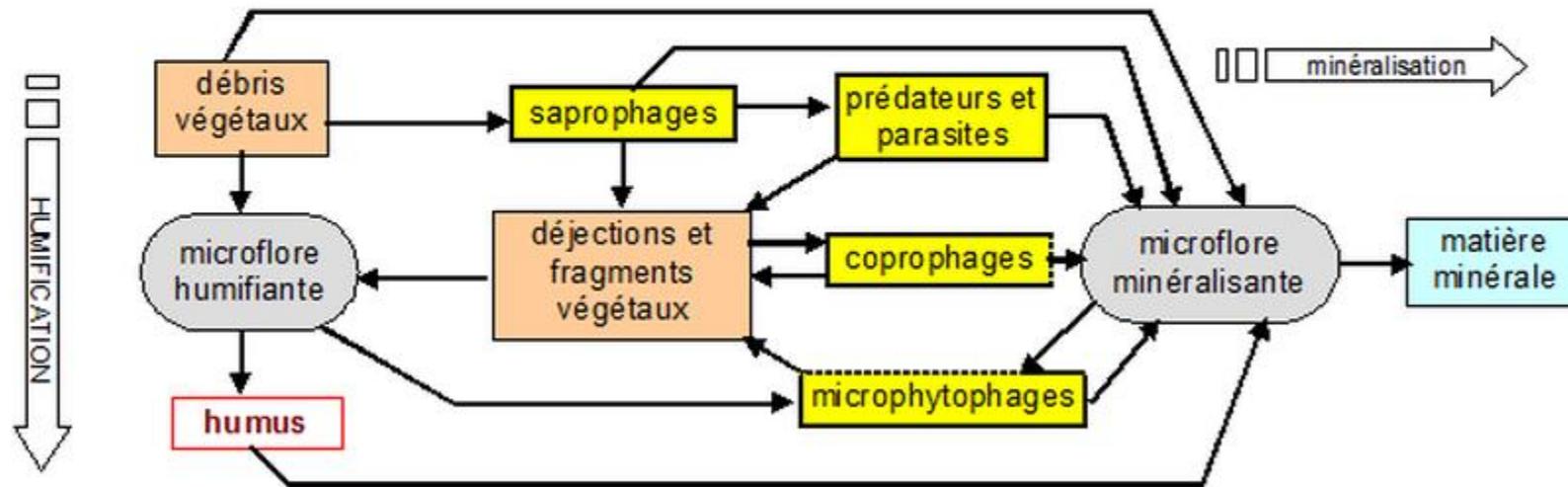
Vers de terre : jusqu'à 70 % de la biomasse animale endogée d'un écosystème terrestre

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

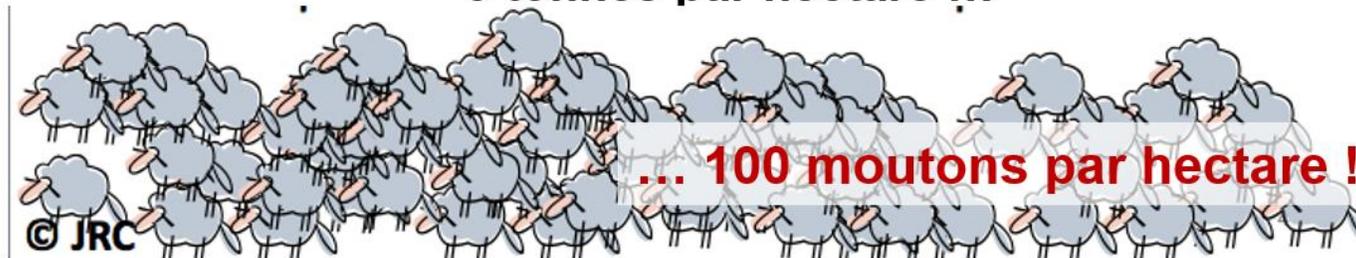
Combien d'individus ?

- 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 ...**

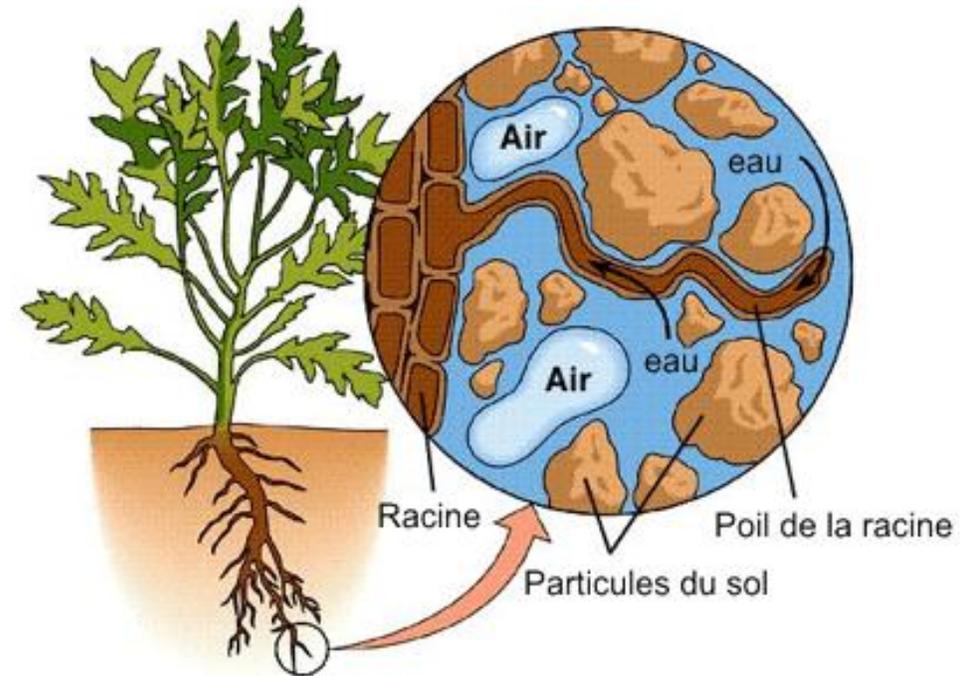
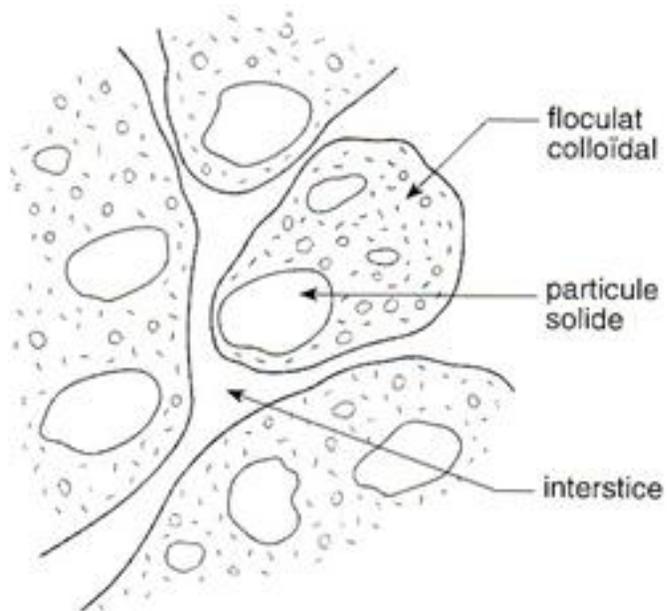


2 - Importance des phases fluides.

Phases fluides dans les interstices entre les agrégats :

- **Liquide** : solution du sol (eau + ions) Figure 10
- **Gazeuse** : air et autres gaz

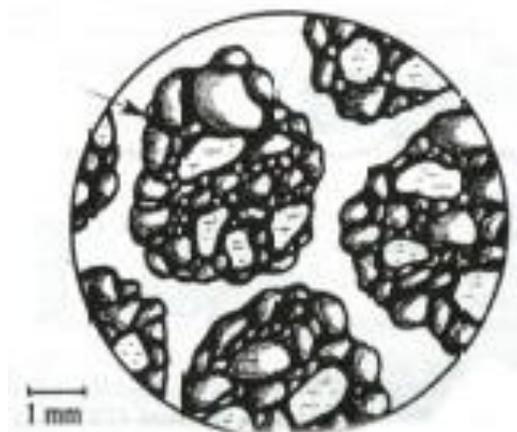
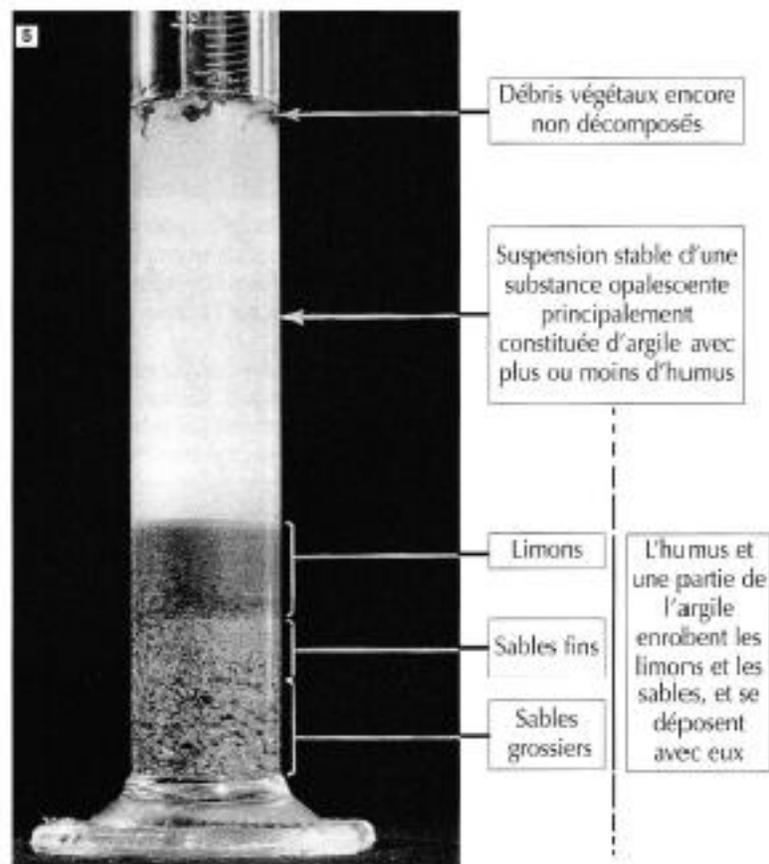
A



1. L'eau dans le sol

3 paramètres importants déterminent le régime hydrique d'un sol:

- Texture
- Structure
- Porosité



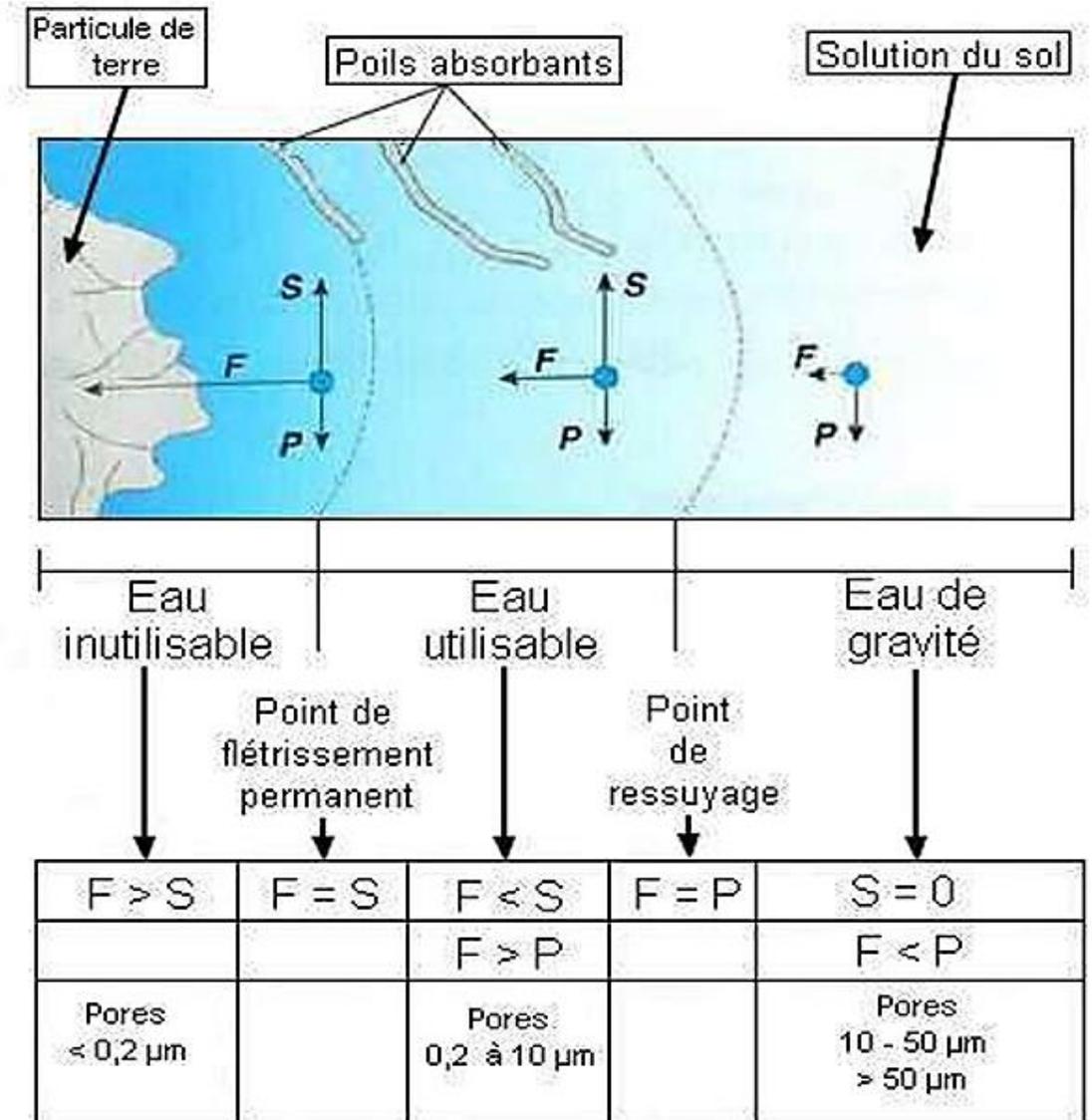
Complément 11 : forces de succion et de gravité

Forces s'exerçant sur l'eau du sol

P : pesanteur

F : force d'attraction par les solides

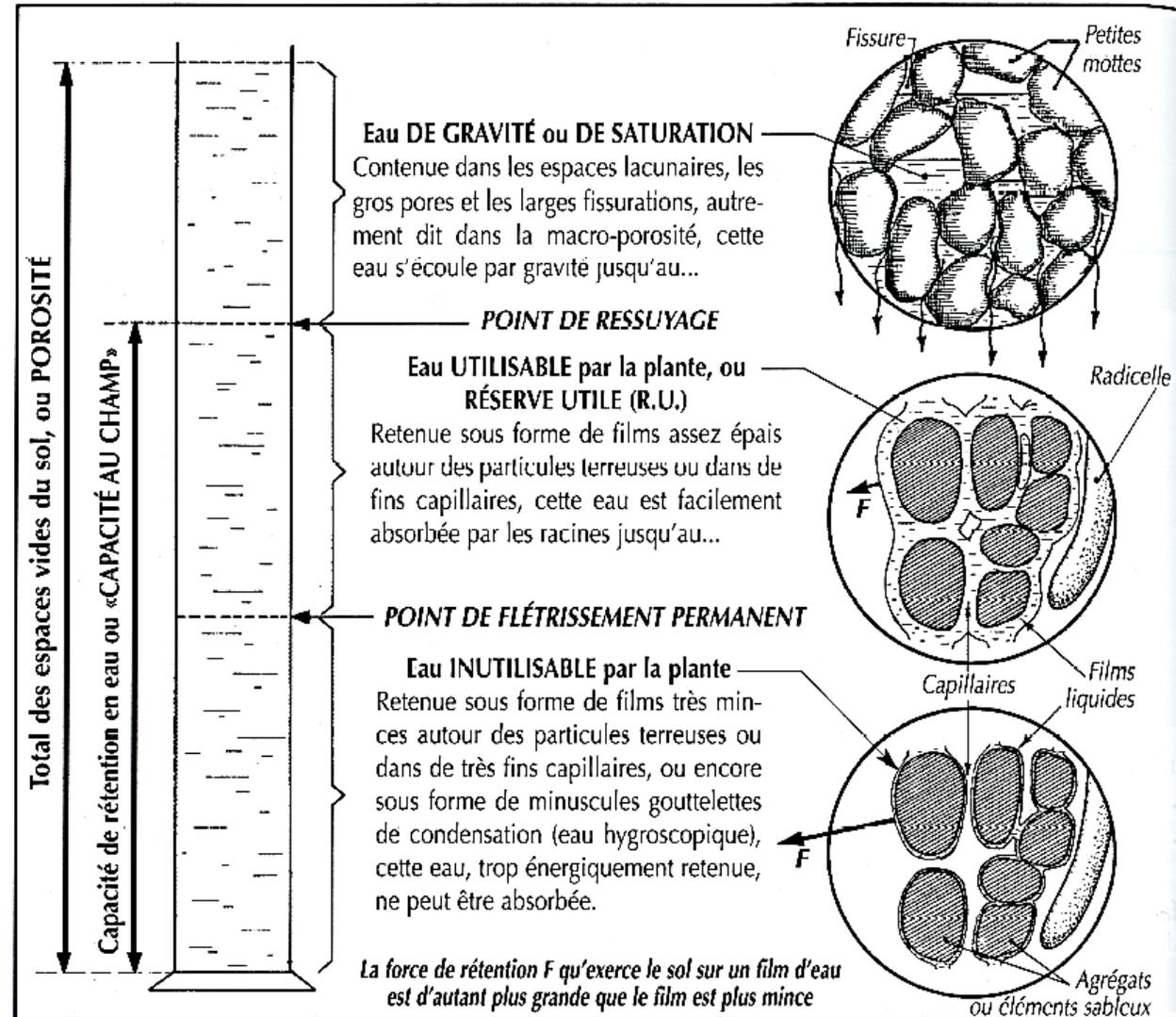
S : force de succion



Conséquence : trois états de l'eau dans le sol

3 états de l'eau
dans le sol :

Capacité au champ :
Quantité maximale
d'eau après départ
de l'eau de ressuyage



Importance du potentiel hydrique du sol

Plus le sol s'assèche, plus la force F est forte, ce qui diminue le potentiel hydrique du sol, et ce qui peut poser des problèmes pour les végétaux,

Attention, sur cette figure ce qui est appelé potentiel est en fait une force

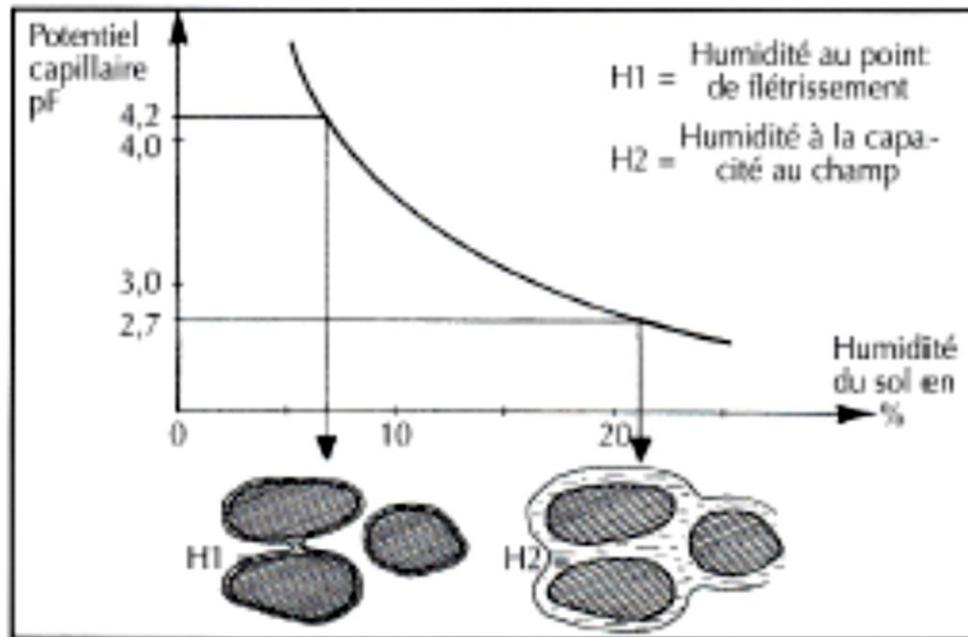


Figure 3-6 - VARIATION DU POTENTIEL CAPILLAIRE pF en fonction de l'humidité du sol

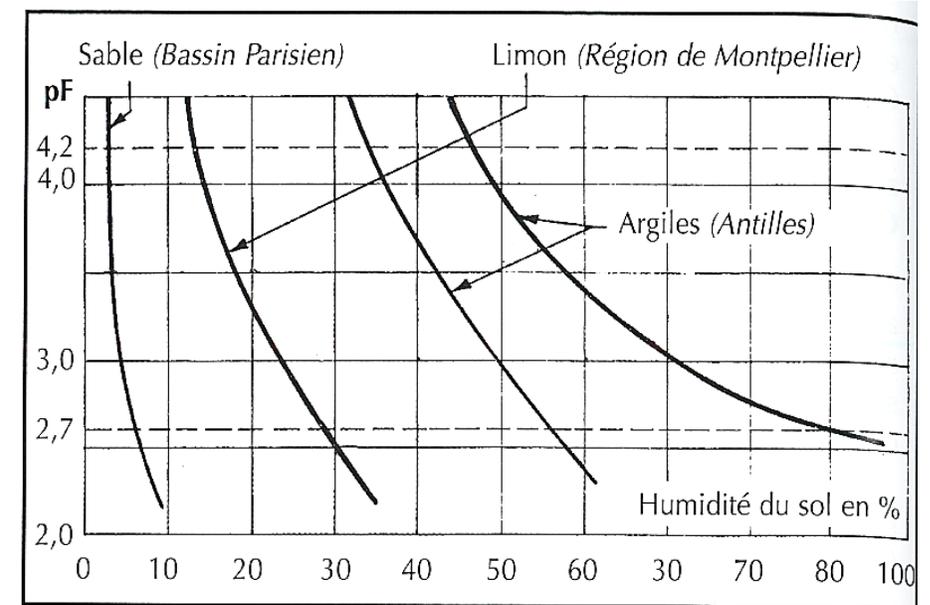
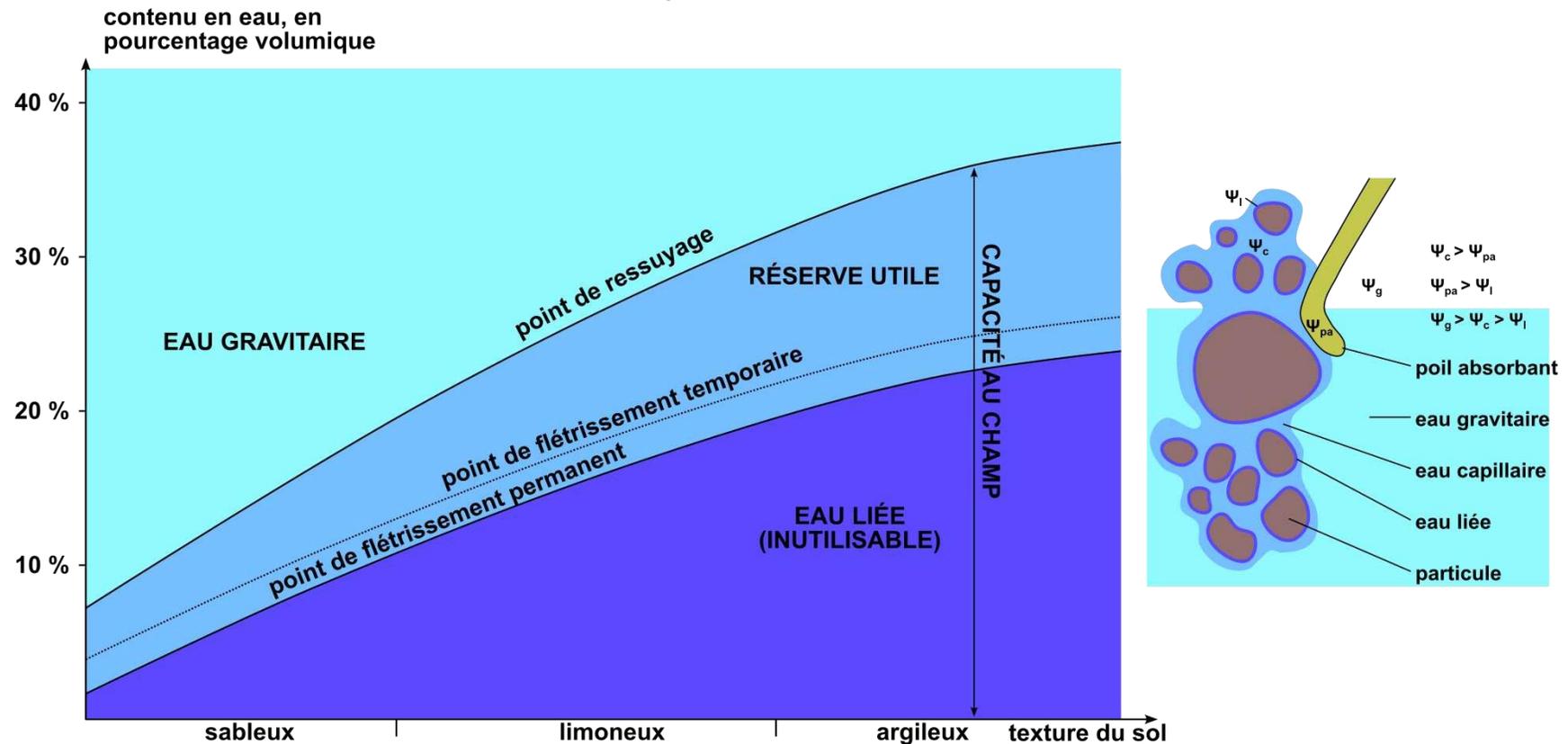


Figure 3-7 - COURBES DE VARIATION DU pF en fonction de l'humidité, pour différentes textures de sols
Plus le taux d'éléments fins augmente, plus l'humidité s'élève pour un même pF, donc plus le sol retient l'eau avec force

Capacité au champ et réserve utile en eau

Réserve utile = différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement permanent

La réserve utile d'un sol en eau dépend ainsi de sa **texture**



Remarque : Ψ_m n'est que l'une des composantes du potentiel hydrique du sol :

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_s + \Psi_p \text{ où}$$

Ψ_m est le potentiel matriciel déterminé par pF

Ψ_g le potentiel gravitaire

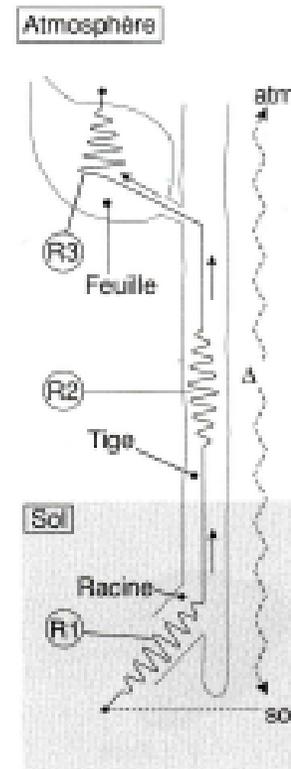
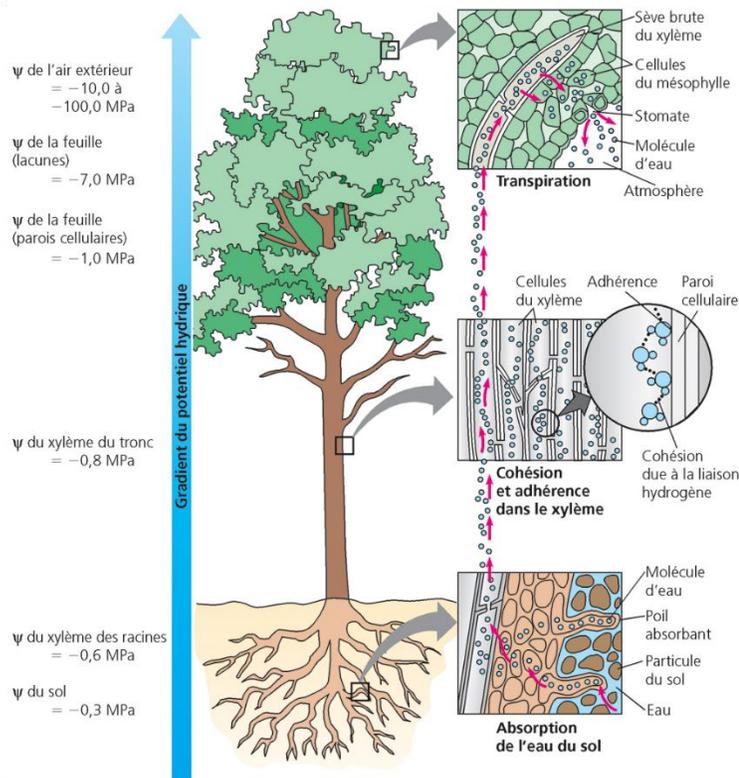
Ψ_s le potentiel lié aux solutés (Ψ_s est l'inverse de la pression osmotique)

Ψ_p le potentiel hydrostatique (uniquement dans le cas des cellules avec une paroi ou une matrice extracellulaire)

Plus le sol se dessèche, plus la force de succion augmente et le potentiel matriciel, donc le potentiel hydrique du sol, diminue.

Intérêt : réserve utilise = eau utilisable par la plante

Rappel sup et SV : continuum sol / plante / atmosphère



Point de flétrissement variables suivant les organismes

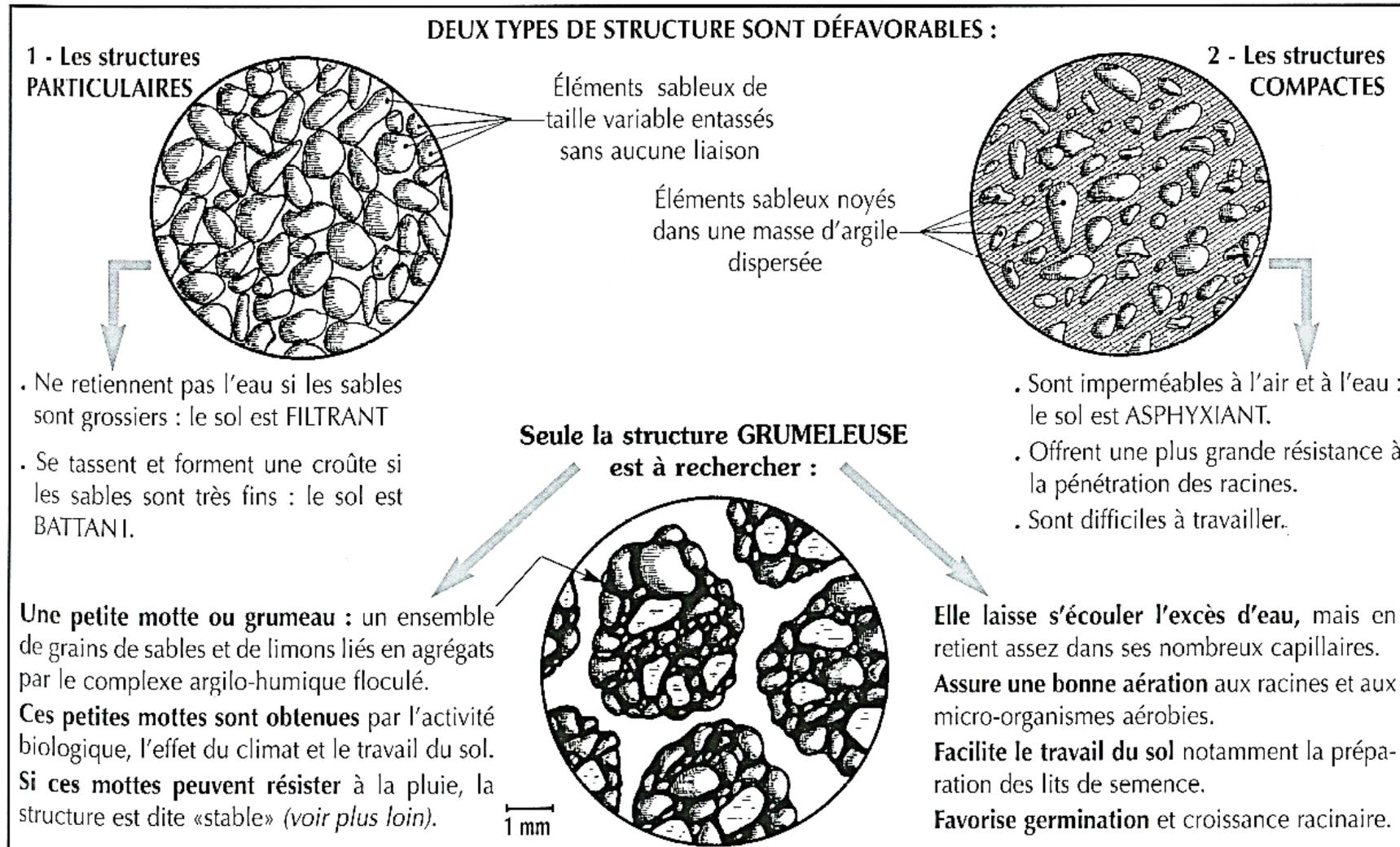
Relation avec cours SV : différentes adaptations de végétaux se traduisant par un point de flétrissement permanent variable

Relation avec TP Sol 1 : modélisation avec l'éponge

Tableau 3.9 Point de flétrissement permanent de quelques espèces.

Groupe écologique	Espèces	Pt de flétrissement permanent (MPa)
Espèces aquatiques	<i>Nymphaea alba</i>	- 0,7
	<i>Nuphar luteum</i>	- 1,1
Espèces mésophiles	<i>Anemone nemorosa</i>	- 1,5
	<i>Achillea millefolium</i>	- 1,5
	<i>Lolium perenne</i>	- 1,9
Espèces mésoxérophiles	<i>Vitis vinifera</i>	- 1,9
	<i>Picea abies</i>	- 2,2
	<i>Prunella grandiflora</i>	- 2,3
Espèces xérophiles	<i>Buxus sempervirens</i>	- 3,4
	<i>Quercus coccifera</i>	- 4,4
	<i>Hippocrepis comosa</i>	- 5,6
	<i>Potentilla arenaria</i>	- 8,1
	<i>Aster linosyris</i>	- 10,2
	<i>Artemisia herba-alba</i>	- 16,3
Champignons	Moisissures de la confiture	- 10,0

La réserve utile en eau d'un sol dépend aussi de sa structure

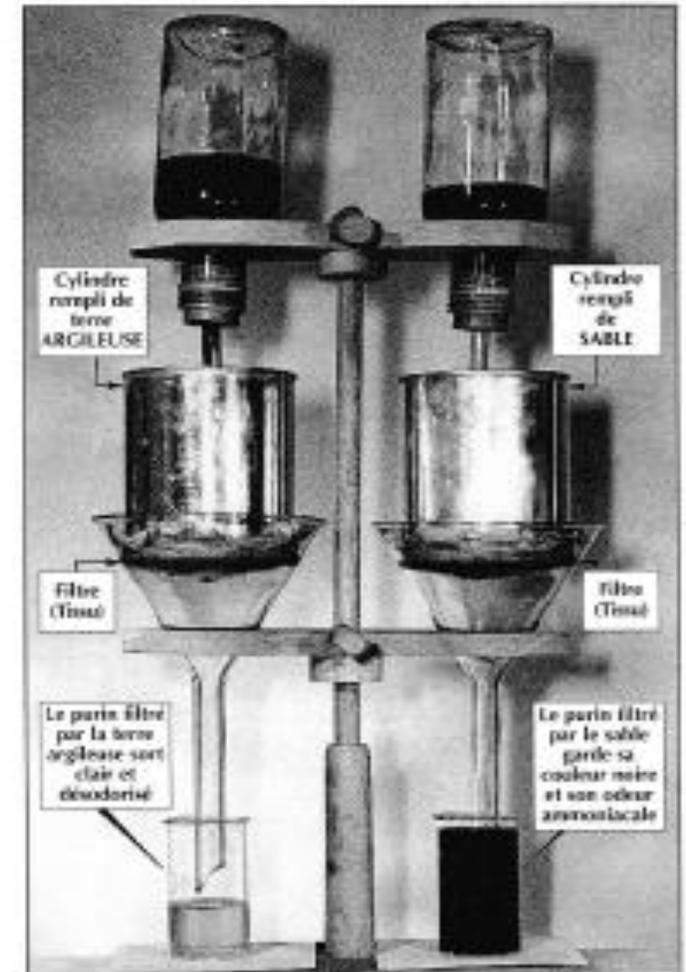


2. Complexe argilo-humique et capacité d'échanges cationiques (CEC)

Expérience historique de Way (1850)

Du purin riche en ammonium est versé soit dans une terre argileuse soit dans du sable : il garde sa couleur après passage dans le sable mais pas après passage dans l'argile.

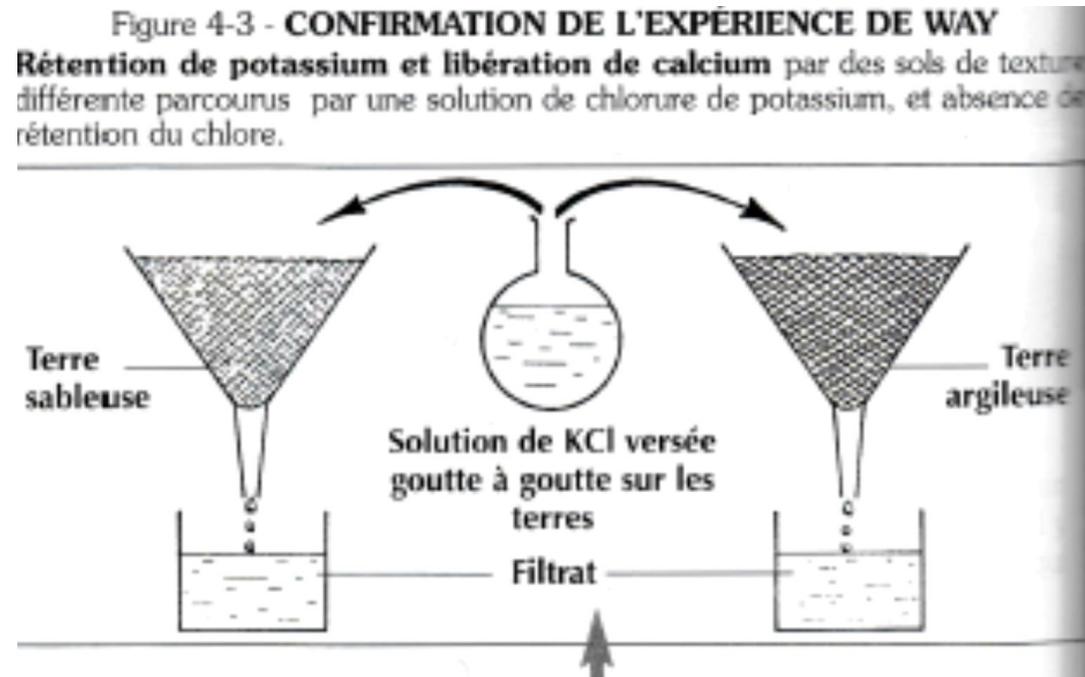
Figure 4-2 - L'EXPÉRIENCE DE WAY :
Décoloration du purin par passage sur une terre argileuse, et comparaison avec une terre très sableuse.



Expérience complémentaire avec KCl :

Les ions Cl^- ne sont jamais retenus

Les ions K^+ sont retenus par la terre argileuse mais pas par le sable.



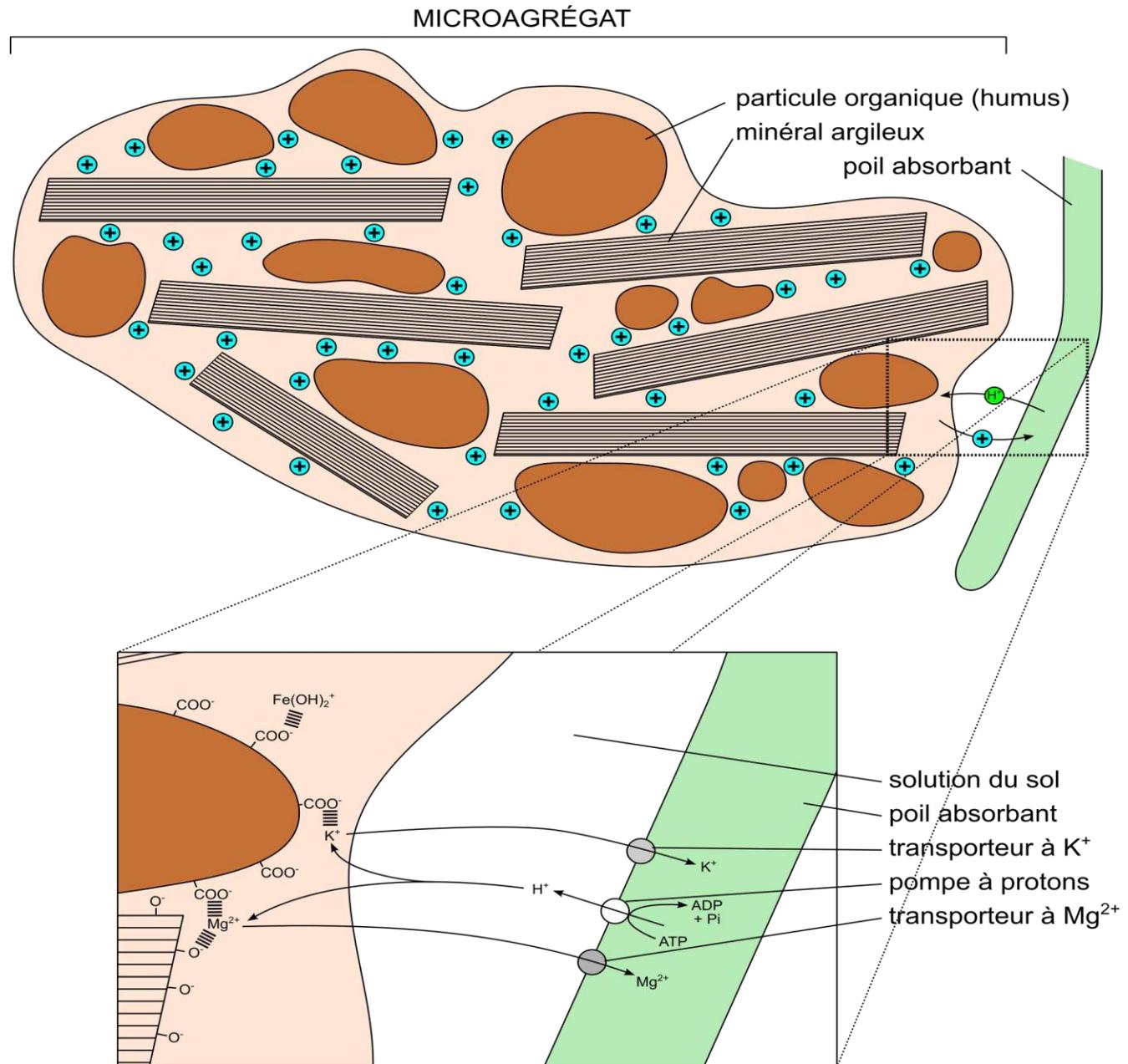
Lien avec TP

Expérience éosine / bleu de méthylène

Observations :

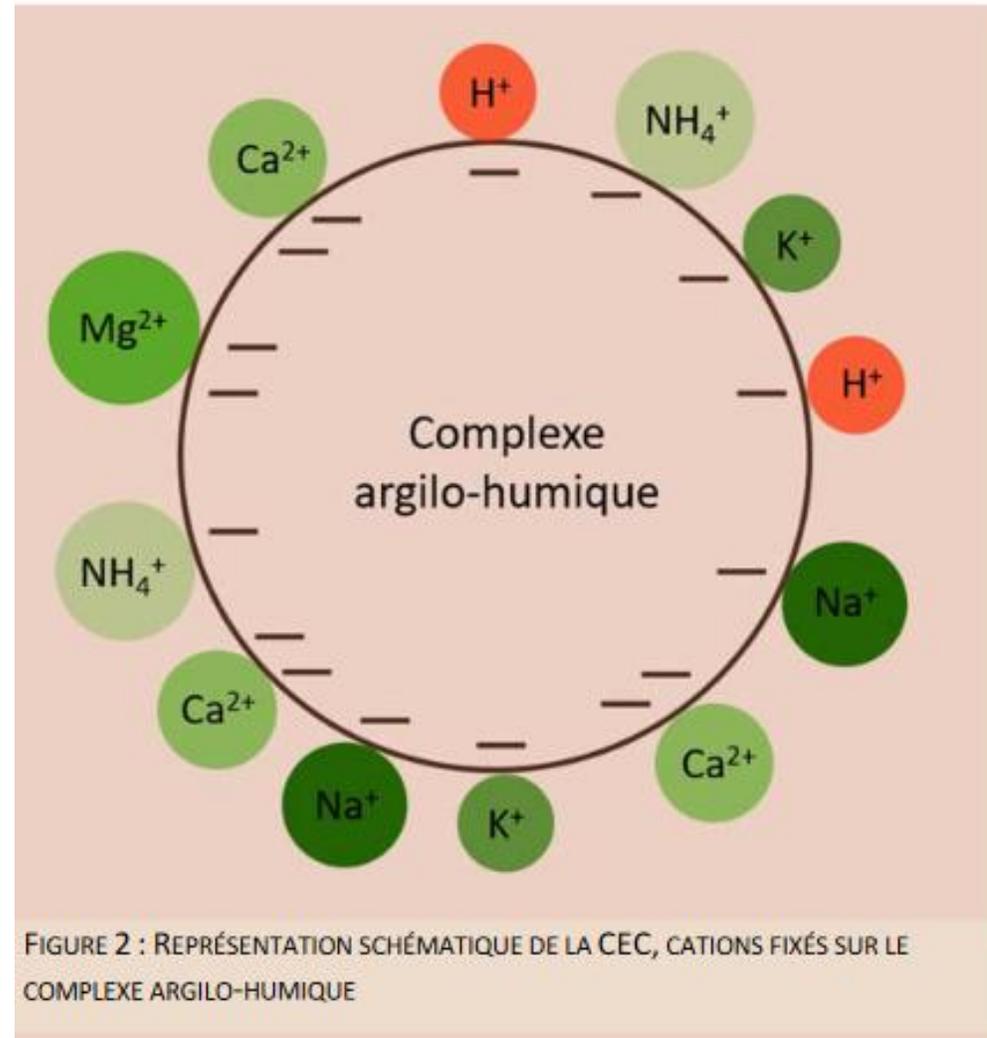


Complexe argilo
humique chargé
négativement

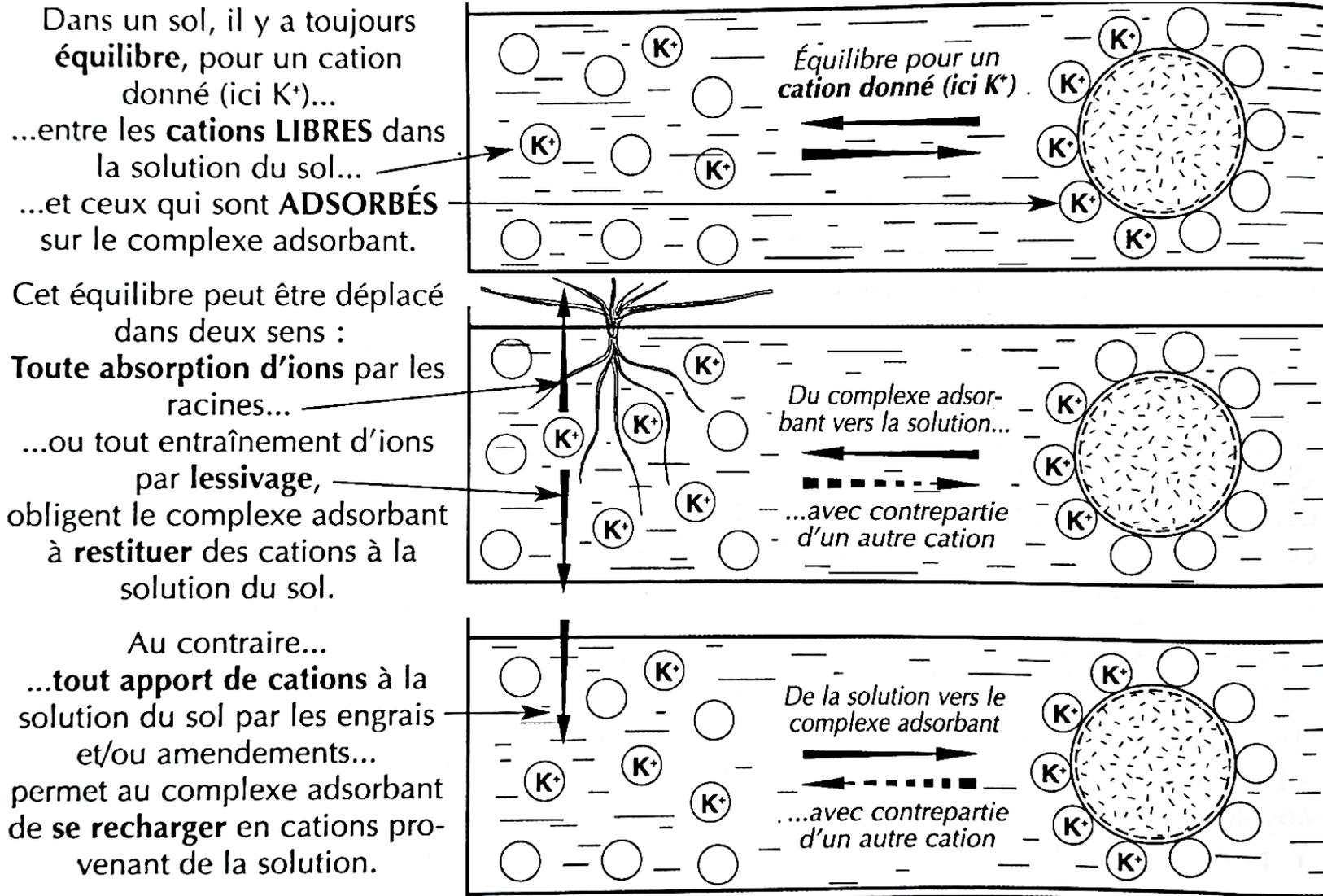


Adsorption sur les complexes argilo-humiques

Rappel TP



CEC : Capacité d'échange cationique



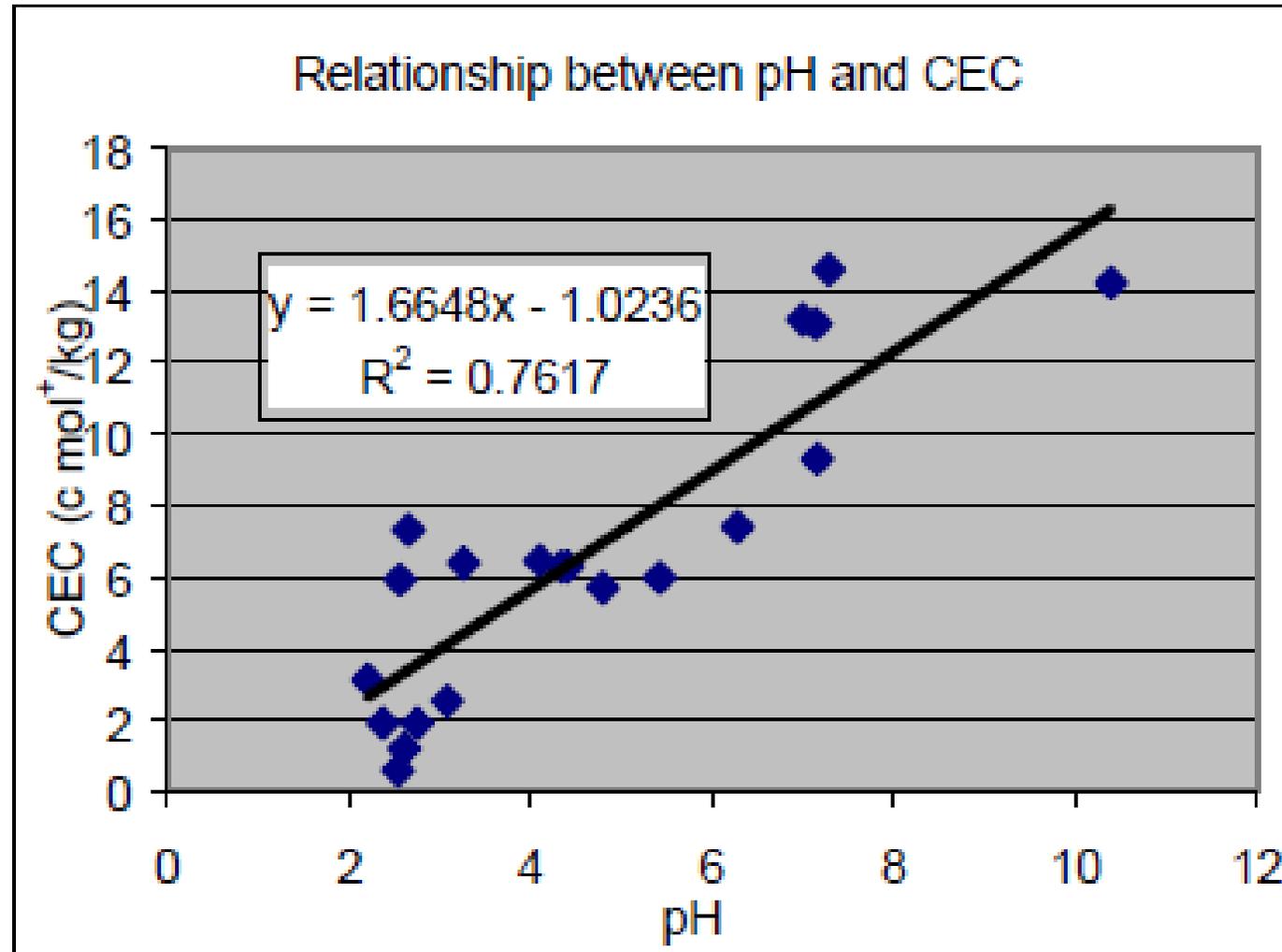


Figure 13: Relationship between pH and CEC

Importance de la CEC

CEC variable suivant le type de sol

Tableau 3.20 Pouvoir de fixation cationique de constituants et d'horizons du sol (diverses sources).

Constituant ou type d'horizon	CEC (cmol ⁺ /kg)
<i>Minéraux</i>	
Argile 1/1 - kaolinite	2- 15
Argile 2/1 - illite	10- 50
Argile 2/1 - montmorillonite	80- 150
Argile 2/1 - vermiculite	100- 150
Argile 2/1/1 - chlorite	5- 40
Allophanes (oxyhydroxydes)	5- 350
<i>Matières organiques</i>	
Matière organique peu humifiée, tourbe	100
Matière organique globale du sol <i>in situ</i>	60- 280
Matière organique humifiée pure	200- 500
Acides humiques purs	485- 870
Acides fulviques purs	—> 1 400
<i>Horizons pédologiques (choix)</i>	
Sols sableux, horizons C	1- 5
PODZOSOL sur sable, horizon E	12
ALOCRISSOL sur limon d'altération, horizon Sal	18
RENDISOL sur lœss, horizon Aca	28
Sols argileux-humifères, horizons A	60- 80

3. Les échanges sol / hydrosphère

Circulation de l'eau dans le sol :

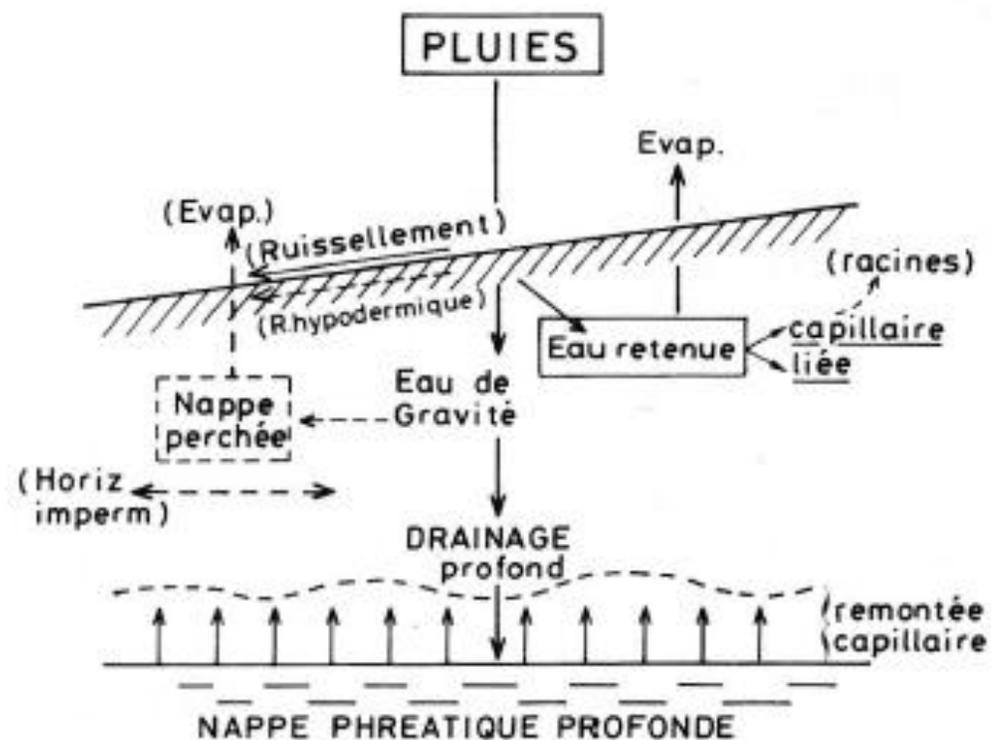


FIG. 21 – Répartition des eaux de précipitation dans le sol.

Risque de pollution des sols

Apports par l'eau externe



Importance de la perméabilité (complément 12)

Les mouvements d'eau dans le sol : importance de la perméabilité

Lien physique : perméabilité à mesurer en régime constant

En pédologie : mesure en cm par h, en physique, on rajoute la viscosité

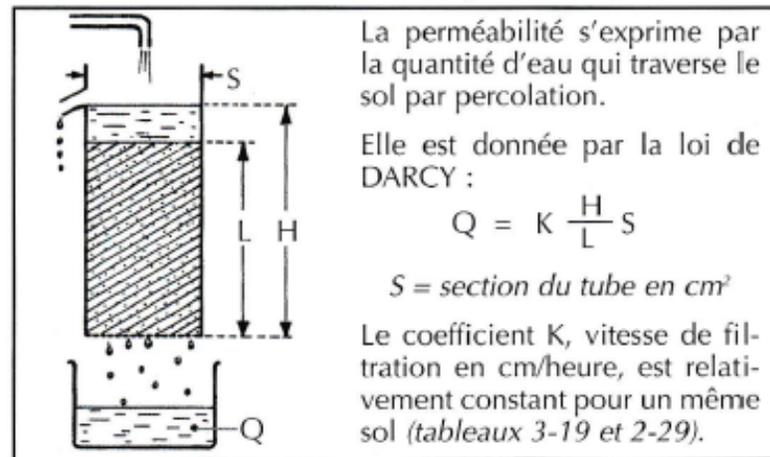


Figure 3-18 - MESURE DE LA PERMÉABILITÉ AU LABORATOIRE

Variation de la perméabilité suivant le type de sol

De faible à forte

Tableau 3-19 - **VALEUR DE K POUR DIFFÉRENTS SOLS** (lorsque $H = L$)
(D'après Duchaufour, *Pédologie* - Masson - 1970) (Voir aussi la figure 2-28-II)

Sols imperméables.....	- de 0,4 cm/heure
Sols peu perméables.....	de 0,4 à 2cm/heure
Sols perméables.....	2cm/heure
Sols très perméables.....	+ de 20 cm/heure

Tableau 3-20 - **PERMÉABILITÉ DE QUELQUES SOLS** en cm/heure
(D'après Müntz cité par Hénin - «Le Profil Cultural» - Masson - 1970)

Boulbène imperméable.....	0,05 à 0,1 cm/heure
Limon argileux peu perméable.....	0,6 cm/heure
Alluvion assez perméable.....	2 cm/heure
Alluvion perméable.....	3 à 12 cm/heure
Terre sableuse très perméable.....	+ de 20 cm/heure

Lixiviation : entrainement par l'eau de substances solubles

Surtout pour les nitrates : dépend des pratiques agricoles

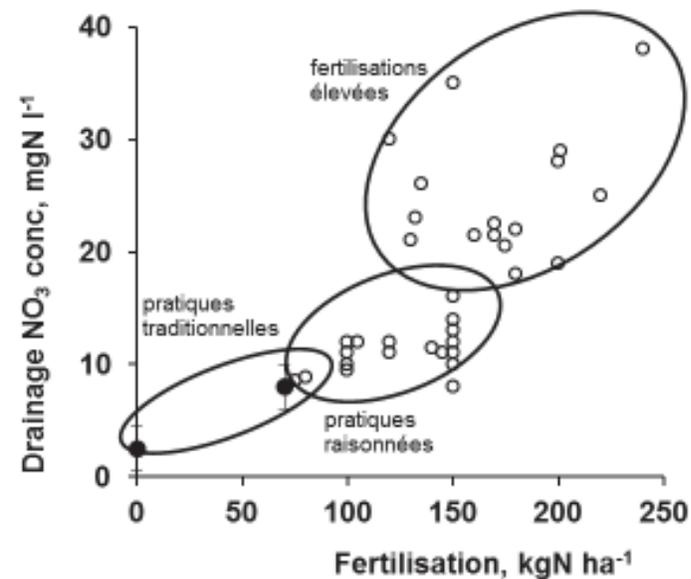
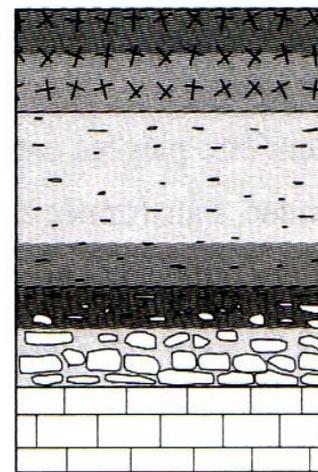
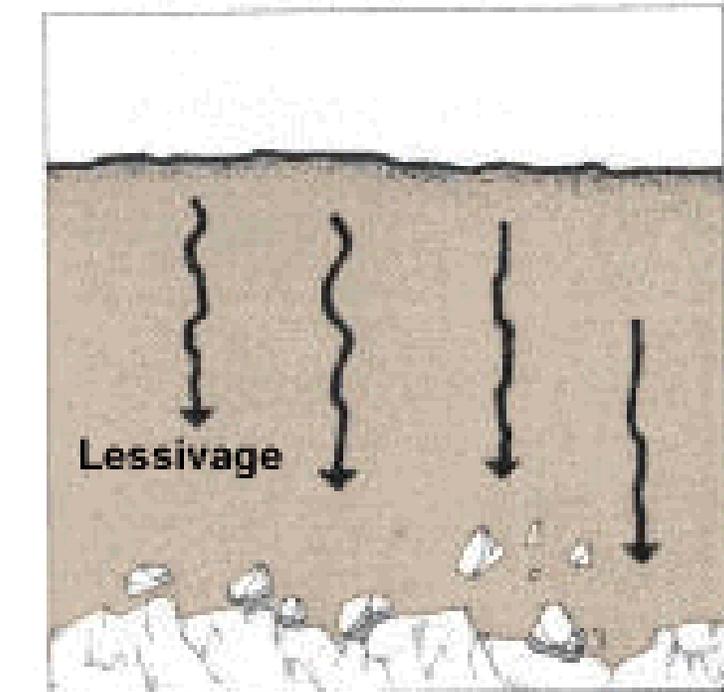


Figure 1-3. Synthèse bibliographique reliant la fertilisation et les concentrations en NO₃⁻ dans les eaux de drainage dans [Billen et al. \(2007a\)](#).

Lessivage des argiles : passage vers un luvisol (sol brun lessivé)

Lessivage au sens strict : entrainement des particules solides, notamment des argiles,

Horizons **éluviaux** (A2 ou E) appauvris, **illuviaux** S (ou B) enrichis



- Horizon organique (OL, OF, OH)
- Horizon organo-minéral (A)
- Horizon éluvial (E)
- Horizon enrichi en fer (BPs)
- Horizon enrichi en argile (BT)
- Roche altérée (C)
- Roche-mère en place (R)

Bilan : une solution du sol dépendante des échanges

Exemple de comparaison de composition :

Descripteur	Type d'eau	Pinède (<i>Pinus sylvestris</i>)	Prairie (<i>Molinia caerulea</i>)	Prairie (<i>Schænus nigricans</i>)	Prairie (<i>Cladium mariscus</i>)
Type de sol		RENDISOL rédoxique	RÉDUCTI-SOL à mull	RÉDUCTI-SOL à hydromull	RÉDUCTI-SOL à anmoor
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	N	424	235	746	881
	S	440	398	557	408
C organique (abs. 270 nm)	N	417	58	85	308
	S	1 647	680	697	738
K ⁺ (mg/l)	N	1,7	1,2	2,6	3,1
	S	6,1	5,4	6,8	3,0
NO ₃ ⁻ (mg/l)	N	0,3	0,2	0,1	0,1
	S	10,3	0,9	0,5	1,7

Bilan

Apport par l'eau

Consommation par les
végétaux et les autres êtres vivants

Solution du sol

Lixiviation par l'eau
Lessivage des
particules solides

Altération
de la roche mère

Minéralisation de la M.O

Séance 4

4. Les échanges sols atmosphère : de l'air modifié par les métabolismes

a. Importance de la respiration du sol

Estimation : 2/3 du CO₂ provient de l'activité microbienne
Respiration des racines à partir de l'air du sol (et non de l'air de l'atmosphère).

Tableau 2.17 Composition de l'air du sol et de l'atmosphère extérieure.

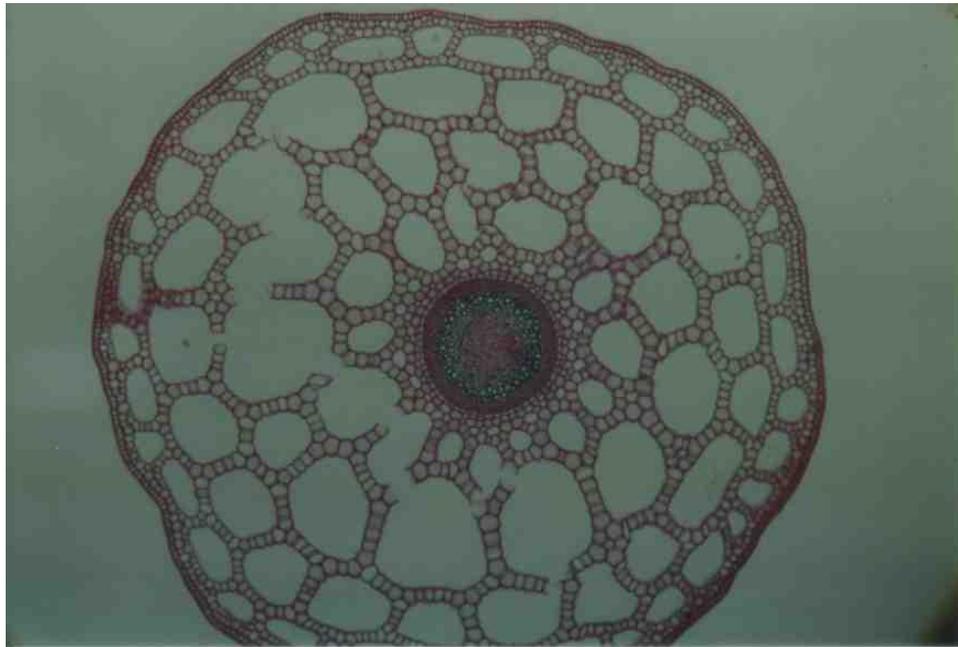
Constituant	Air du sol (%)	Atmosphère extérieure (%)
Oxygène	18 à 20,5 en sol bien aéré 10 après une pluie 2 en structure compacte 0 dans des horizons réduits	21
Azote	78,5 à 80	78
Gaz carbonique	0,2 à 3,5 5 à 10 dans la rhizosphère	0,03
Vapeur d'eau	généralement saturé	variable
Gaz divers	traces de H ₂ , N ₂ O, Ar en anoxie: NH ₃ , H ₂ S, CH ₄	1 (surtout Ar, autres en traces)

Lien SVT

Adaptations particulières si le sol est asphyxiant (par exemple : plantes aquatiques)

Aérenchyme

Pneumatophores



b. Sol et azote : entre fourniture d'azote assimilable aux plantes et production de N_2O

Lien cours cycle de l'azote

Minéralisation de l'azote organique en ion ammonium

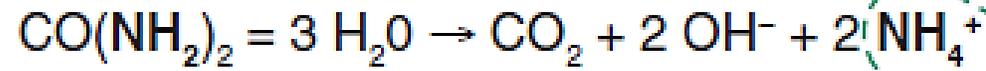
Transformation de l'ammonium en nitrates

Dénitrification

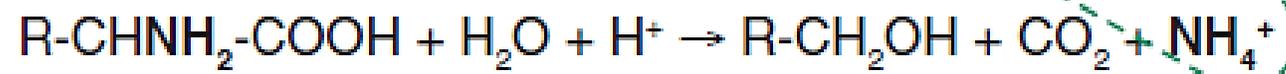
Formation de N_2O

Rappel de l'importance du rapport C/N dans l'humification

Ammonisation
Enzymes du sol libérées
par les bactéries
ammonifiantes



urée



acide aminé

Nitrification

Nitrosation
Nitrosomonas



$$\Delta rG^{\circ'} = -352 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Nitratation
Nitrobacter



$$\Delta rG^{\circ'} = -75 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Il est clairement établi que l'émission de N₂O par les sols agricoles est corrélée à l'emploi d'engrais azotés (d'origine chimique ou épandage de déjections animales).

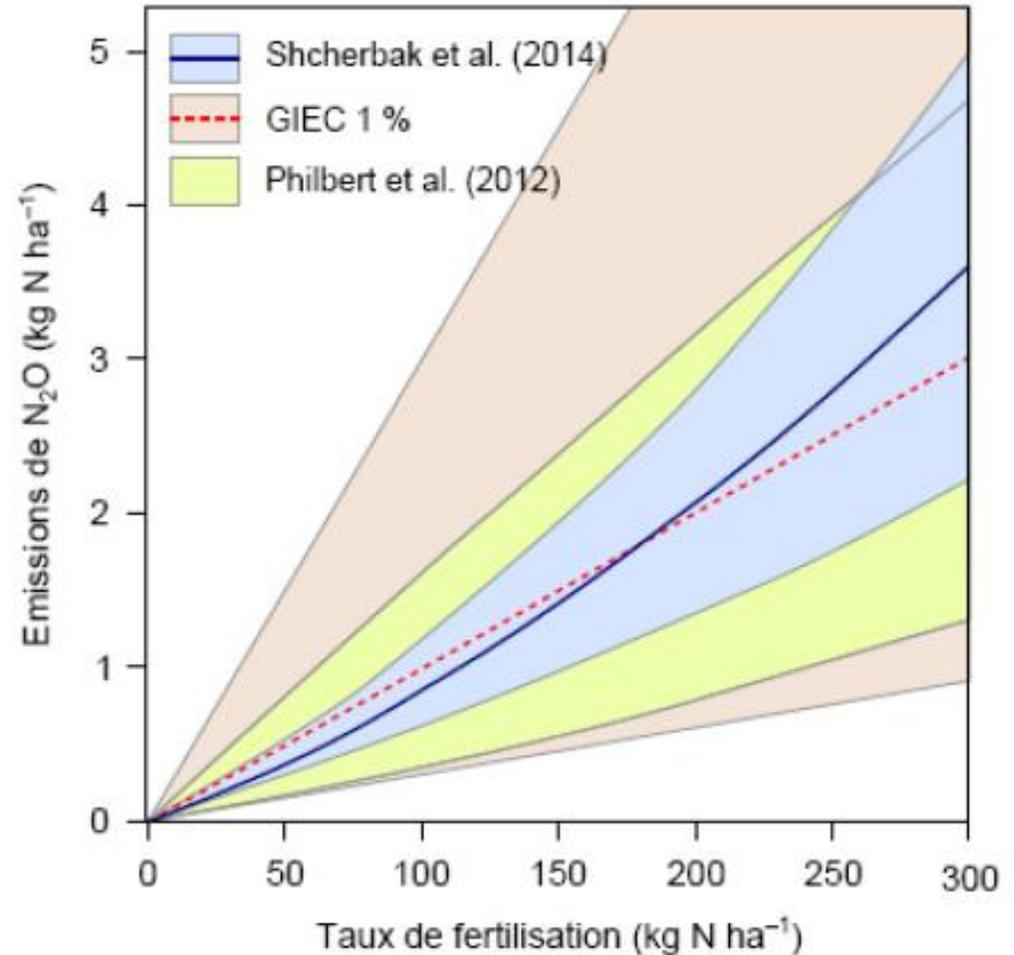


Fig. 1.8. Gamme de variation des émissions de N₂O en fonction du taux de fertilisation d'après les études de Philbert et al. (2012), de Shcherbak et al. (2014) et du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (Shcherbak et al., 2014).

c. Sol et carbone : entre stockage de carbone et production de CO_2 et CH_4

Lien avec cours cycle du carbone BG-A

Stockage de carbone

Méthanogenèse : formation de méthane par des archées chimolithotrophes

Méthanotrophie : dégradation du méthane par des bactéries méthanotrophes

La teneur des sols en carbone dépend de plusieurs paramètres : on peut **retenir la vitesse de minéralisation** (liée à la teneur en lignine, tanin, la température, disponibilité en O₂ et C/N) et **la stabilisation des acides humiques par les argiles**. →

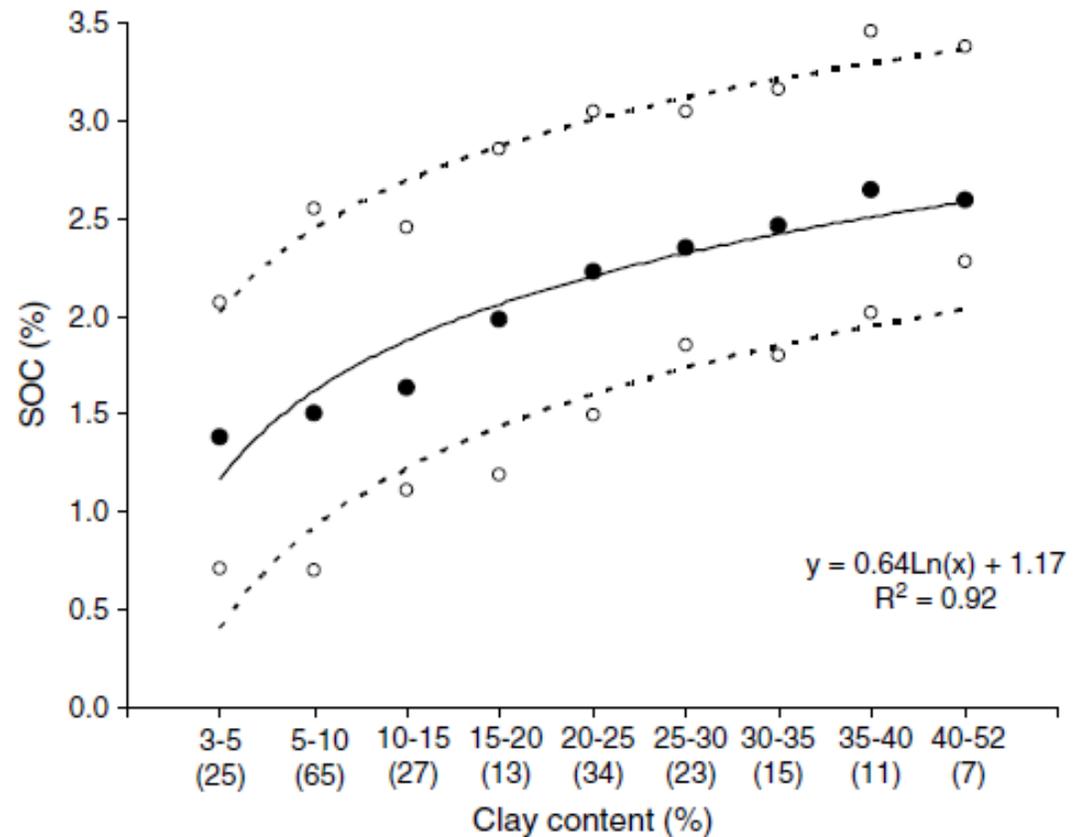


Fig. 14.3 Influence of clay content on the range of soil organic carbon (SOC) values in a 10 ha area of a paddock under cereal-legume rotation in the central agricultural region of Western Australia. Solid circles represent the average SOC value for each clay content whilst open circles represent the upper and lower SOC values for each clay content. The numbers of samples within each clay content are shown in brackets (n=220 in total). The soil contained no gravel

3 - Le sol : un ensemble dynamique.

3 - Le sol : un ensemble dynamique.

1. Formation des sols = pédogenèse

Evolution progressive : de la roche à nue vers un sol complet



Généralisation : 5 facteurs principaux de la pédogenèse :

1 : Le climat

Trop pluvieux :
risque d'érosion forte

Trop sec :
riche d'absence
de lessivage et
de lixiviation

Intermédiaires :
plus favorable

Lien sup : Pédro

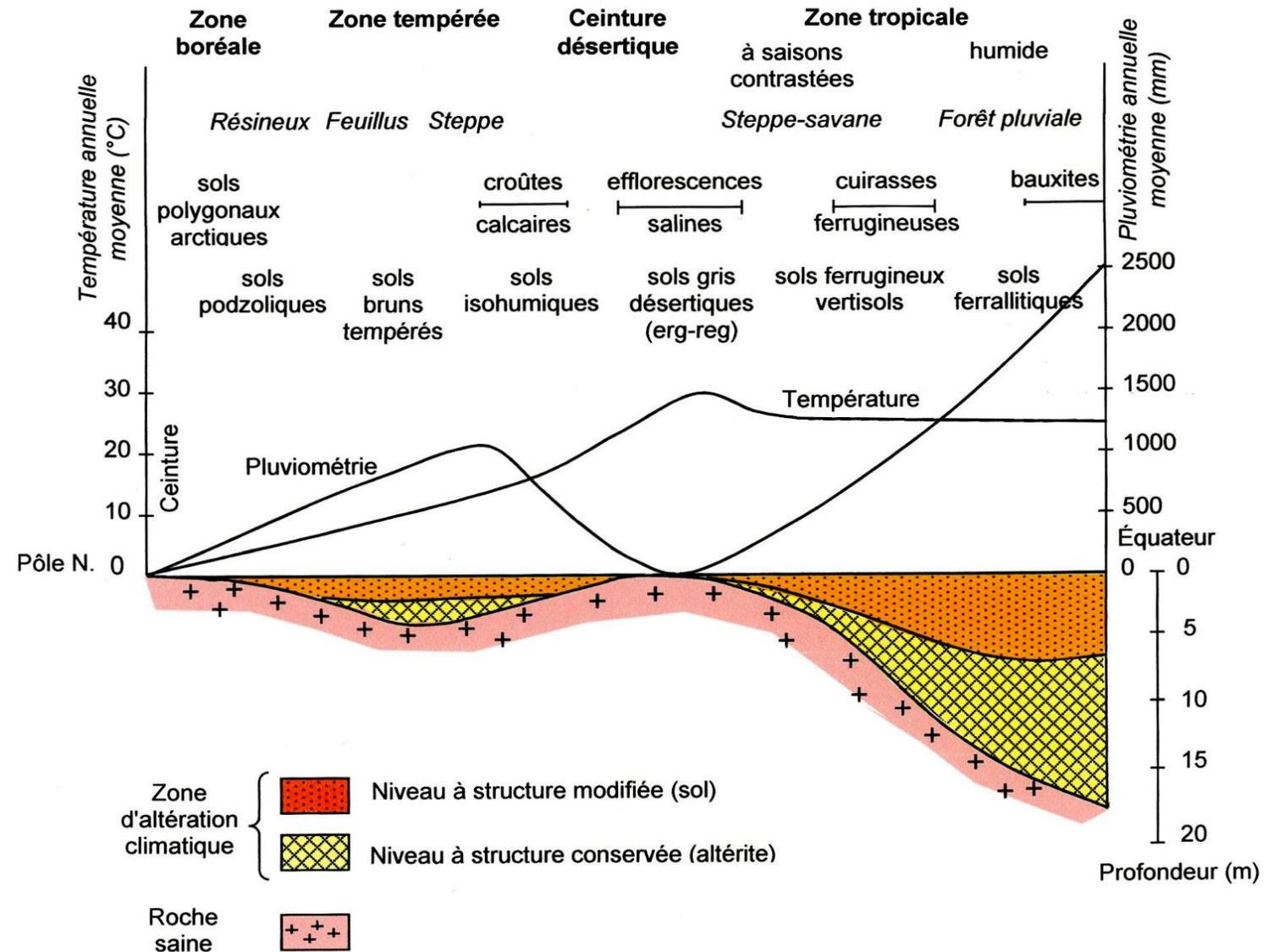


Figure 4 – Séquence latitudinale d'origine bioclimatique indiquant les variations de la nature et de l'épaisseur des sols du pôle nord à l'équateur (Pédro, 1985).

2 : La roche mère

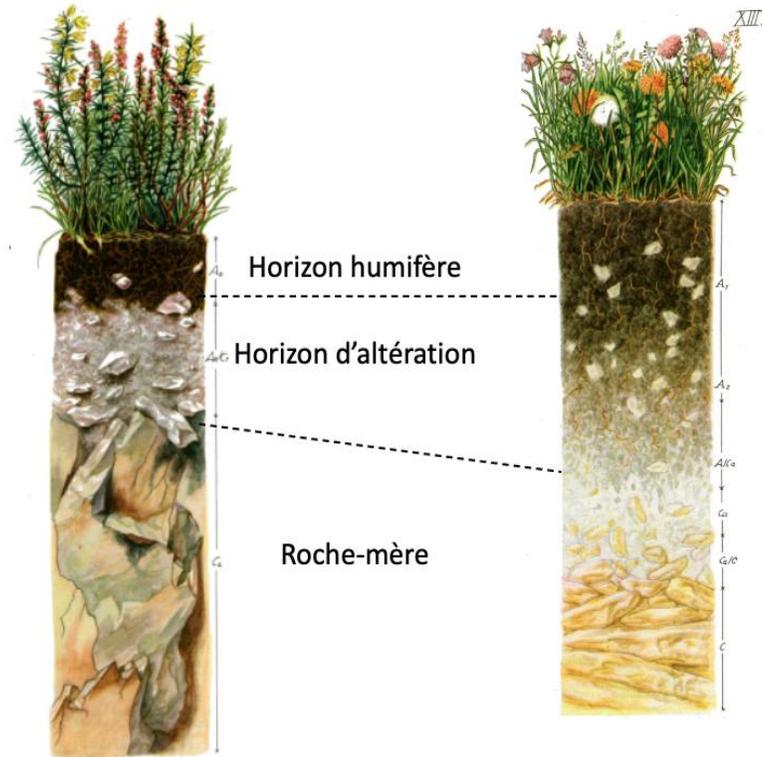
Granite

Calcaire



Influence de la roche-mère sur la nature du sol formé

Végétation acidophile :
bruyères, callunes,
ajoncs, ...



Végétation calcicole :
orchidées, cistes, ...

Ranker : sur roche-mère
granitique

Rendzine : sur roche-
mère calcaire

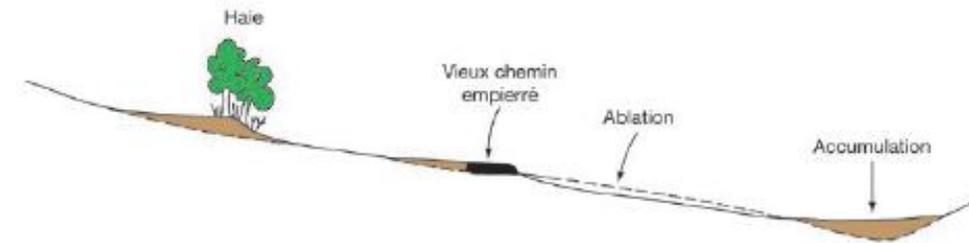
Le ranker est un sol peu épais se développant sur une roche-mère siliceuse de type granite et sous une végétation acidophile.

La rendzine est un sol se développant sur une roche-mère calcaire et sous une végétation calcicole.

3 : Les êtres vivant, nature de la flore et de la faune



4 : Le relief : (topographie) influence de la pente



■ Figure 6.4. En paysage agricole, la terre érodée en haut de versant peut venir s'accumuler sur un obstacle (haie, chemin) ou bien en fond de talweg.

5 : Le temps (durée) :

souvent très long, de 100 000 ans à un million d'années suivant les régions

Nos sols actuels sont souvent le résultat de plus centaines de milliers d'années d'évolution : **importance de leur préservation.**



Première étape : altération de la roche mère

Désagrégation physique est essentiellement due au climat mais importance aussi de la microflore.

L'altération chimique se fait par l'action de l'eau sur les minéraux mais aussi par l'attaque des minéraux par la microflore via des réactions d'hydratation, de dissolution, d'oxydation, de réduction ou d'hydrolyse...

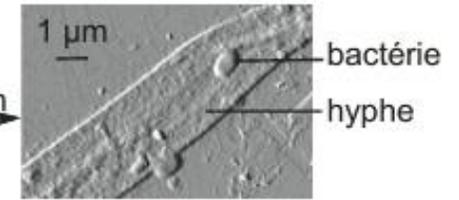
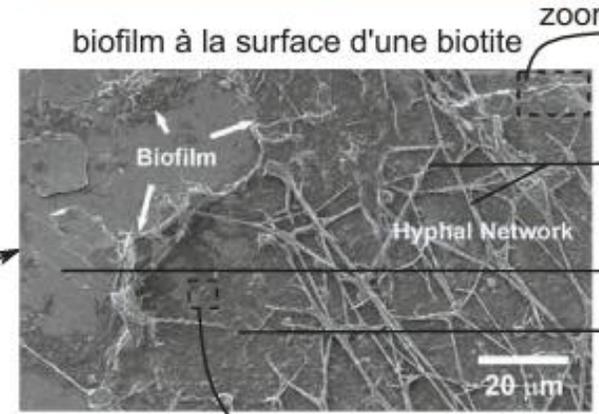
sol formé par les produits d'altération de la roche-mère et l'accumulation de la matière organique

racine pénétrant dans les fissures de la roche-mère => participe à la désagrégation mécanique

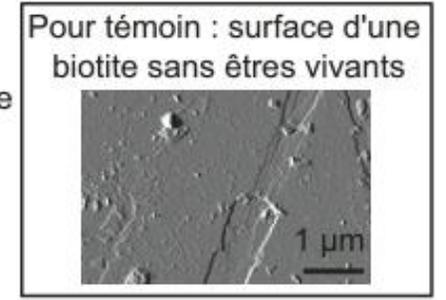
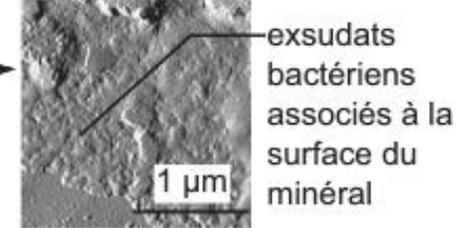
roche-mère en cours d'altération



altération à l'échelle des minéraux : action des micro-organismes



hyphes de champignon
surface du minéral
polymères extracellulaires (exsudats)



Pour témoin : surface d'une biotite sans êtres vivants



roche-mère friable
fissures avec circulation d'eau => zone d'altération chimique forte

altération à l'échelle de l'affleurement : action de l'eau et des plantes

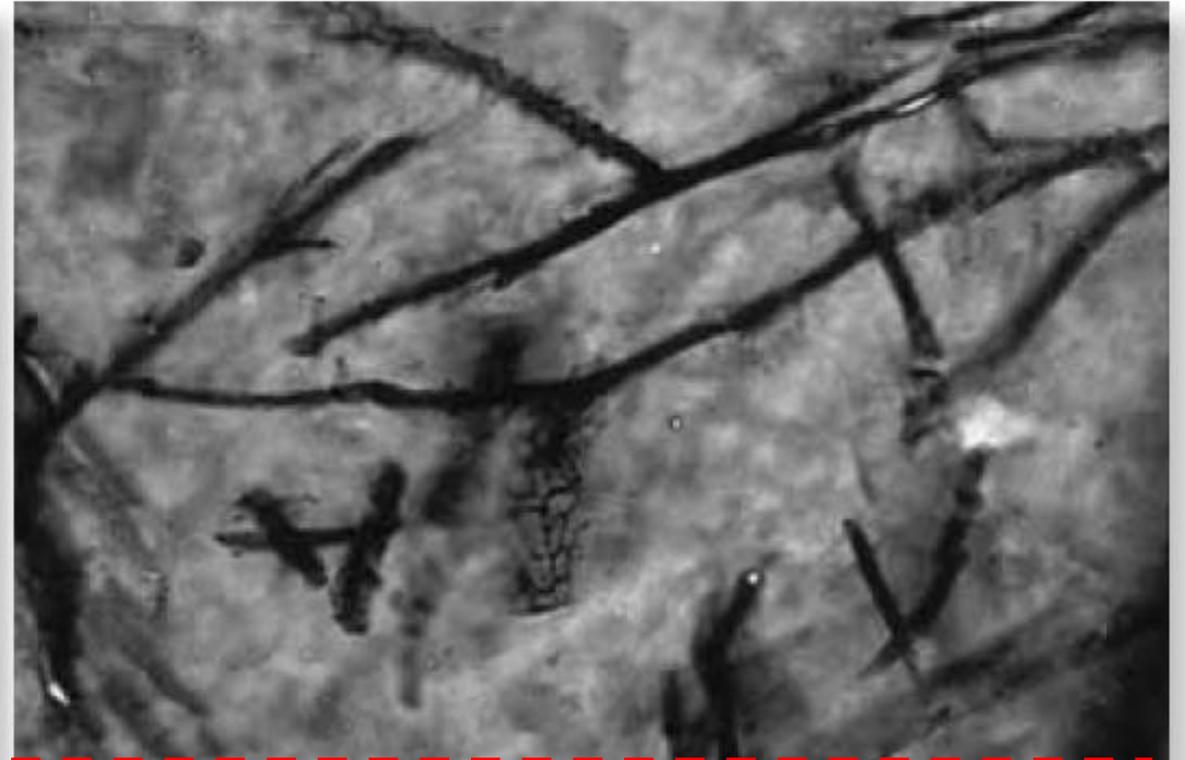
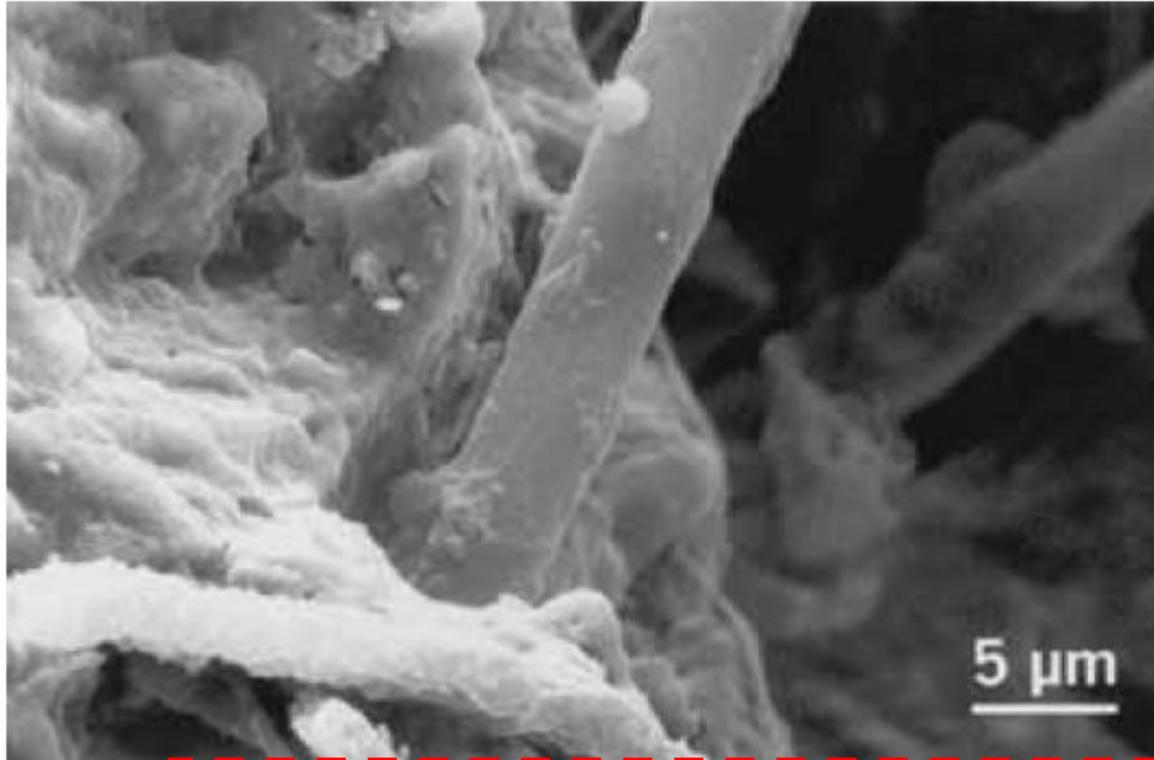


Fig. 4,4 : Mycorhizes géophages. A gauche; microscopie électronique à balayage montrant deux hyphes fongiques pénétrant un grain de feldspath: (EHd) A droite; coupe mince d'un grain de feldspath provenant de l'horizon E (lessivé) d'un Podzol, sillonné par des tunnels d'environ 5 μm de diamètre; Le grain 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. 4.6 : Les Champignons attaquant un cristal de galène (PbS). Remarquez le mode de fixation des hyphes fongiques sur la surface minérale à 90°. (90X)

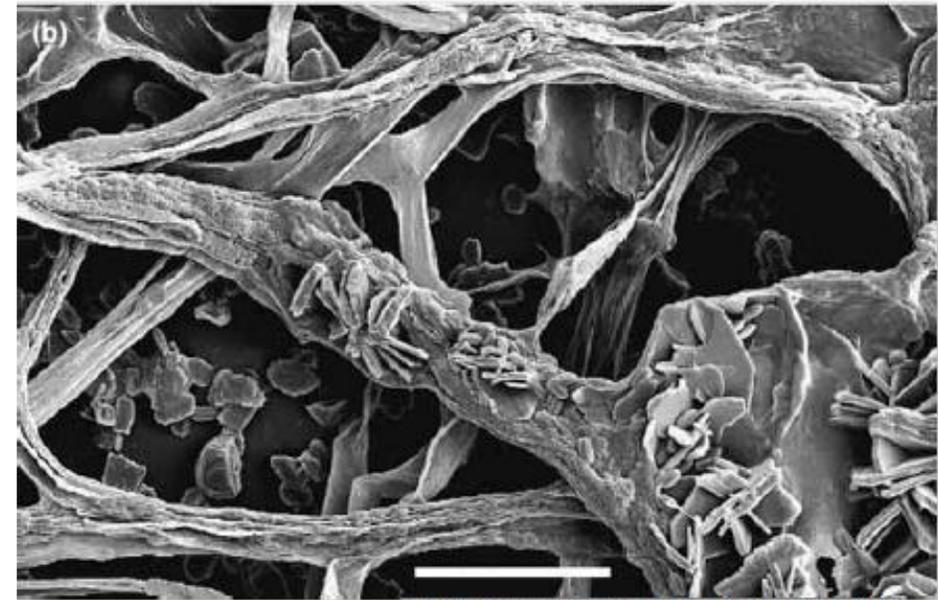


Fig. 4.8 : Calcite et oxalate de calcium monohydraté précipité sur *Serpula himantioides*. Barre (b) 10 μ m ; D'après Gadd (2007).

installation d'un biofilm

Lien avec SV-A : biofilm = population bactérienne adhérente à une surface et enrobée d'une matrice d'exopolysaccharides



Lien SV-A

Les étapes de réalisation d'un biofilm

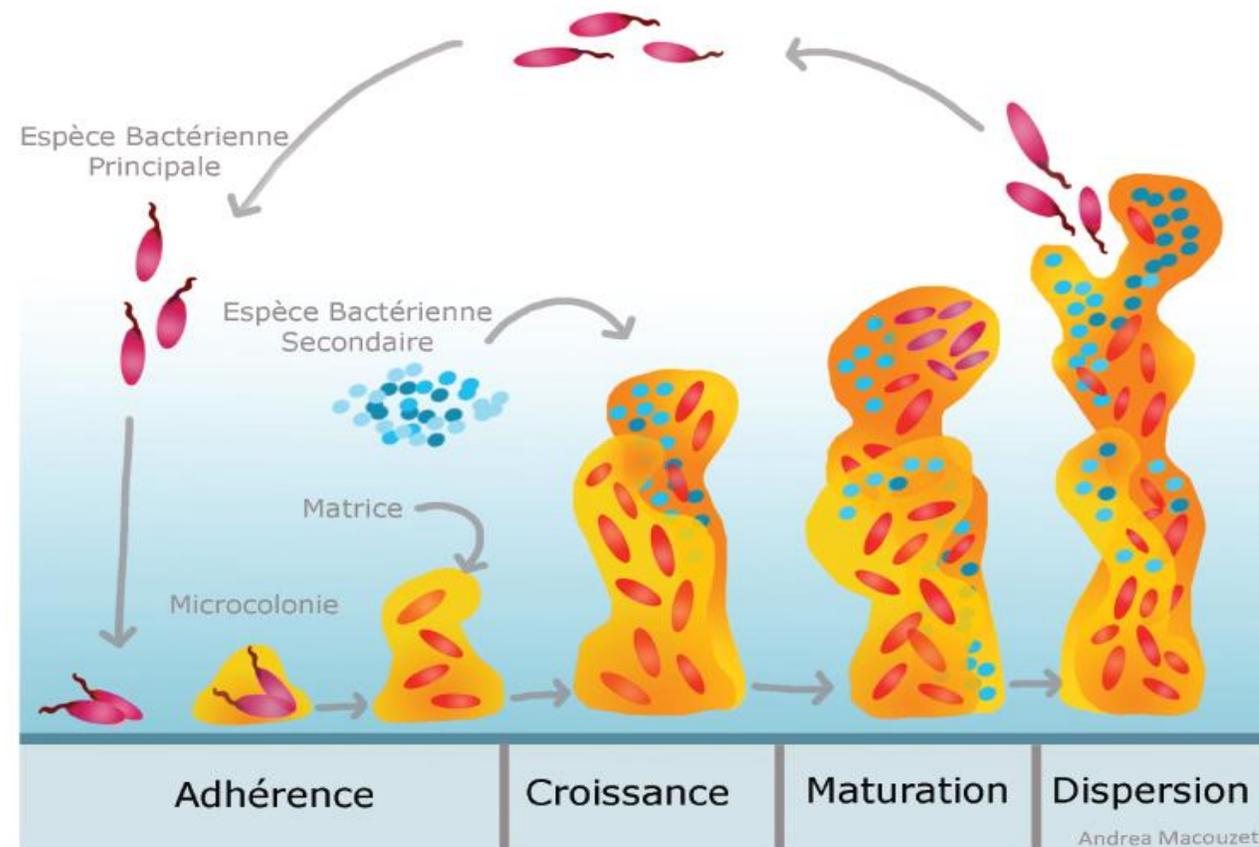


Figure 2.  tapes de la formation et de la dispersion d'un biofilm bactérien.

L'installation de « pionniers » sur la roche nue

Importance des bactéries et des champignons : microflore

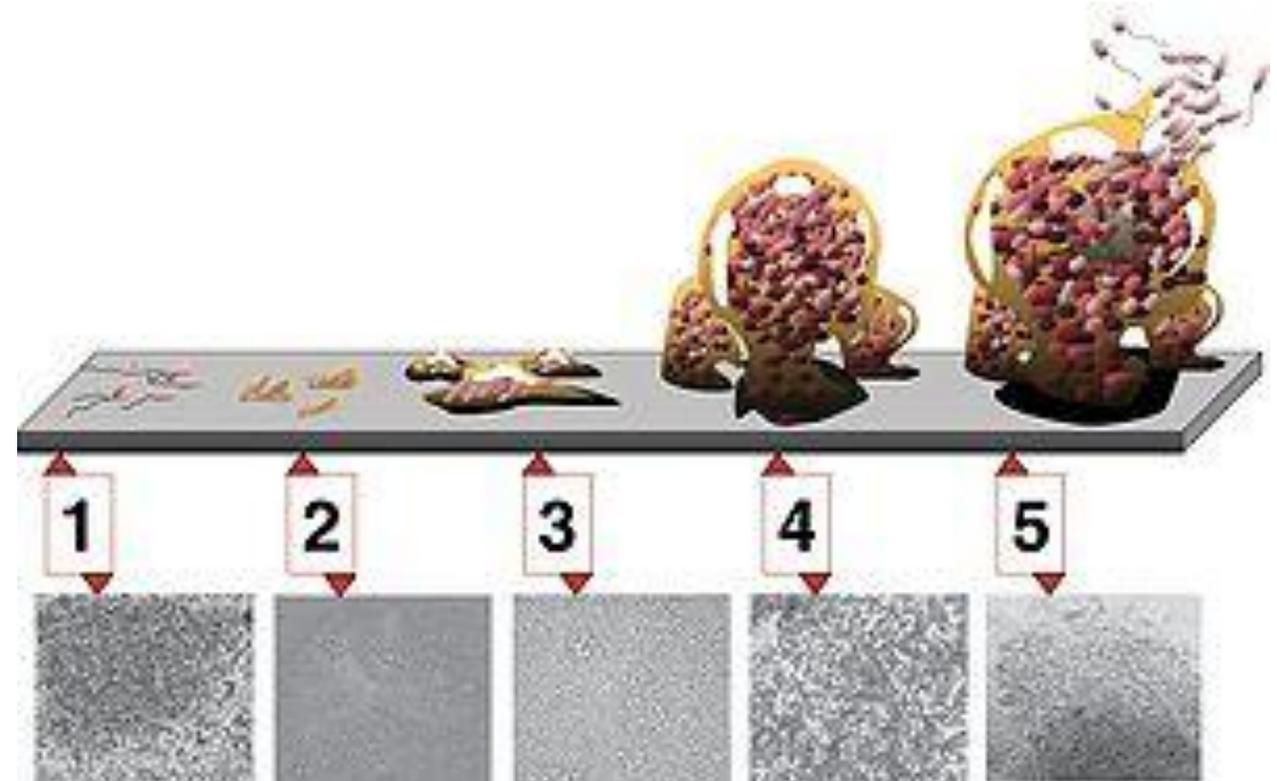
Étape 1 : attachement initial ;

étape 2 : attachement irréversible ;

étape 3 : apparition et développement du biofilm ;

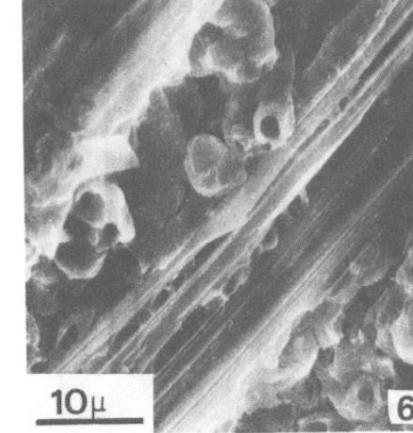
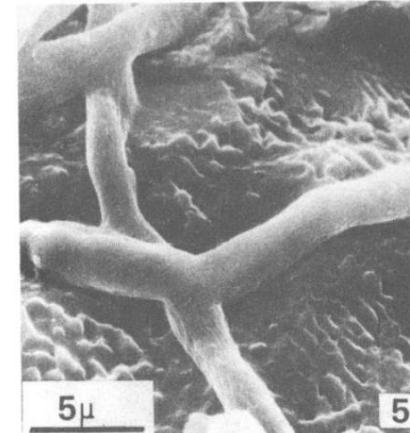
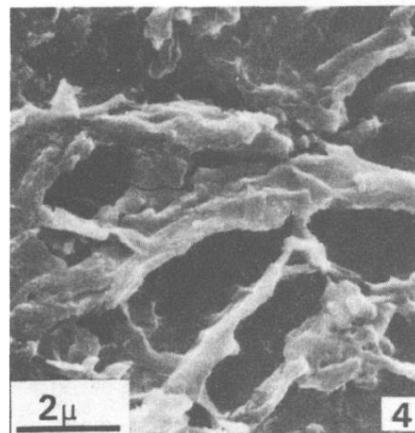
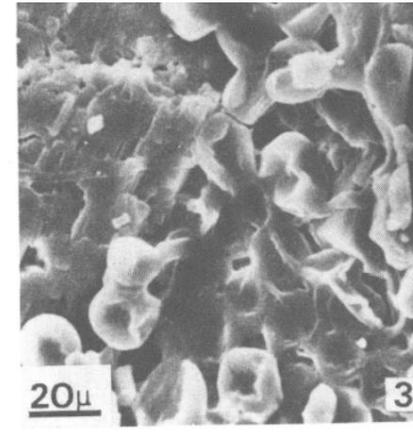
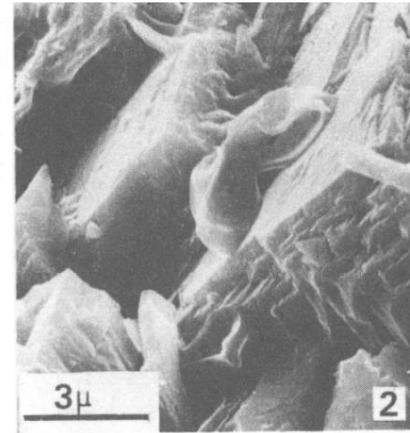
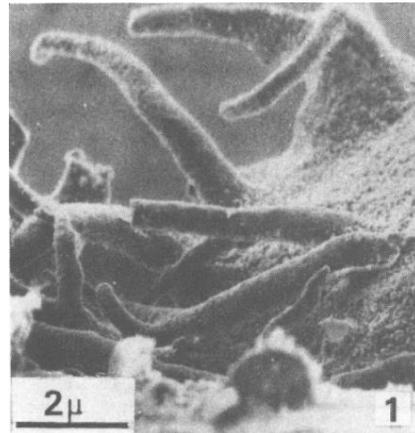
étape 4 : maturation : le biofilm devient macroscopique

étape 5 : érosion et dispersion/Détachement.



Biofilm et altération des roches

Altération des minéraux suite aux **sécrétions acides**, pénétration du mycélium



Installation progressive de végétaux

Lichen, mousses, puis angiospermes : végétaux pionniers

Exemple : lichen : *Rhizocarpon*

Mousse *Hypnum*

Geographicum



Puis des trachéophytes pionnières

Premières fougères : exemple *Adiantum capillus-venneris*

Premières angiospermes : *Silène*, *Leontodon*, *Galeopsis*...



Plusieurs actions des végétaux

Respiration des racines

Production d'acides (action chimique)

Action mécanique (physique)

Augmentation de la MOM

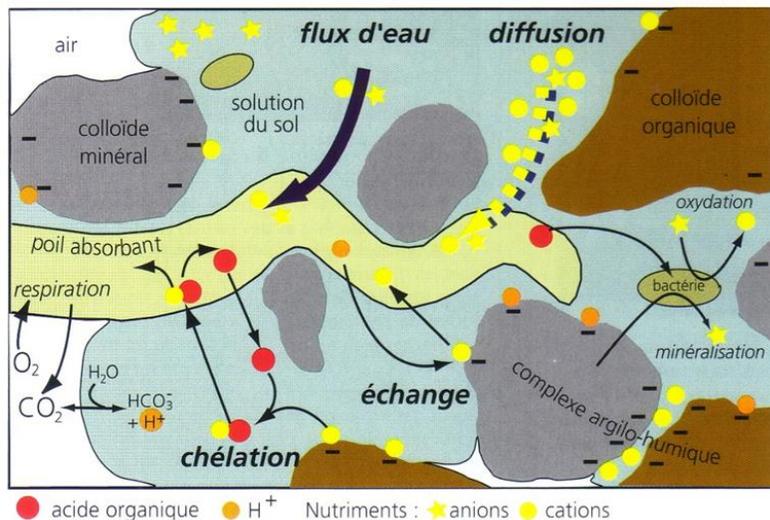
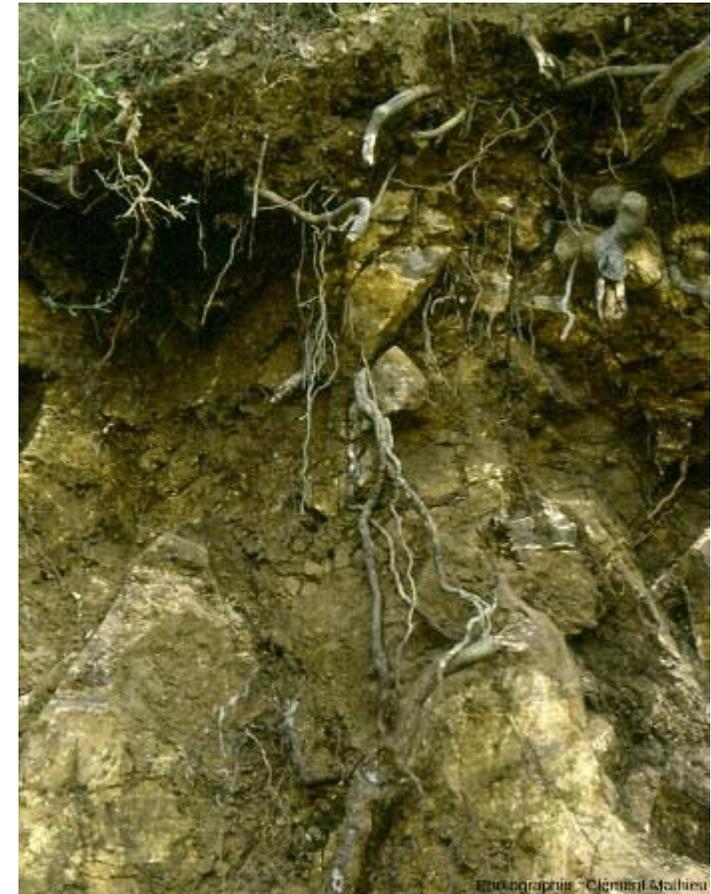


Figure 3-26: portion de rhizosphère montrant les constituants d'un sol et les échanges entre un poil absorbant et le sol

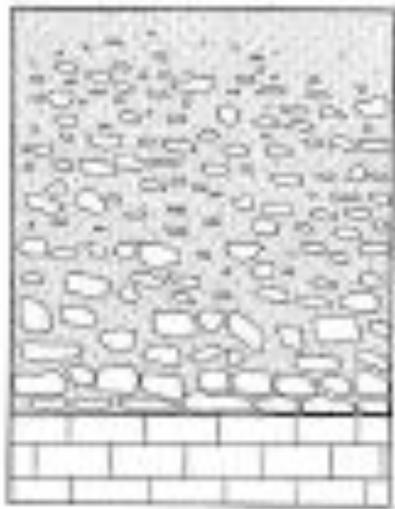
On classe les cations en fonction de leur capacité de liaison décroissante ou de leur capacité d'échange croissante dans l'ordre suivant: Al^{3+} , H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ou NH_4^+ , Na^+ .



Première étape : altération de la roche mère

Altération chimique et/ou désagrégation physique (figure 12)

1^{re} étape: altération de la roche mère



Altération chimique

- dissolution
- hydratation
- hydrolyse

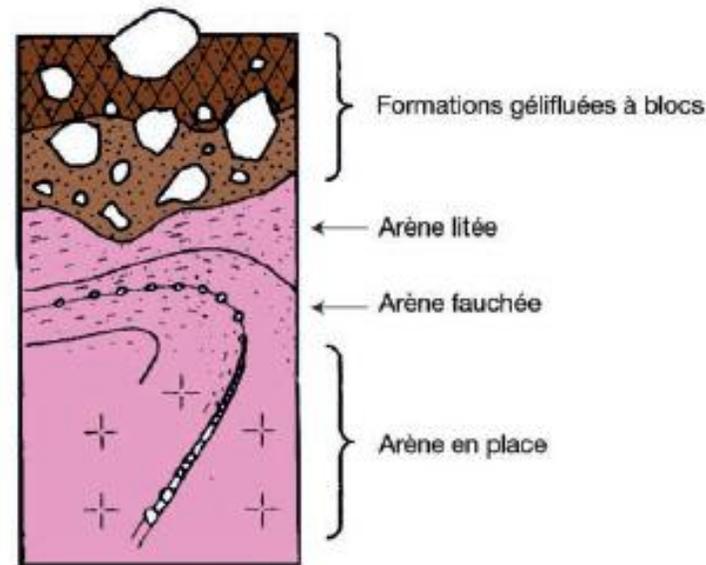
Désagrégation physique

- eau
- gel
- chaud - froid



Remarque : il peut avoir des matériaux allochtones
= d'origine différente de la roche mère

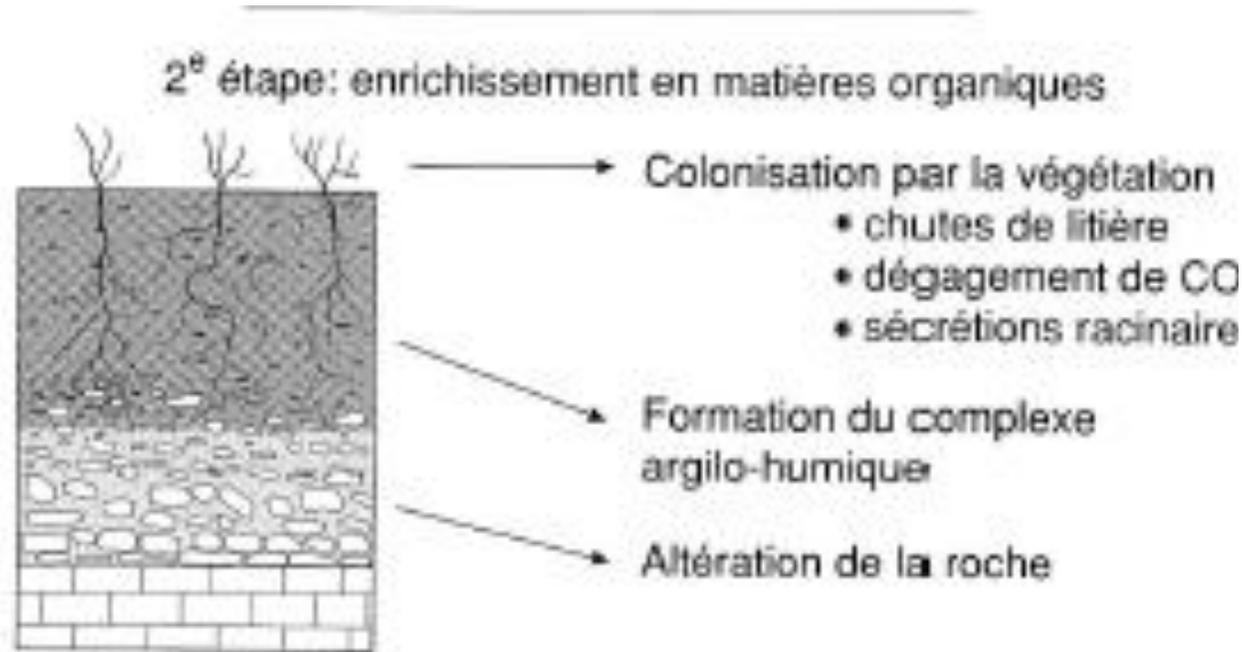
Exemple : les gros blocs de granites n'existent pas dans l'arène sous-jacente : ils sont allochtones



■ Figure 4.4. Association caractéristique de formations superficielles en paysage granitique (Massif central). La formation gélifluée à blocs contient de gros éléments granitiques que l'on n'observe pas dans les arènes sous-jacentes. Elle est donc allochtone : elle s'est déplacée sur le versant. D'après Franc et Valadas, 1990.

Deuxième étape : enrichissement en matières organiques

Enrichissement en matière organique



■ Figure 5.8. Structure grumeleuse de l'horizon de surface d'un sol forestier argileux, dans la forêt de Boucq (Meurthe-et-Moselle). Sur cette vue perpendiculaire à la surface, la litière a presque complètement disparu. La forme d'humus est un eumull pélosolique. © François Lebourgeois.

Progressivement : de plus en plus de végétaux

Sol peu épais : installation de végétaux, donc apport de litière

Cette deuxième phase est le résultat de l'action des êtres vivants qui opèrent trois types de transformations :

- La minéralisation d'une partie de la M.O.M
- L'humification
- L'assimilation



Troisième étape : transfert de matières et formation d'horizon(s)

Transferts dus aux bioturbations :

- action mécanique, chimique et biologique des vers de terre
- action des racines qui créent des galeries et déposent des mucilages

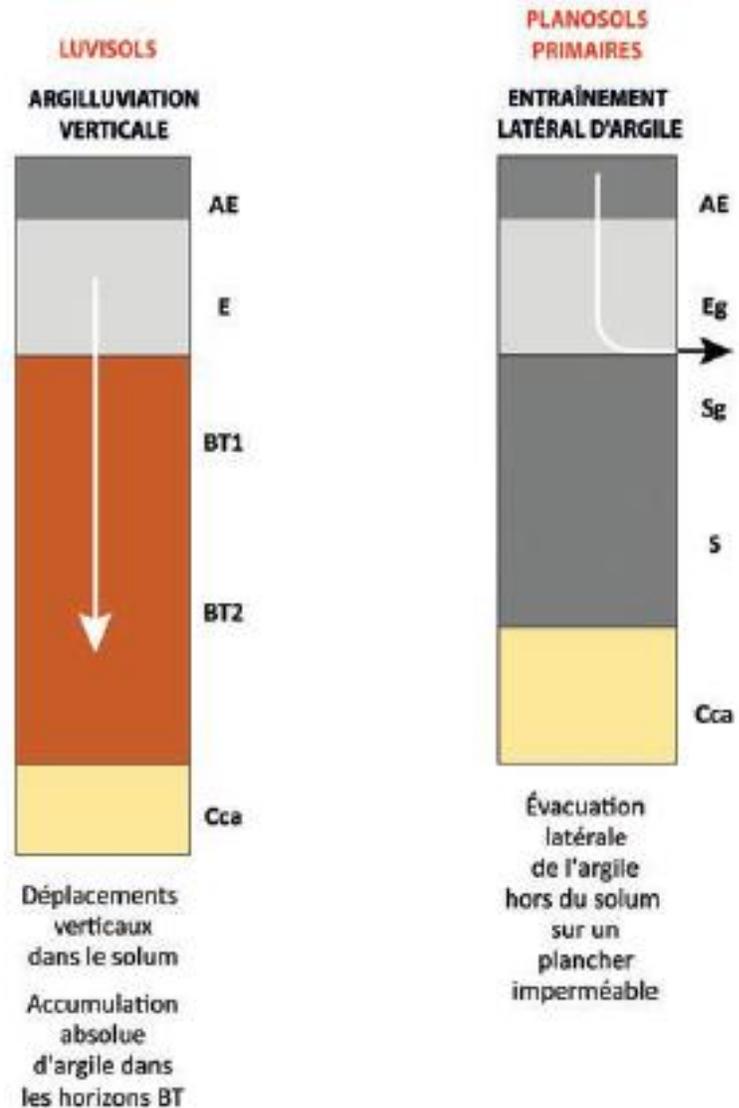
Transferts dus à la gravité :

Transferts dus à l'eau :

- descendant : éluviation des couches supérieures et illuviation des couches plus profondes
- ascendant : évaporation (climat chaud et sec)

Transfert du fait de l'eau vertical ou non

Entrainement vertical,
entraînement latéral



Exemple d'éluviation / illuviation de l'argile : formation de luvisol = sol brun lessivé,

Rappel document TP

O : organique

A : complexe argilo-humique

E :éluvial

BT et BP

Illuviaux

C : roche mère altérée

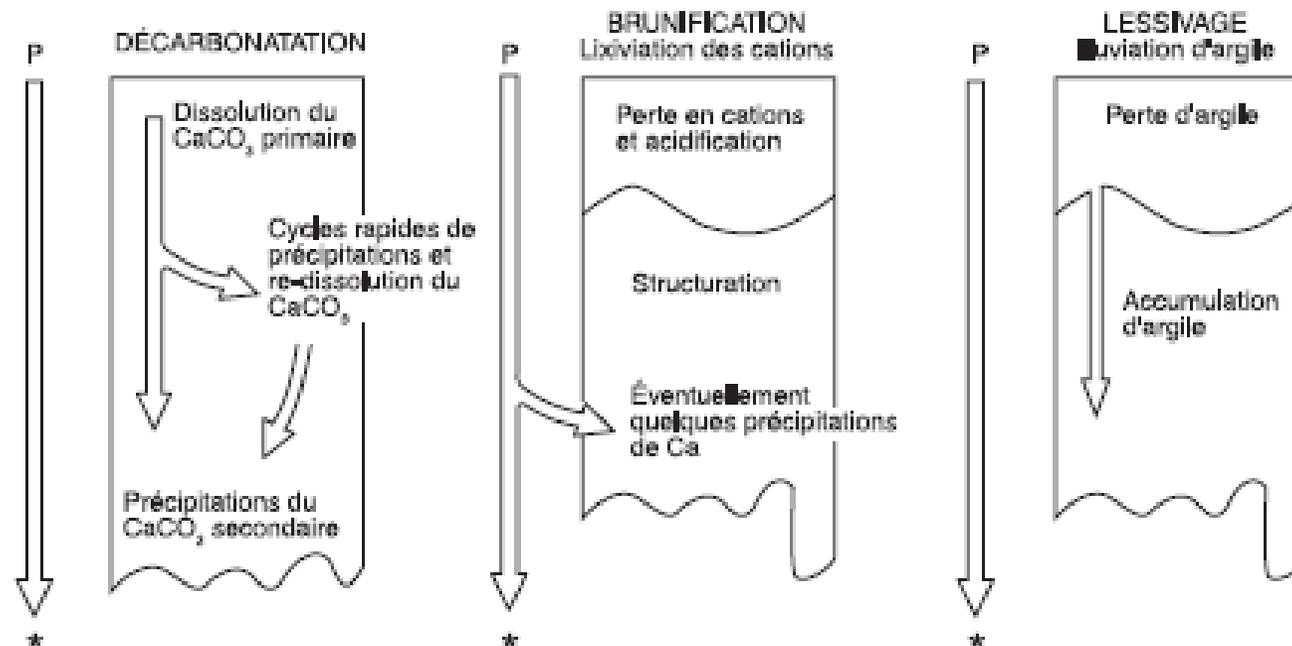


Brunification : évolution vers un brunisol

Altération modérée des minéraux primaires.

Faible néogenèse de minéraux argileux.

Constitution de complexe argiles-humus-fer stables.



Sol brun : plusieurs milliers d'années à se constituer

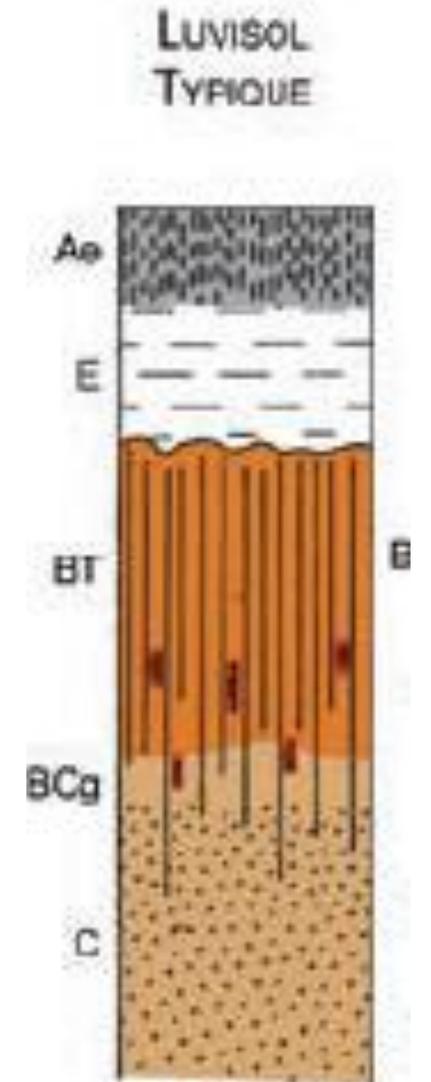
Genèse lente : 0,1 à 10 mm par siècle !



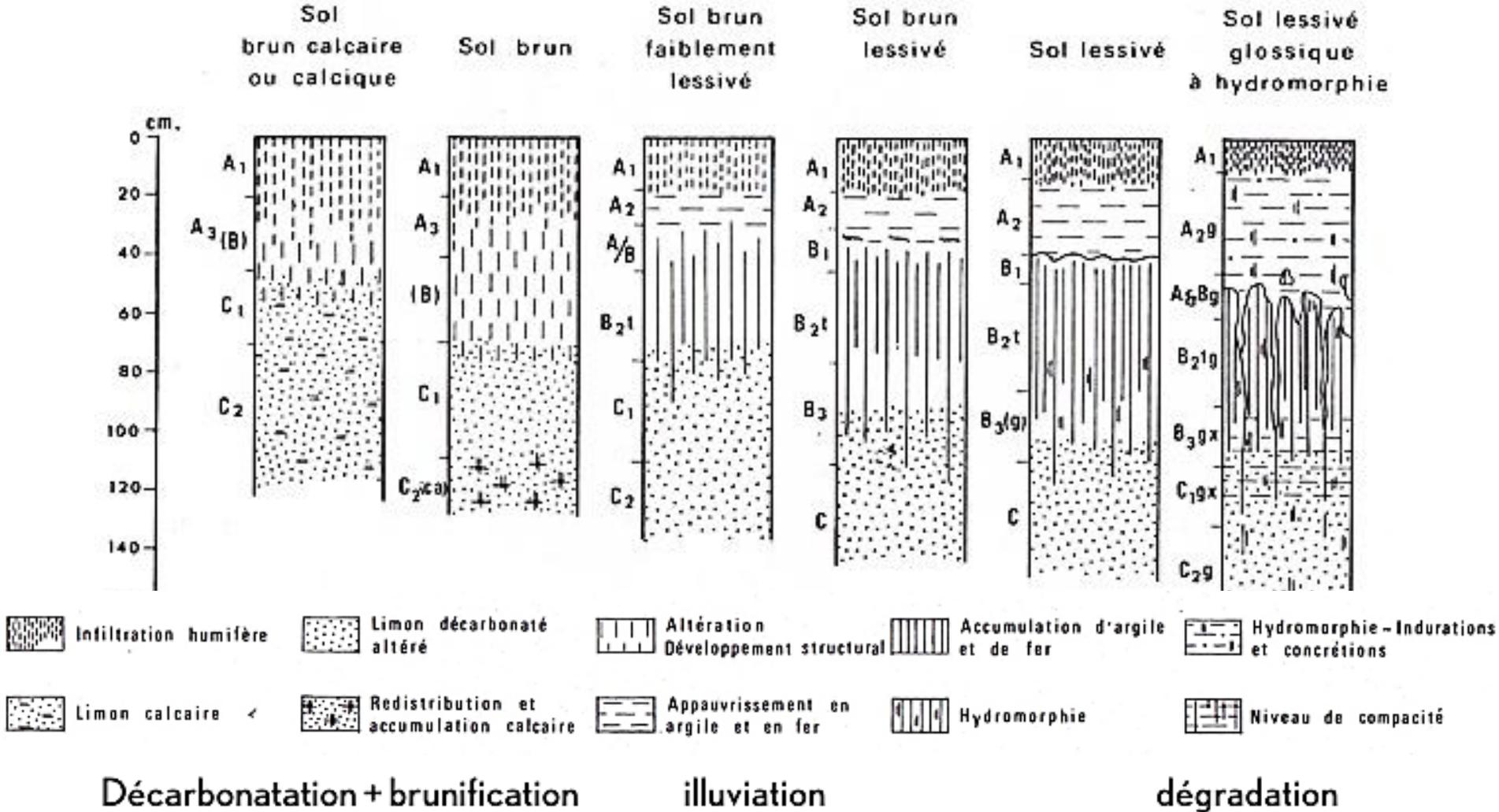
Evolution sol brun vers sol brun lessivé

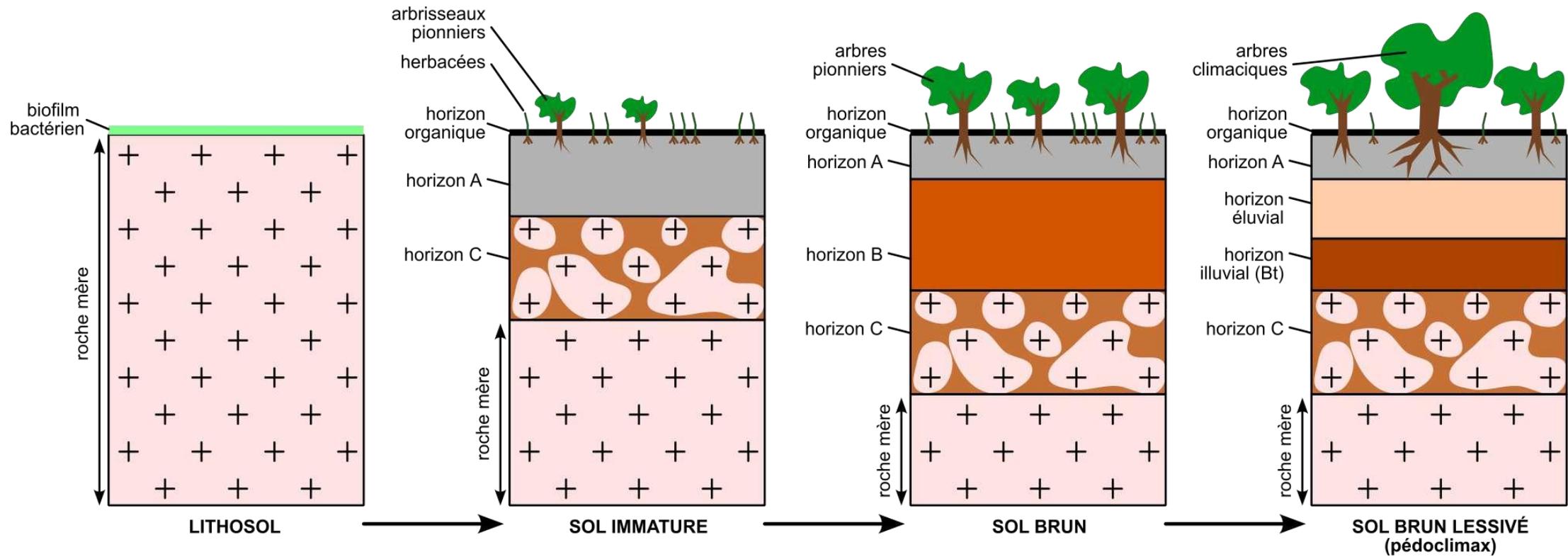
Transferts de matière et formation d'horizons différenciés

Brunisol : A / S / C puis luvisol A / E / BT / BCg / C

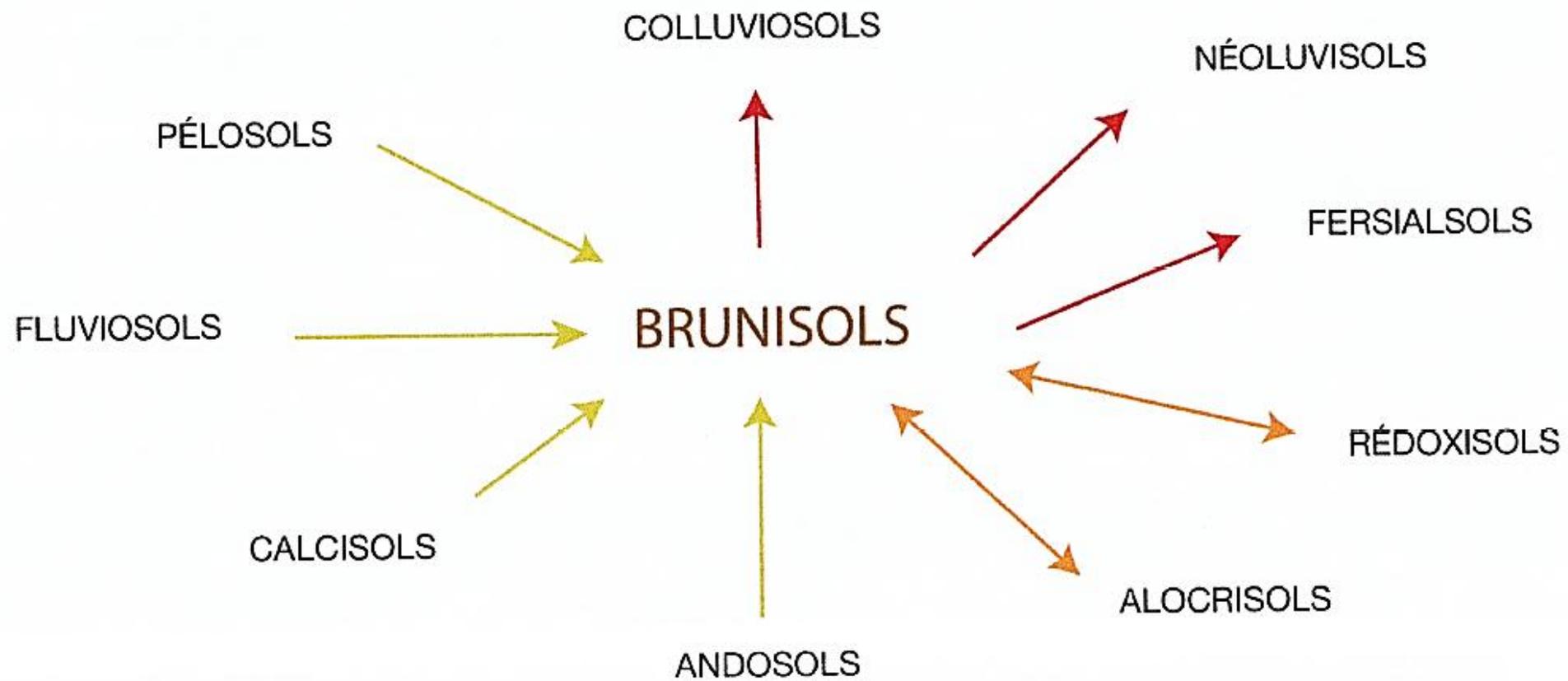


Exemple de la formation d'un sol brun à partir d'un loëss, une roche calcaire





Evolution d'un sol depuis une roche mère nue vers un pédoclimax. Notez l'évolution conjointe de l'écosystème vers le climax écosystémique.



■ Figure 11.1. Au cours de l'évolution des sols, au fil des millénaires, les brunisols constituent souvent des stades de transition entre des sols jeunes peu évolués et des sols beaucoup plus anciens fortement évolués et différenciés.

Evolution progressive

Bilan : naissance et évolution d'un sol

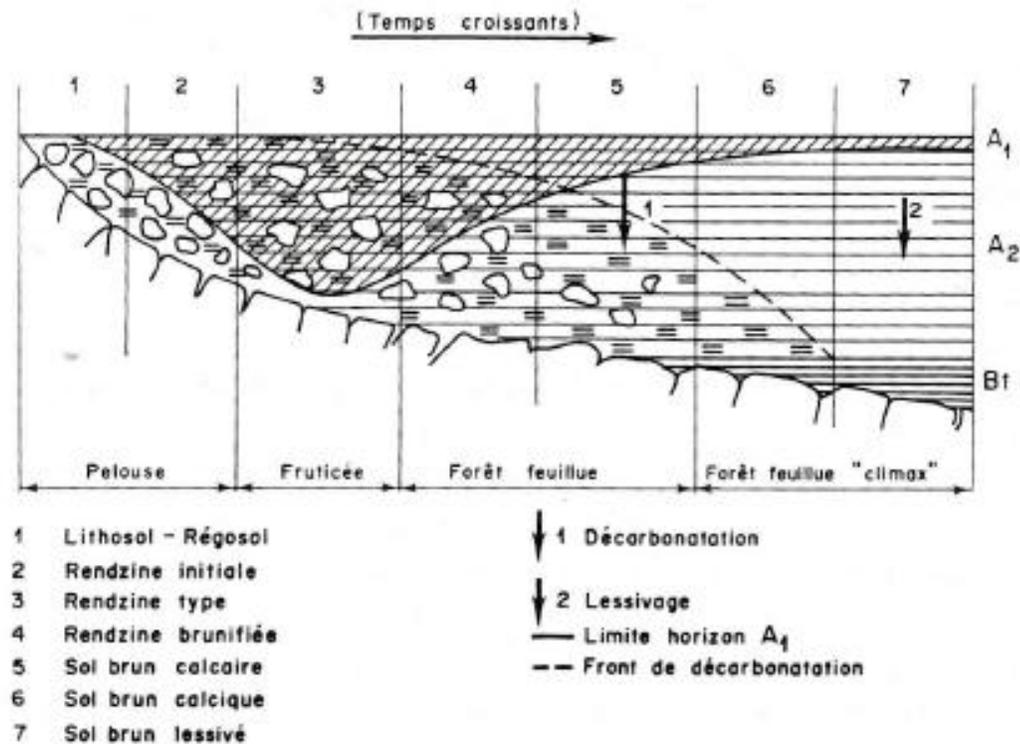
lithosol (roche mère

et éventuellement
fine couche de terre)

→ Rendzine (sol peu
épais mais structuré)

→ sol brun

→ sol brun lessivé



Séance 5

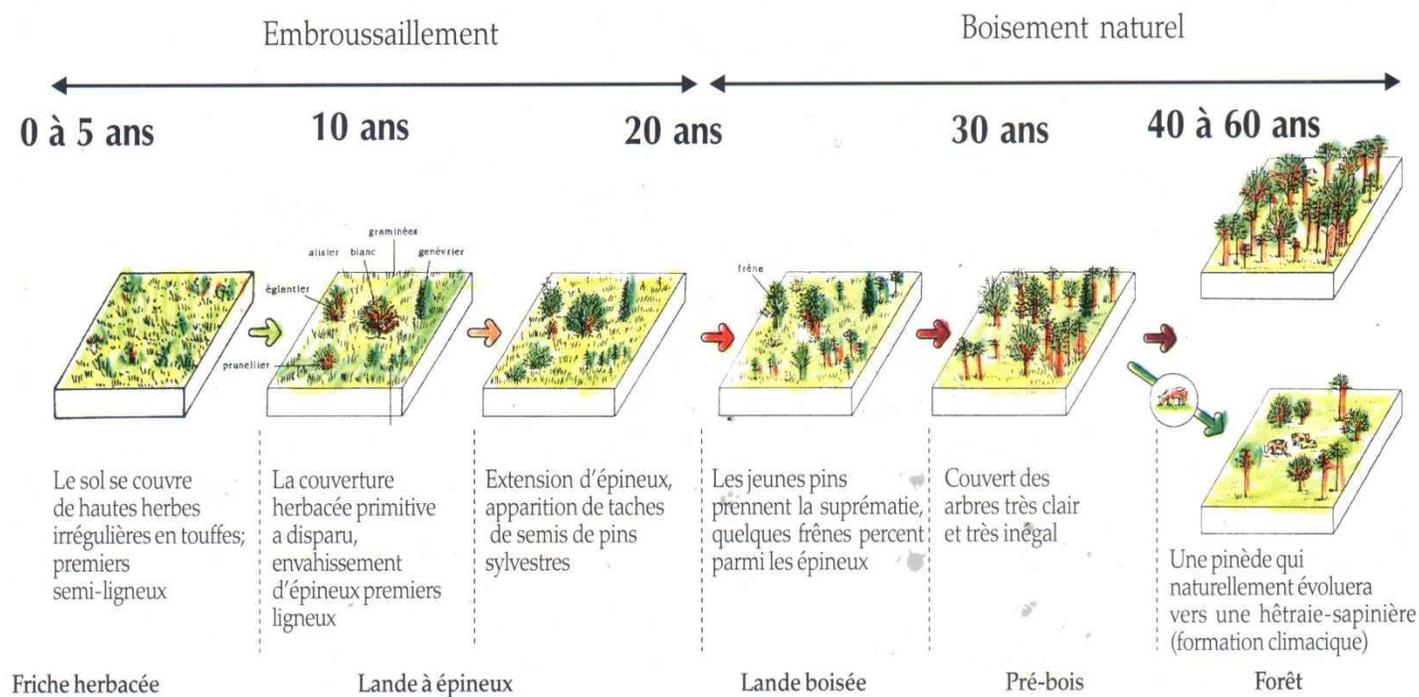
2. Pédoclimax et dynamique des sols

En écologie : stade climax = un équilibre dynamique

Les séries progressives

LES SUCCESSIONS SECONDAIRES

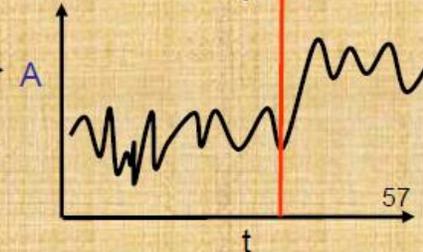
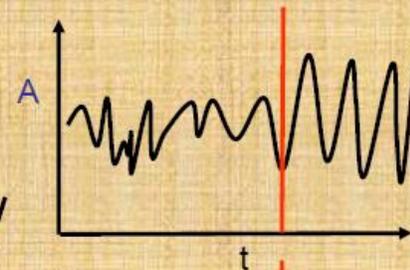
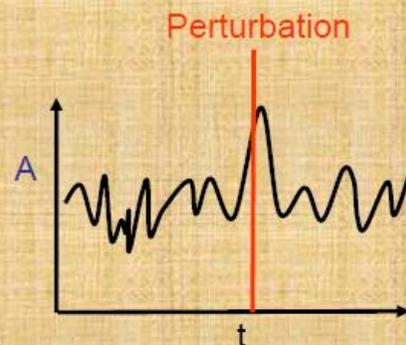
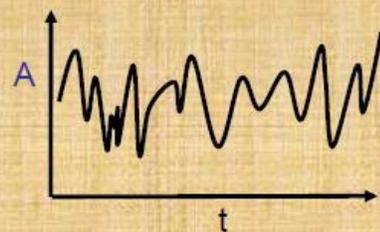
L'évolution d'un pré de fauche abandonné en étage montagnard (Alpes du Nord) (1 200m)



Le climax doit être compris comme un équilibre dynamique en constante évolution

Les systèmes écologiques sont-ils à l'équilibre?

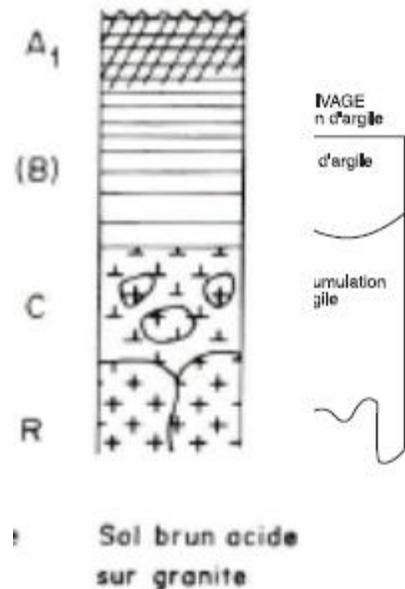
- Vision ancienne : équilibre = harmonie = bon fonctionnement
- Vision actuelle : un écosystème est en perpétuelle transformation = équilibre dynamique



Changements de régime
Résistance
Résilience

Pédoclimax : état vers lequel tend le sol en l'absence de perturbation

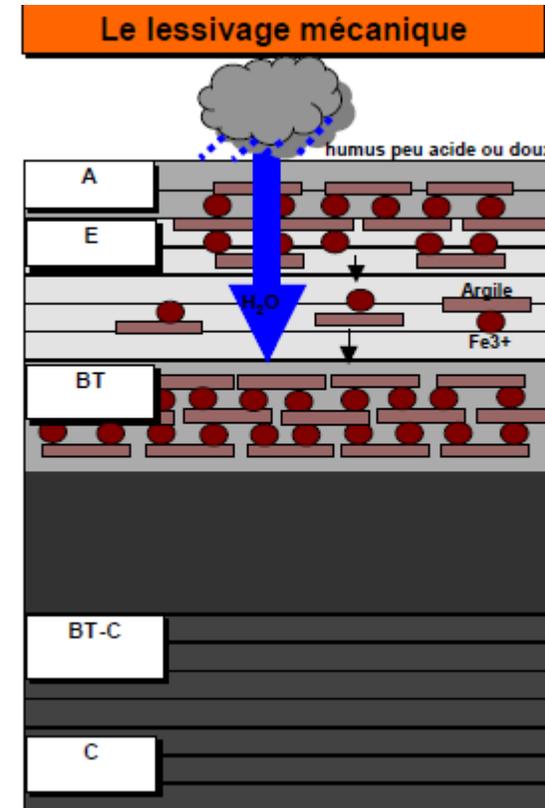
En nos région pédoclimax = sol brun lessivé (= luvisol)



Sol brun acide sur granite



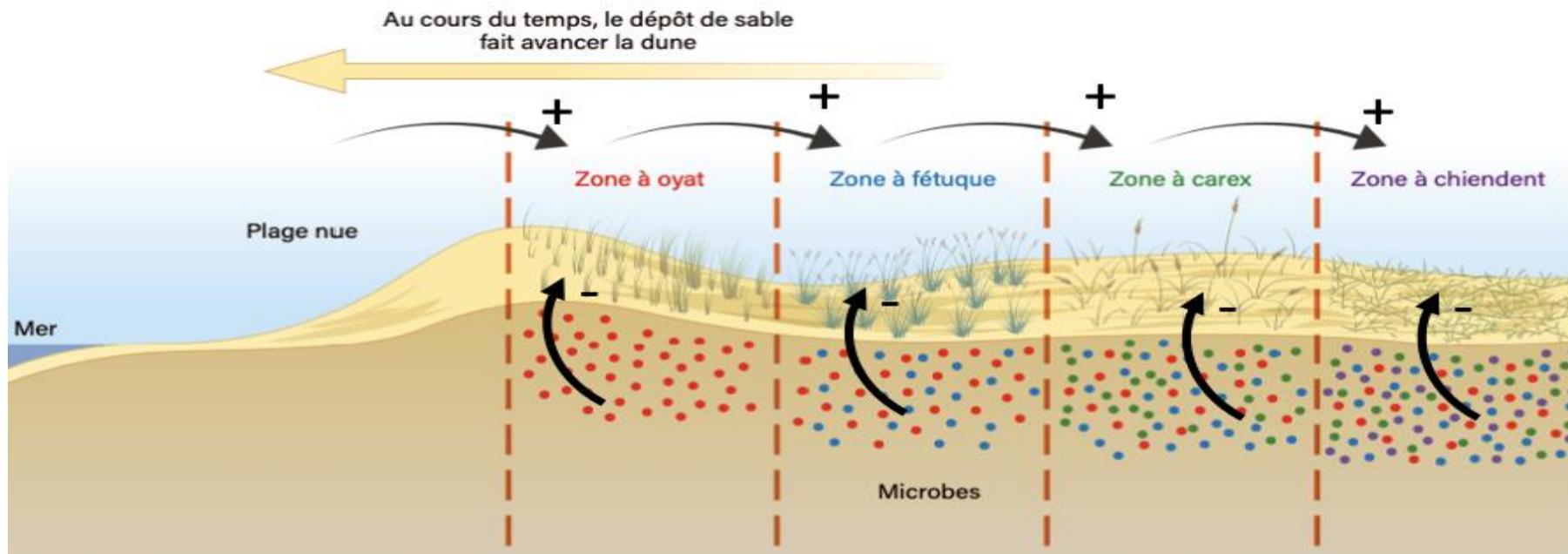
Coupe pédologique d'un sol brun. © Soll-net.com CC by-nc-sa 2.0



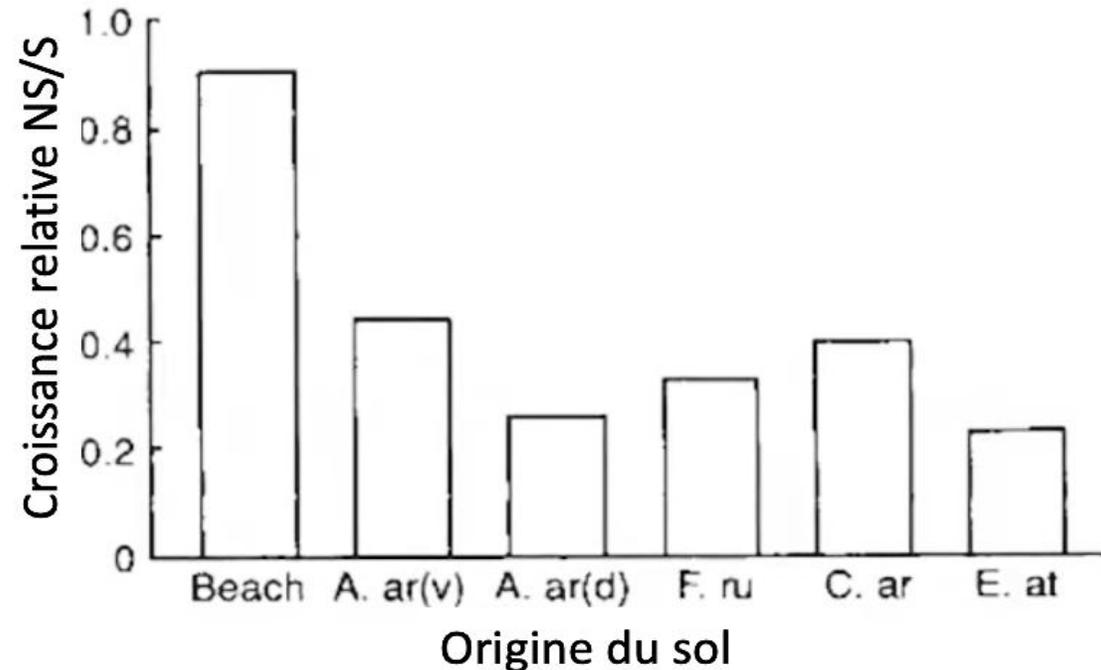
Facilitation microbienne et dynamique de la végétation : importance des microorganismes

Effet **Janzen Conen** : importance des micro-organismes dans la dynamique de la végétation

Exemple : colonisation d'une dune



Succession de la colonisation des dunes :
sable nu => Oyat => Fétuque => Carex => Chiendent



Effet de la microflore du sol sur la croissance de l'Oyat

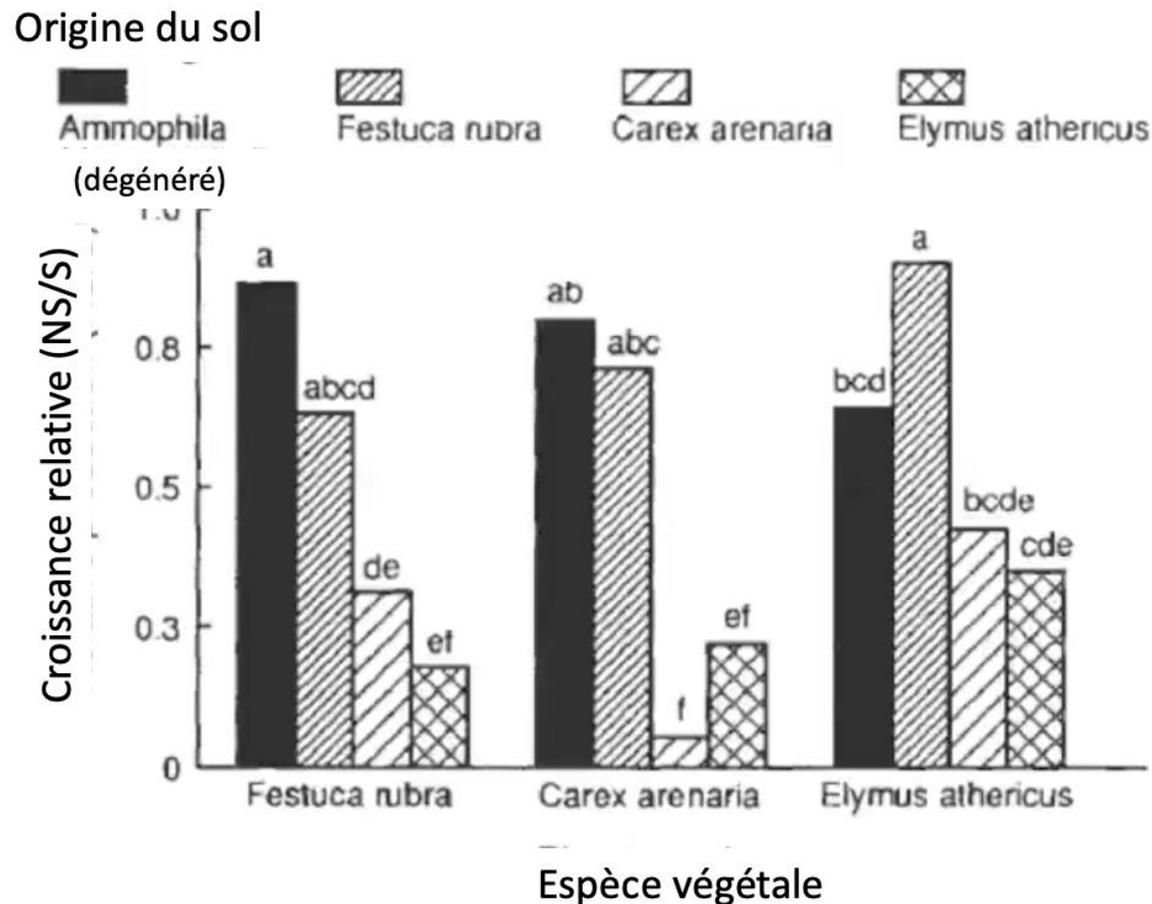
Beach = plage ; A. ar(v) : zone externe à *Ammophila arenaria* dominant, vigoureux ; A. ar(d) : zone interne à *Ammophila arenaria* vieilli, en perte de dominance ; F. ru : zone à *Festuca rubra* dominant ; C. ar. : zone à *Carex arenaria* dominant ; E. at. : zone à *Elymus athericus* dominant.

Différents paramètres nutritifs des sols

Sol échantillonné sous :	Matière organique	N total (mg pour 100g)	P total (mg pour 100g)
<i>Am. arenaria</i>	0,3 (± 0) a	4,7 ($\pm 1,5$) a	10,3 ($\pm 0,6$) a
<i>Festuca rubra</i>	0,3 ($\pm 0,06$) a	5,7 ($\pm 1,2$) a	12,0 ($\pm 1,0$) b
<i>Carex arenaria</i>	0,6 ($\pm 0,06$) b	18,7 ($\pm 1,5$) b	13,3 ($\pm 0,6$) c
<i>Elymus athericus</i>	0,7 ($\pm 0,1$) c	26,3 ($\pm 2,1$) b	18,0 ($\pm 1,0$) d

Entre parenthèses, erreur standard à la moyenne. Les valeurs suivies de lettres différentes diffèrent à $P < 0,05$.

Production de biomasse par les différentes espèces végétales exprimée en croissance relative (croissance sur sol non stérilisé / croissance sur sol stérilisé). Les valeurs suivies de lettres différentes diffèrent à $P < 0,05$.



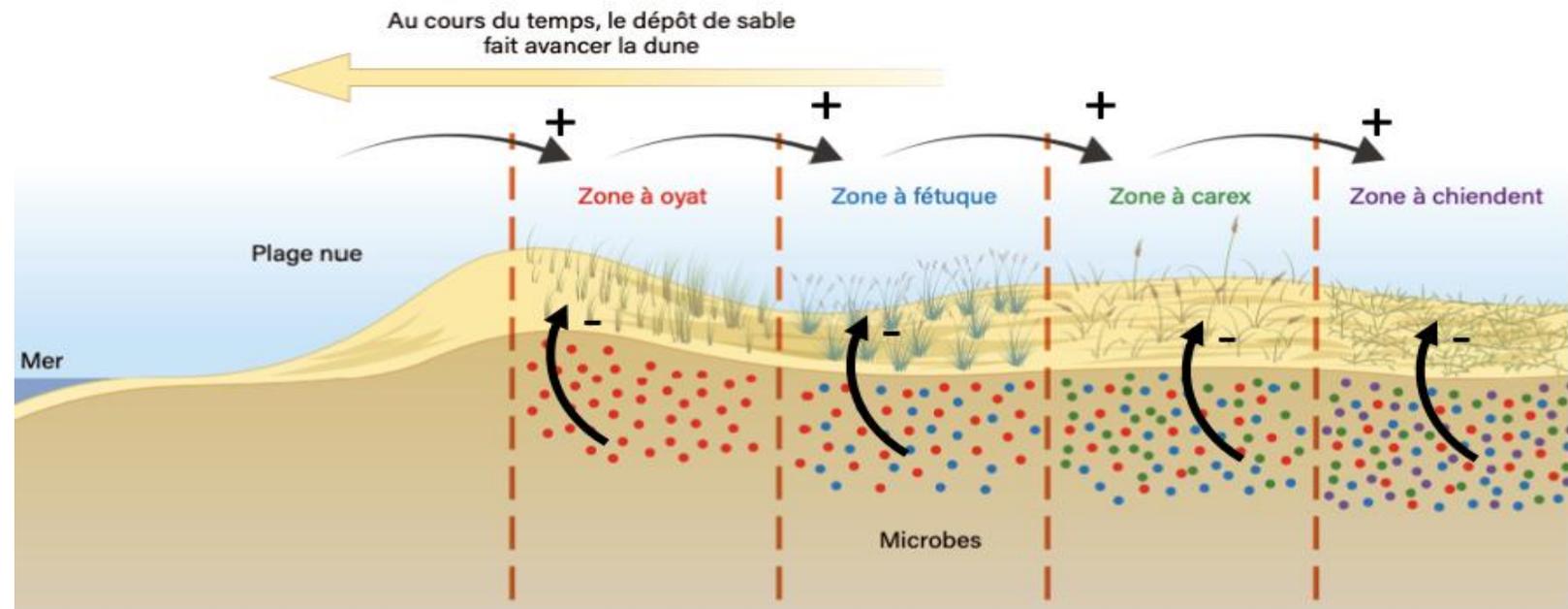
=> Une espèce pousse bien sur les sols qui précèdent sa présence mais moins bien dans ceux qui font suite au stade où elle a dominé.

Facilitation microbienne et dynamique de la végétation : importance des microorganismes

Effet **Janzen Conen** : importance des micro-organismes dans la dynamique de la végétation

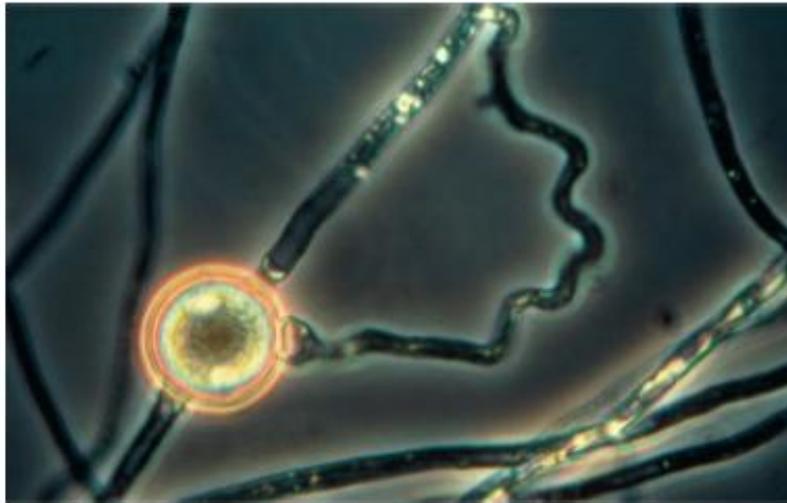
Exemple : colonisation d'une dune : **facilitation pour l'espèce suivante**

Importance des microorganismes du sol dans la succession végétale (modifié d'après Sélosse, Pour la Science, n°528, Octobre 2021)
Au cours de la colonisation d'une dune, une succession végétale a lieu. Chaque espèce attire ses propres pathogènes (points de même couleur que son titre). En diminuant la vigueur de la plante, ils favorisent l'installation de la plante suivante dans la succession.



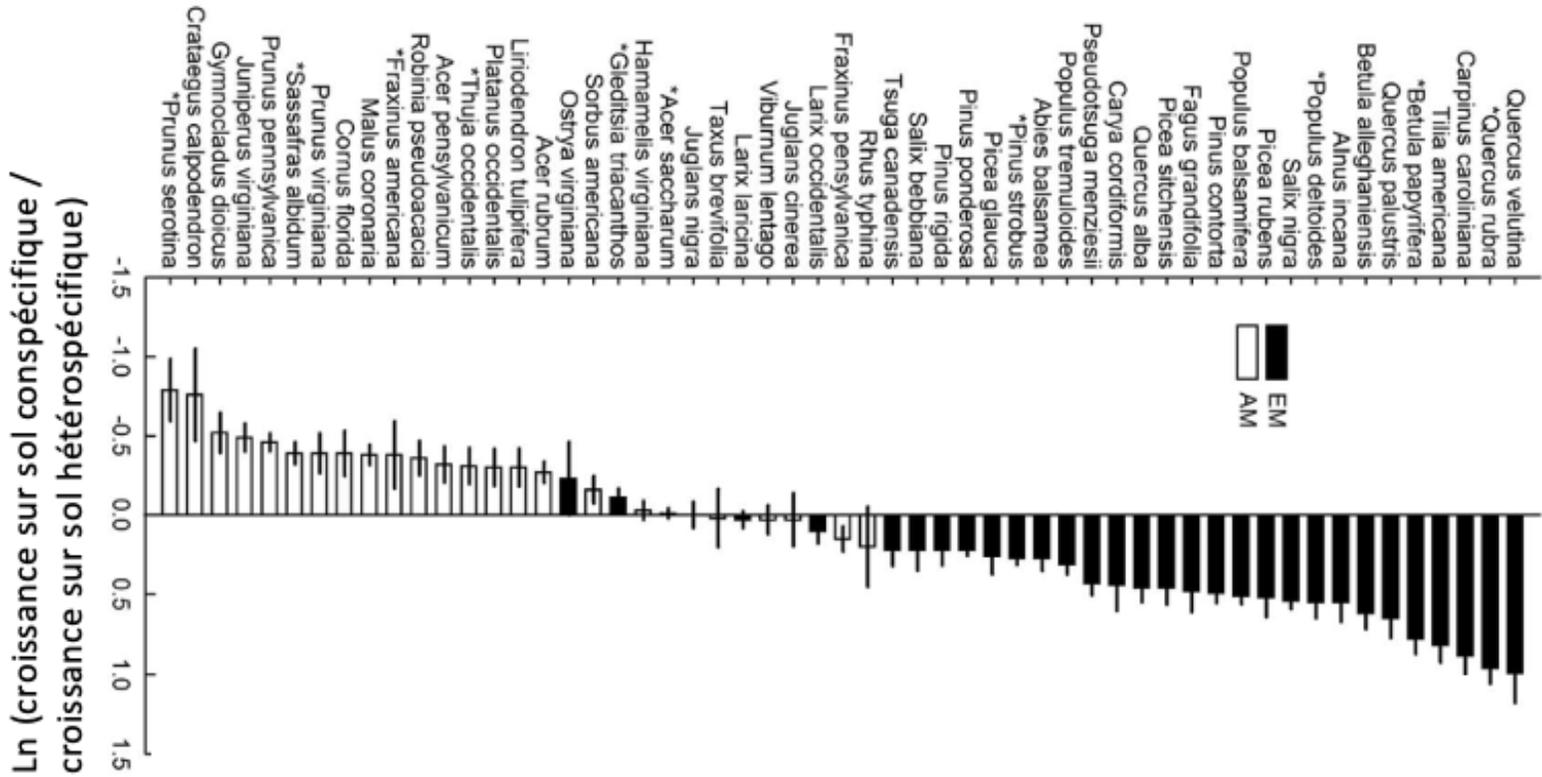
Effet Janzen Connell inversé dans les forêts tempérées

Pythium : champignon oomycète parasite défavorable aux végétaux (à gauche) ; Cenococcum : ectomycorhize sur racine (à droite)



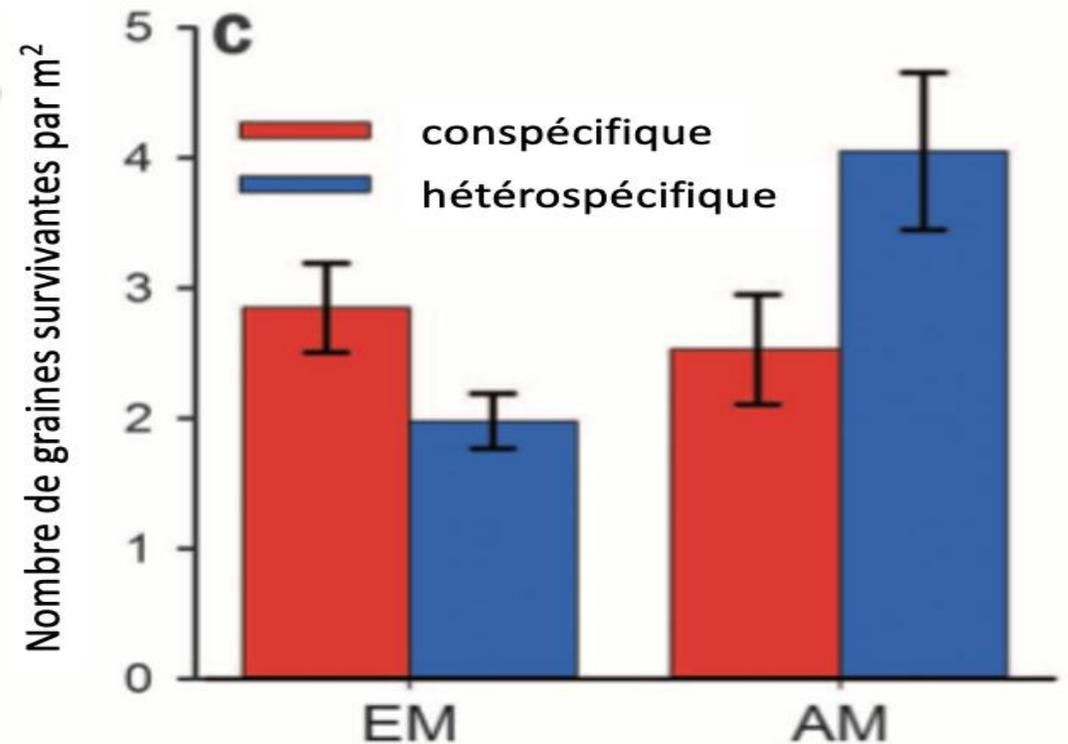
Croissance de différentes espèces d'arbres en fonction du sol utilisé

La croissance a été évaluée après culture sur un sol prélevé sous la même essence (sol conspécifique) ou sous une autre essence (sol hétérosppécifique). Les rectangles noirs correspondent à des arbres possédant des ectomycorhizes et les rectangles blancs des arbres possédant des endomycorhizes.



Nombre de graines survivantes en fonction de la nature des mycorhizes.

Le nombre de graines a été évalué en fonction de la nature de la mycorhize présentée par l'espèce (EM = ectomycorhize ; AM = endomycorhize) et selon que la mycorhize provienne de la même espèce (conspécifique) ou d'une espèce différente (hétérosécifique).



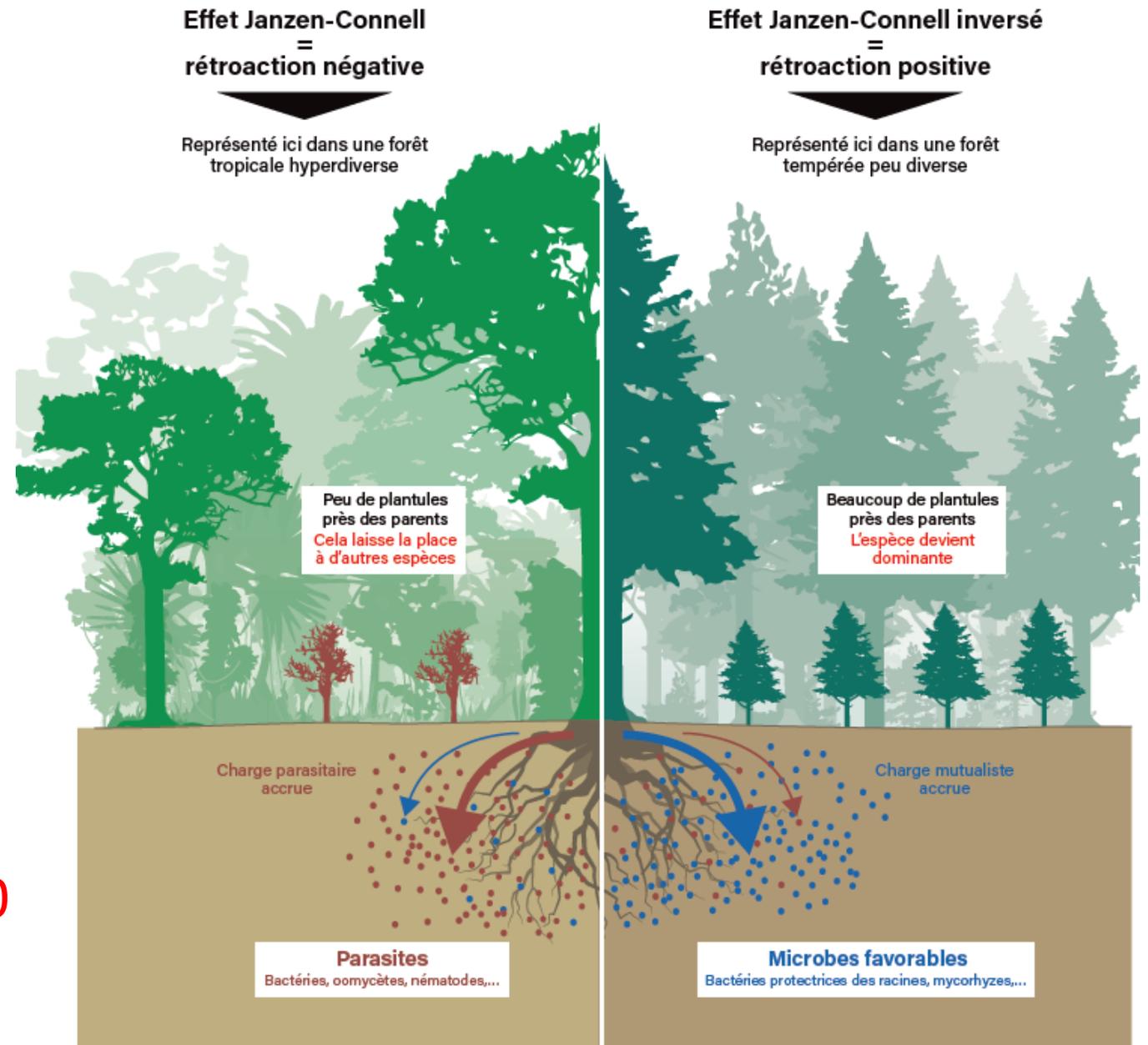
Sol et biodiversité

Si **endomycorhizes** :
charge parasitaire
accrue et **biodiversité**

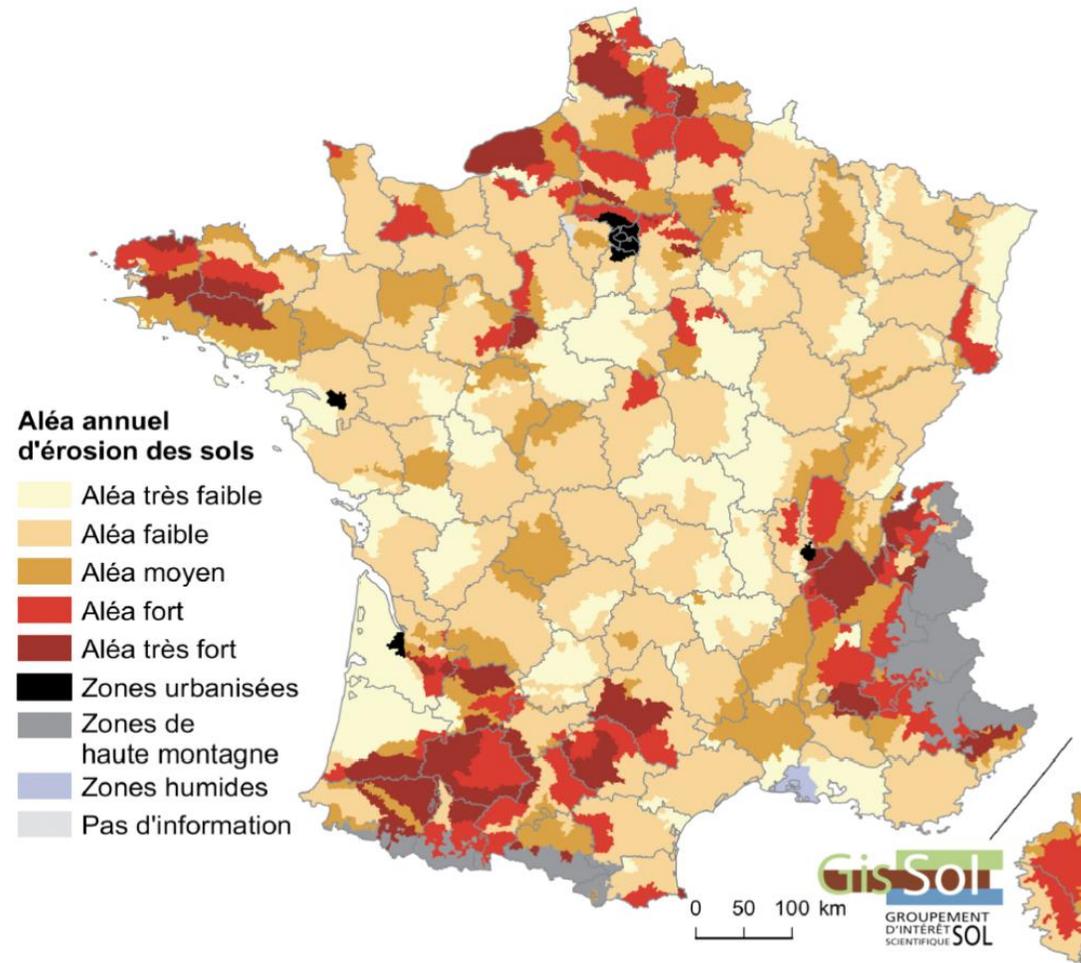
Forte : effet JC > 0

Si **ectomycorhizes** :
favorise une espèce
qui devient dominante

Biodiversité faible : Effet JC < 0



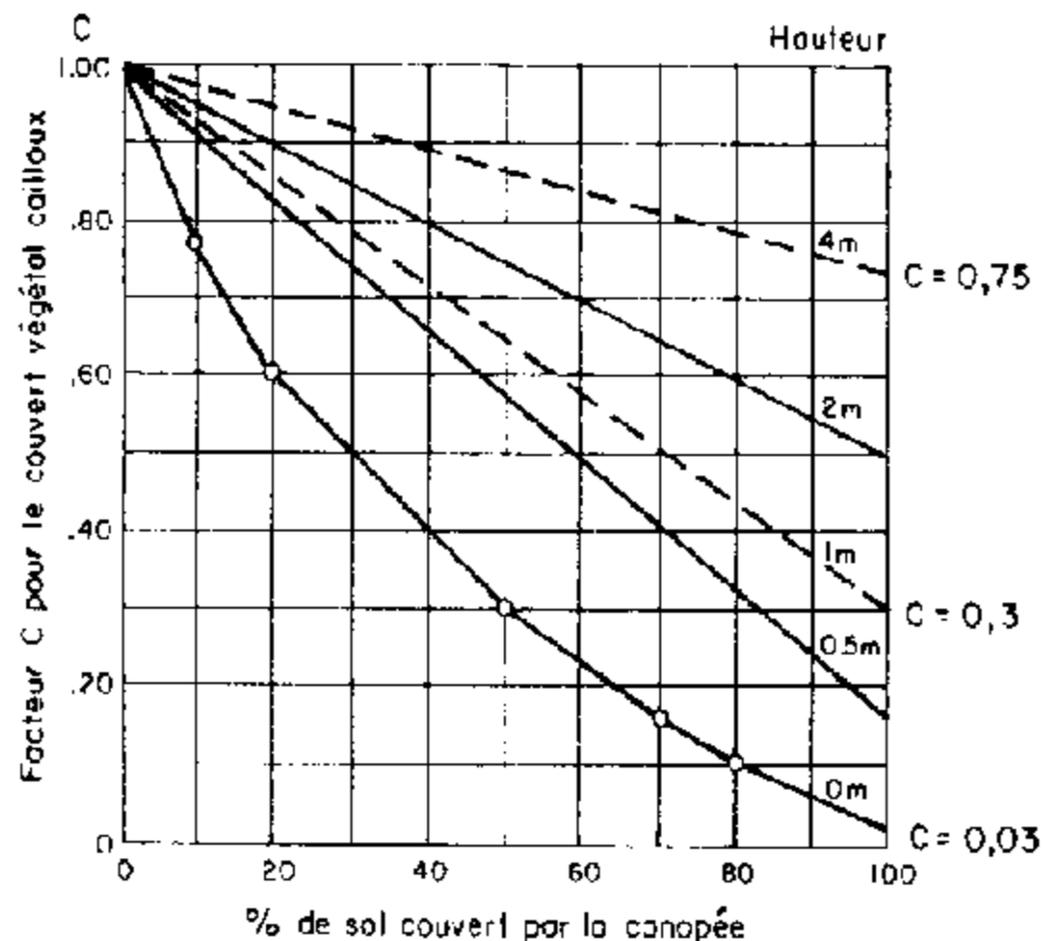
L'érosion naturelle des sols : évolution régressive



L'aléa d'érosion des sols en France (source : Gis Sol-Inra-SOes, 2011)

Influence du couvert végétal sur l'érosion du sol, études réalisées en Côte d'Ivoire (d'après Wischmeier et Smith, 1978)

Le facteur C quantifie l'érosion de la parcelle par rapport à l'érosion d'une parcelle laissée nue. On constate que l'érosion est fonction non seulement du couvert végétal mais aussi de la hauteur de celui-ci : Lorsque le couvert végétal est de 100% mais qu'il se trouve à 4 mètres de hauteur, l'érosion est de 75% d'une parcelle nue. En revanche, dans le cas d'une litière (hauteur du couvert végétal = 0), l'érosion n'est que de 30% d'une parcelle nue alors que le sol n'est couvert qu'à 50%.



BG-B-2. Les enjeux de la gestion des sols

BG-B-2. Les enjeux de la gestion des sols

Gestion des sols = travail par l'homme



Nombreux facteurs de dégradation des sols

Nombreux facteurs de dégradation :

Pente

Eau

Vent

Travail par des engins agricoles

Piétinement

Lien avec 3.3 : labour ou non



2.1 Impact des pratiques agricoles : exemple du labour profond

Exemple du labour

USA 1930/1940 : tempêtes de poussière provoquée par les labours (ici : 1935)

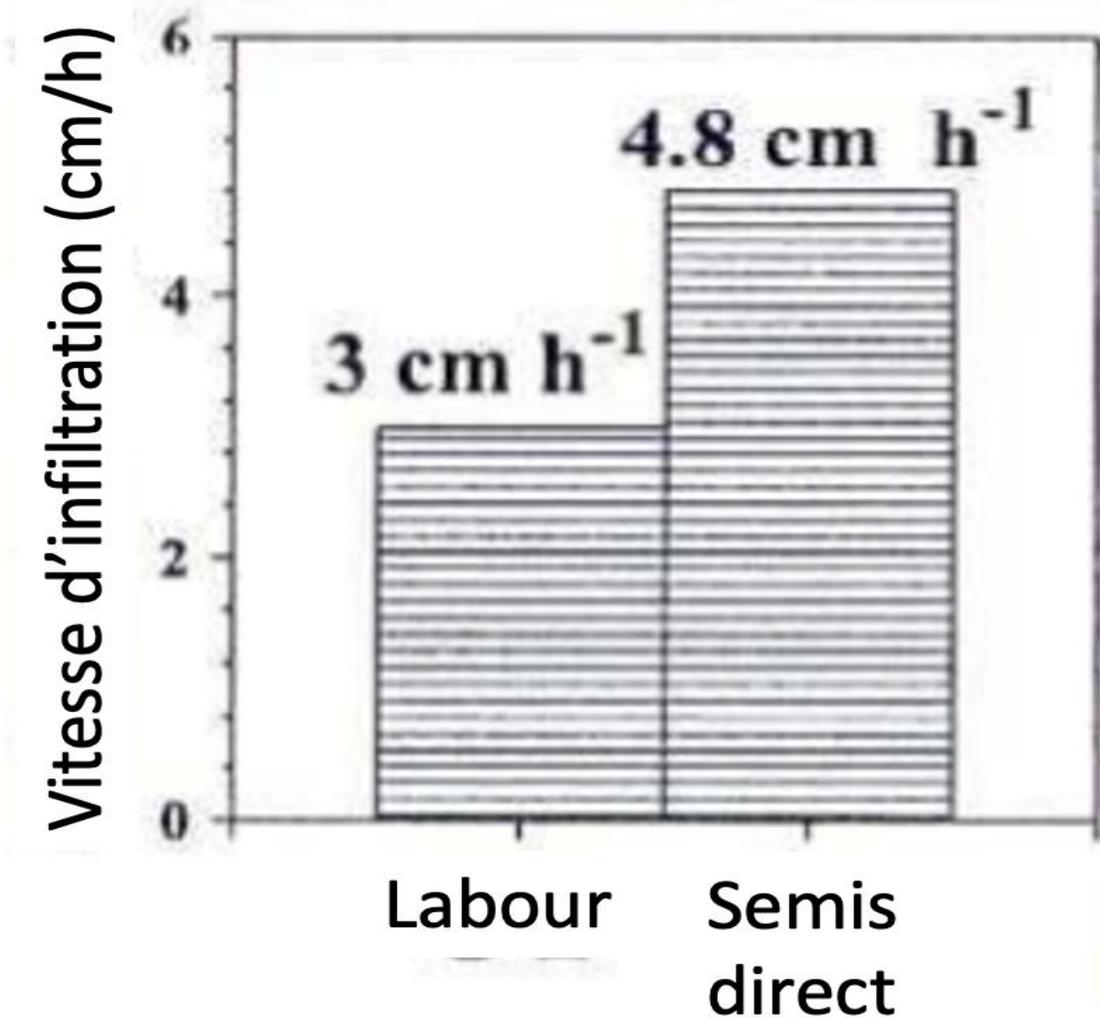


Problème du tassement

Compactage des sols



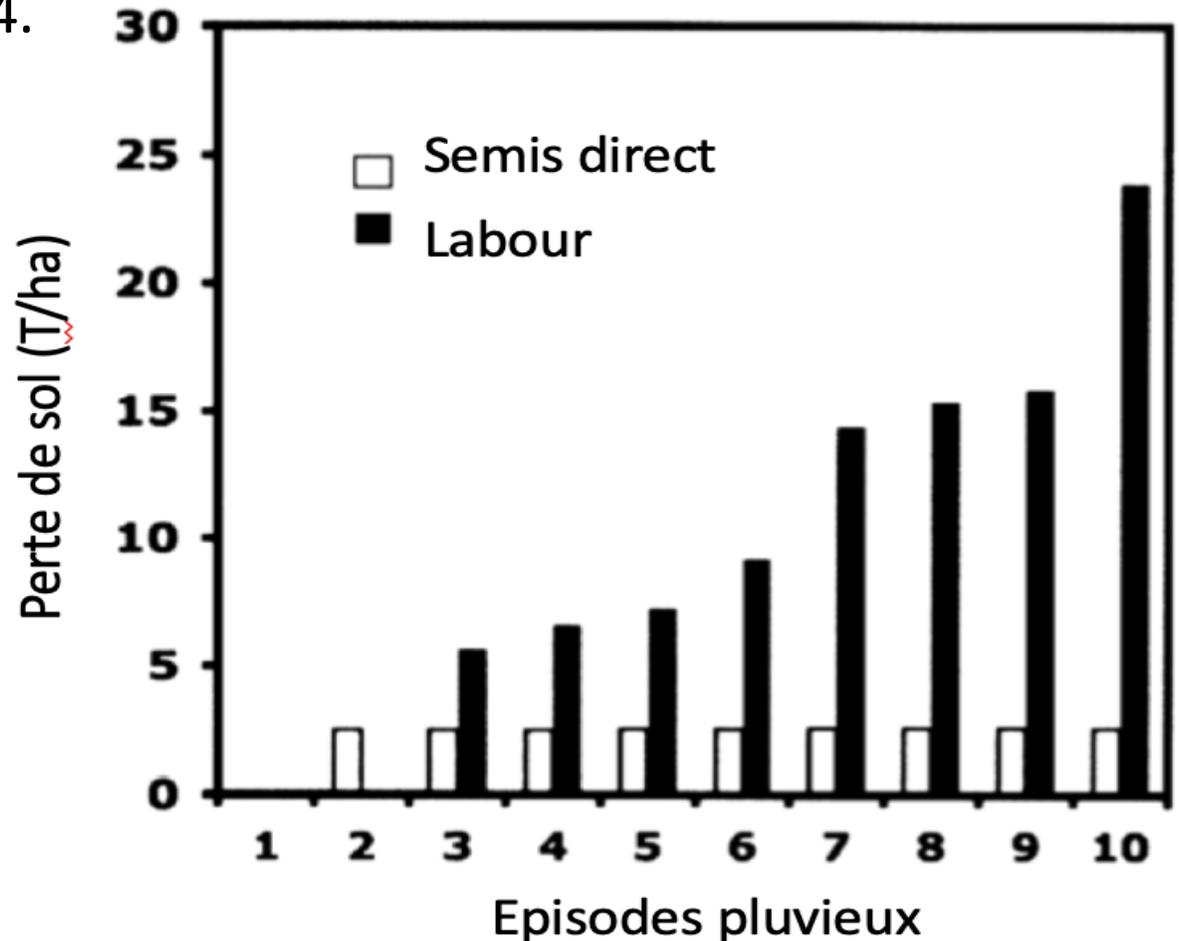
Infiltration de l'eau dans le sol en fonction de la pratique culturale (mesurée par un infiltromètre avec un volume de 100 mL d'eau) Modifié d'après Arshad *et al.*, 1999.



Comment le labour profond impacte-t-il l'infiltration de l'eau dans le sol ?

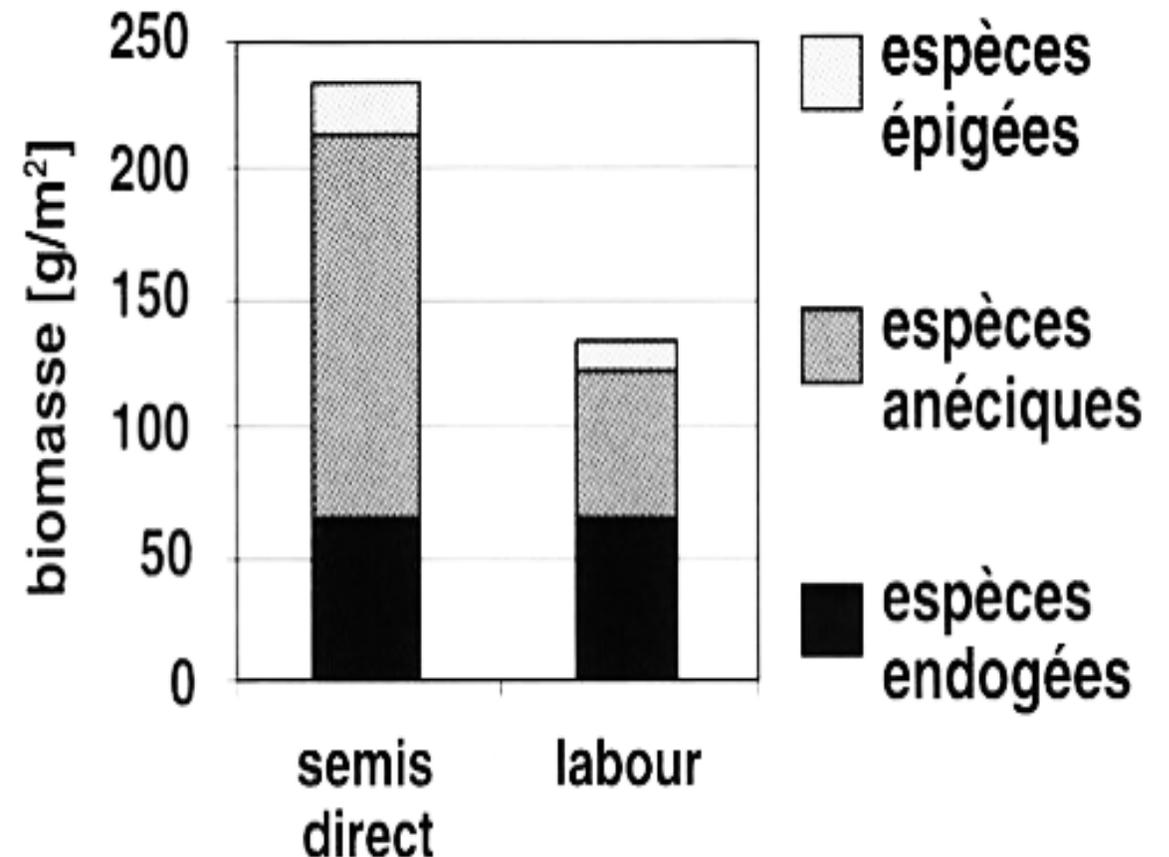
Perte de sol cumulée en fonction de la pratique culturale entre 1970 et 1973. La perte de sol est évaluée par la quantité de matière perdue en Tonne par hectare) Les événements de 1 à 10 sont des épisodes pluvieux ayant généré du ruissellement et donc potentiellement de l'érosion hydrique. Modifié d'après Harrold et Edwards, 1974.

Quelle est la conséquence de la non-infiltration de l'eau dans un sol labouré ?



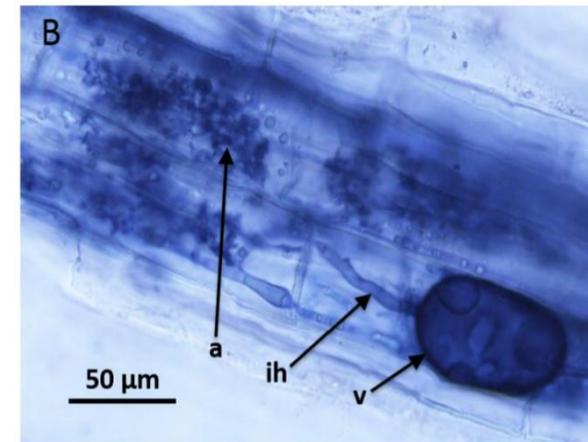
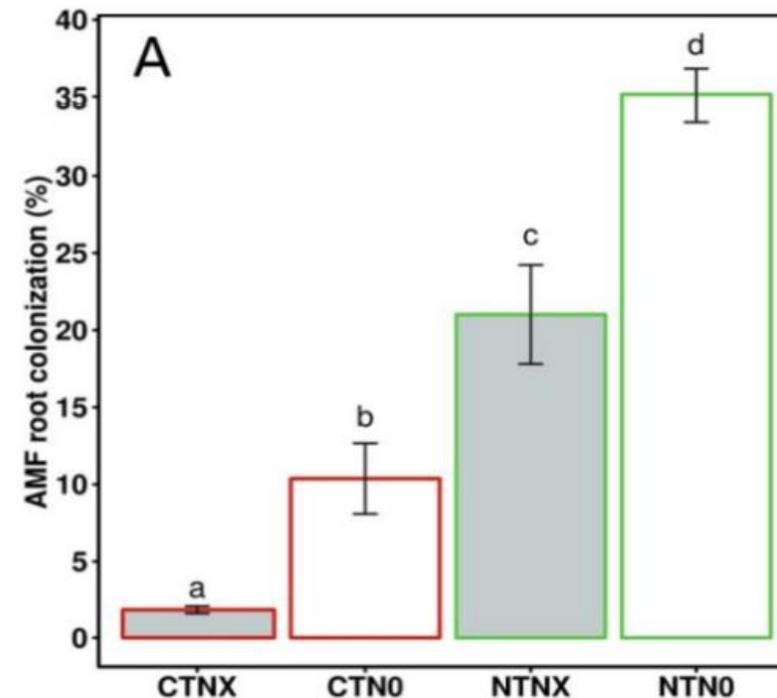
Le labour réduit significativement la biomasse des vers anéciques, mais n'intervient que peu ou pas du tout sur la biomasse des vers épigés et endogés. Or, les espèces anéciques sont celles qui brassent le sol et entraînent en profondeur la matière organique indispensable à la formation des complexes argilo-humiques.

Quelle est la conséquence de la pratique culturale sur les différentes espèces de vers de terre ? Établissez un lien avec la formation des complexes argilo-humiques dans le sol



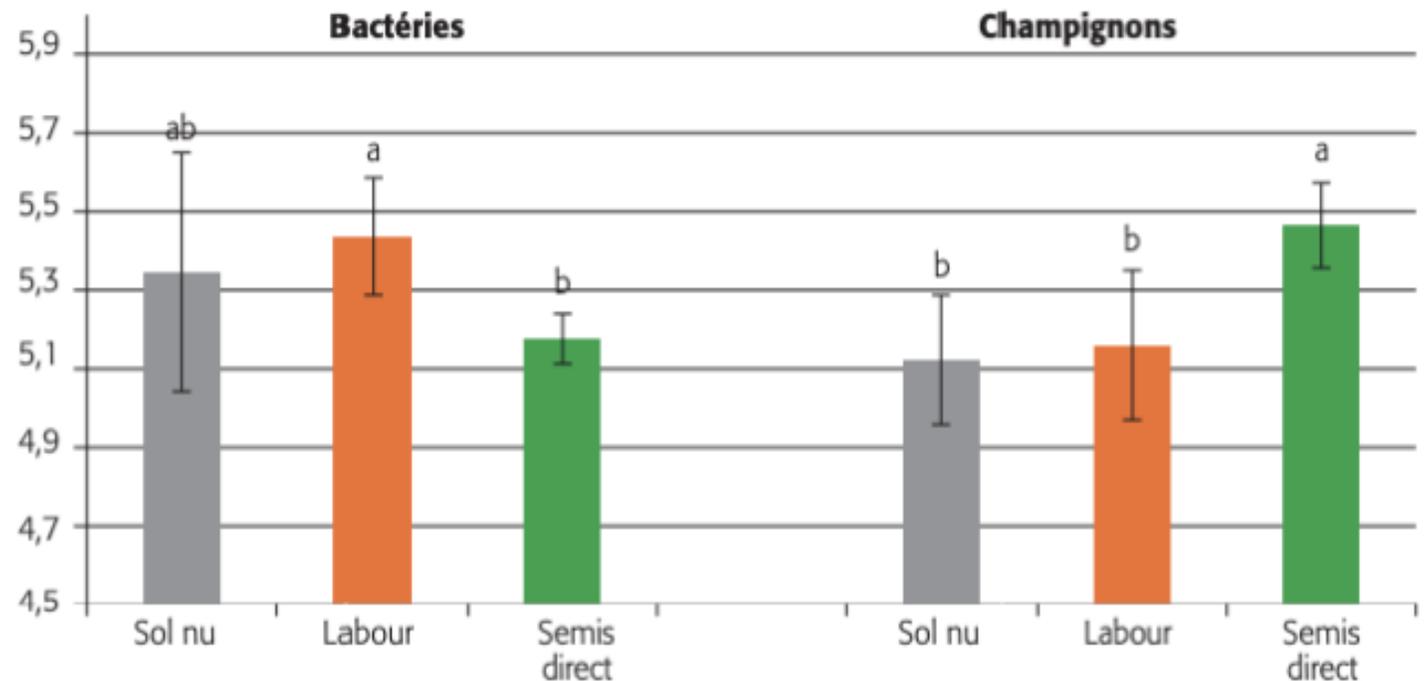
Effet des pratiques culturales et de la fertilisation azotée sur la mise en place des endomycorhizes A. CT = labour, NT = semis direct, NX = avec fertilisation azotée, N0 = sans fertilisation azotée. B. Racine de blé colonisée par une endomycorhize (a : arbuscule, ih : hyphe intraracinaire, v : vésicule).
D'après thèse de Julien Verzeaux, 2017.

Quelle est la conséquence de la pratique culturale et de l'apport d'une fertilisation azotée sur la colonisation des racines par des mycorhizes ?



Effet des pratiques culturales sur les communautés de micro-organismes du sol : mesure de la diversité biologique par l'indice de Shannon. D'après Bouthier et al., Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable, éditions Quae, 2014, pp. 85-108. Chaque barre présentant une lettre différente d'une autre indique une différence significative. L'indice de Shannon permet de quantifier la biodiversité, plus cet indice est grand, plus grande est la biodiversité.

Comment la microflore du sol est-elle impactée par les pratiques culturales ? Quelle conséquence cela peut-il avoir sur la vie du sol ?



Comment la faune du sol est-elle impactée par les pratiques culturales ? Quelle conséquence cela peut-il avoir sur la vie du sol ?

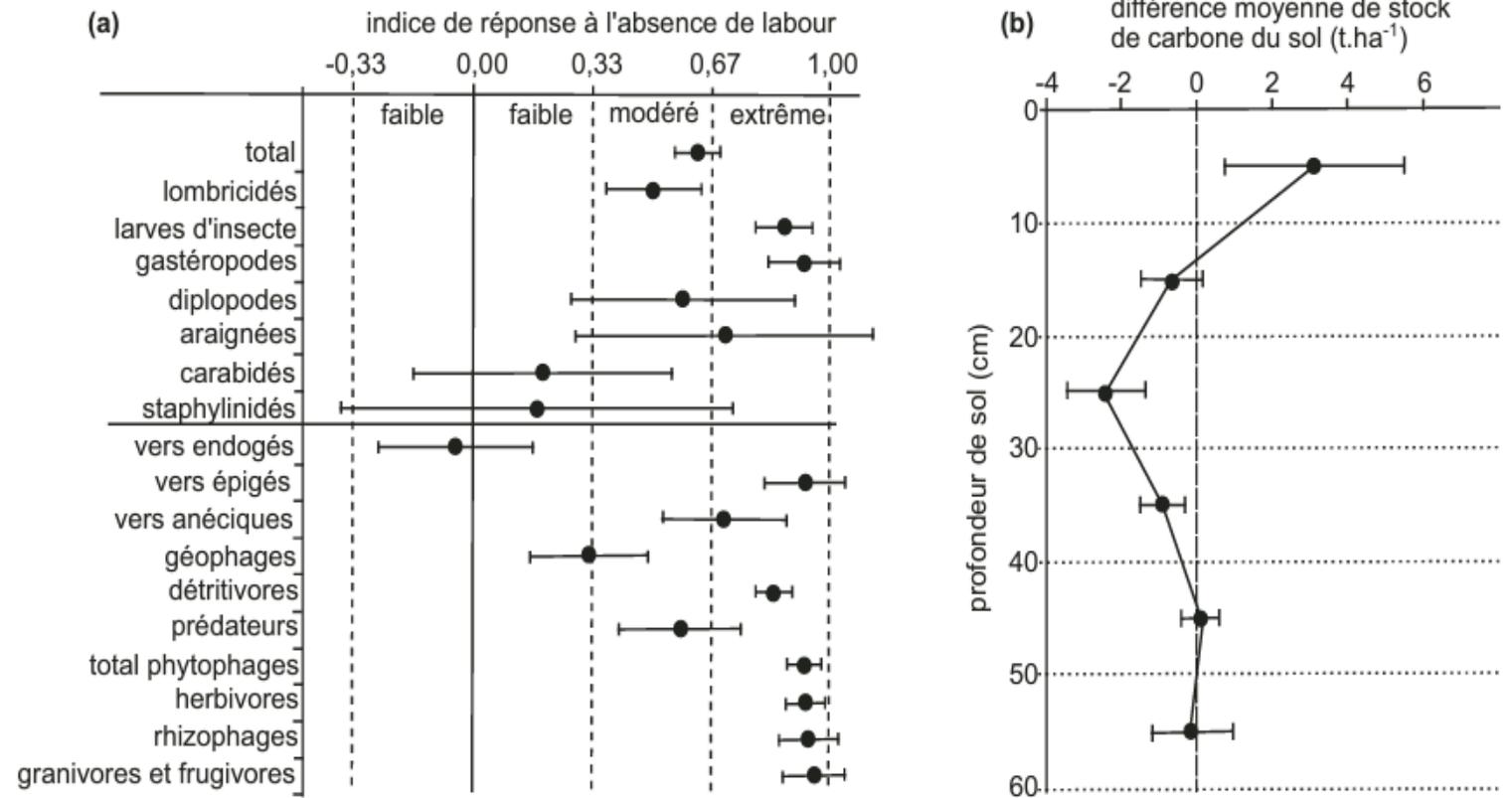


Figure 26.5 Impacts du labour sur la pédofaune (a) et le stock de carbone (b).

(a) D'après Bouthier, Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique, à partir des données de Henneron et al., 2015, *Agronomy for Sustainable Development* 35. Une valeur positive indique une plus grande abondance du groupe concerné en agriculture de conservation par rapport à l'agriculture conventionnelle.

(b) D'après Luo Z. & al, 2010, in *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139. Une valeur positive indique un contenu en carbone plus important dans le système sans labour par rapport au système conventionnel.

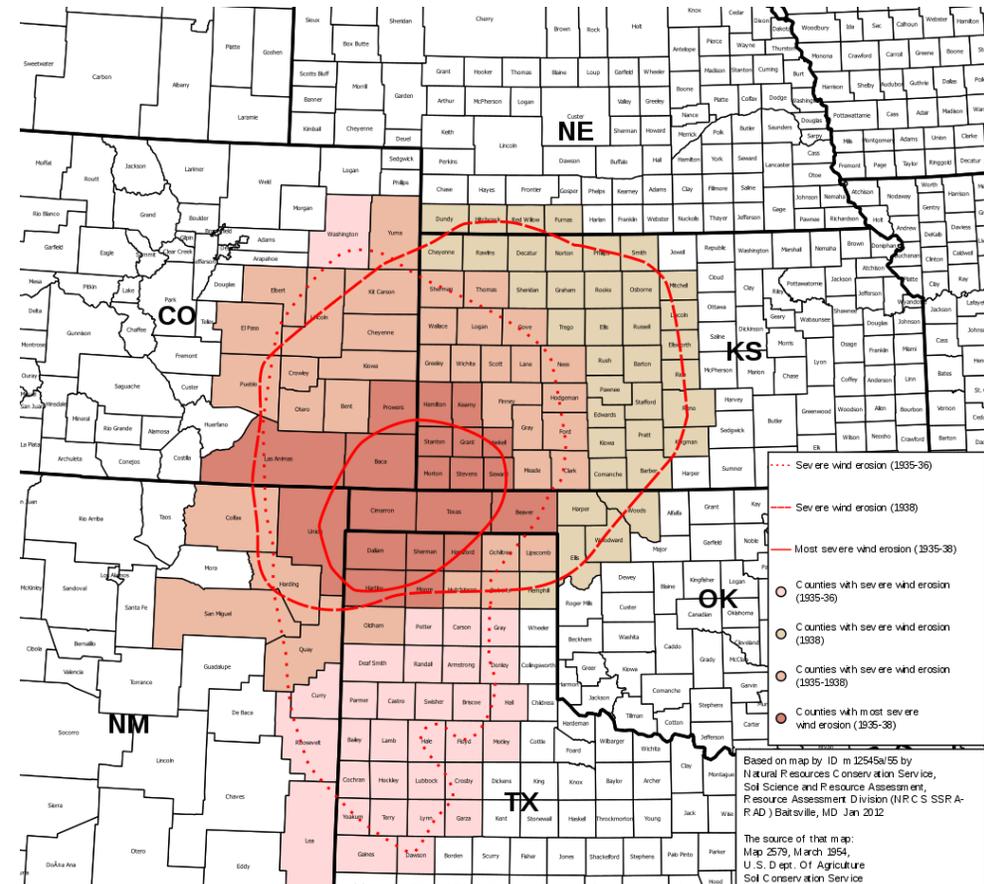
Le **Dust Bowl** (« bassin de poussière ») est une région à cheval sur l'Oklahoma, le Kansas et le Texas, touchée dans les années 1930 par la sécheresse et une série de tempêtes de poussière provoquant une catastrophe écologique et agricole.

Dust Bowl

Région de Dallas 1936



Etats concernés

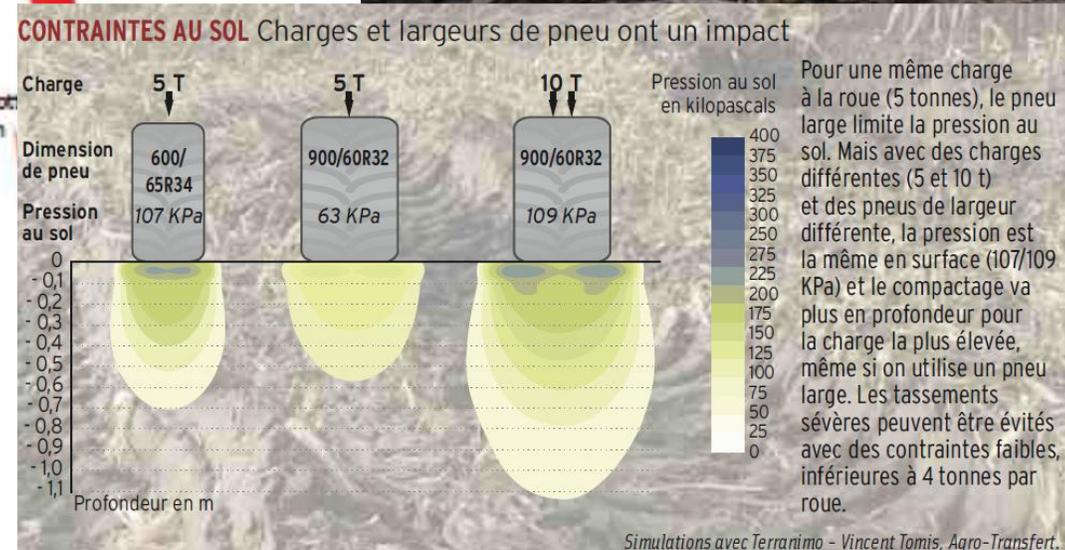


Parmi les dangers du labour : tassement du sol

Tassement



- | Friable et très poreux
(notées Γ gamma) | Modérément tassé | Sévèrement tassé
(notées Δ delta) |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Majorité d'agrégats biologiques • Mottes colonisées par les racines • Rupture très facile des mottes à la main • Face de rupture rugueuse | <ul style="list-style-type: none"> • Peu de porosité visible • Rupture facile des mottes à la main • Face de rupture peu rugueuse | <ul style="list-style-type: none"> • Sans porosité visible • Pas ou très peu de racines dans la motte • Rupture difficile des mottes à la main • Face de rupture lisse • Peut être accompagné de zones de réduction |



2.2. Artificialisation des sols

Artificialisation : 24 000 hectares (1 ha = 10 000 m²) par an....

Site officiel : <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-artificialisation>

Artificialisation des sols



Le Mardi 28 novembre 2023

Sur la décennie précédente, 24 000 hectares d'espaces naturels, agricoles et forestiers ont été consommés chaque année en moyenne en France, soit près de 5 terrains de football par heure. Tous les territoires sont concernés : mais en particulier 61% de la consommation d'espaces est constatée dans les territoires sans tension immobilière. Les conséquences sont écologiques (érosion de la biodiversité, aggravation du risque de ruissellement, limitation du stockage carbone) mais aussi socioéconomiques (coûts des équipements publics, augmentation des temps de déplacement et de la facture énergétique des ménages, dévitalisation des territoires en déprise, diminution du potentiel de production agricole etc.).

Artificialisation

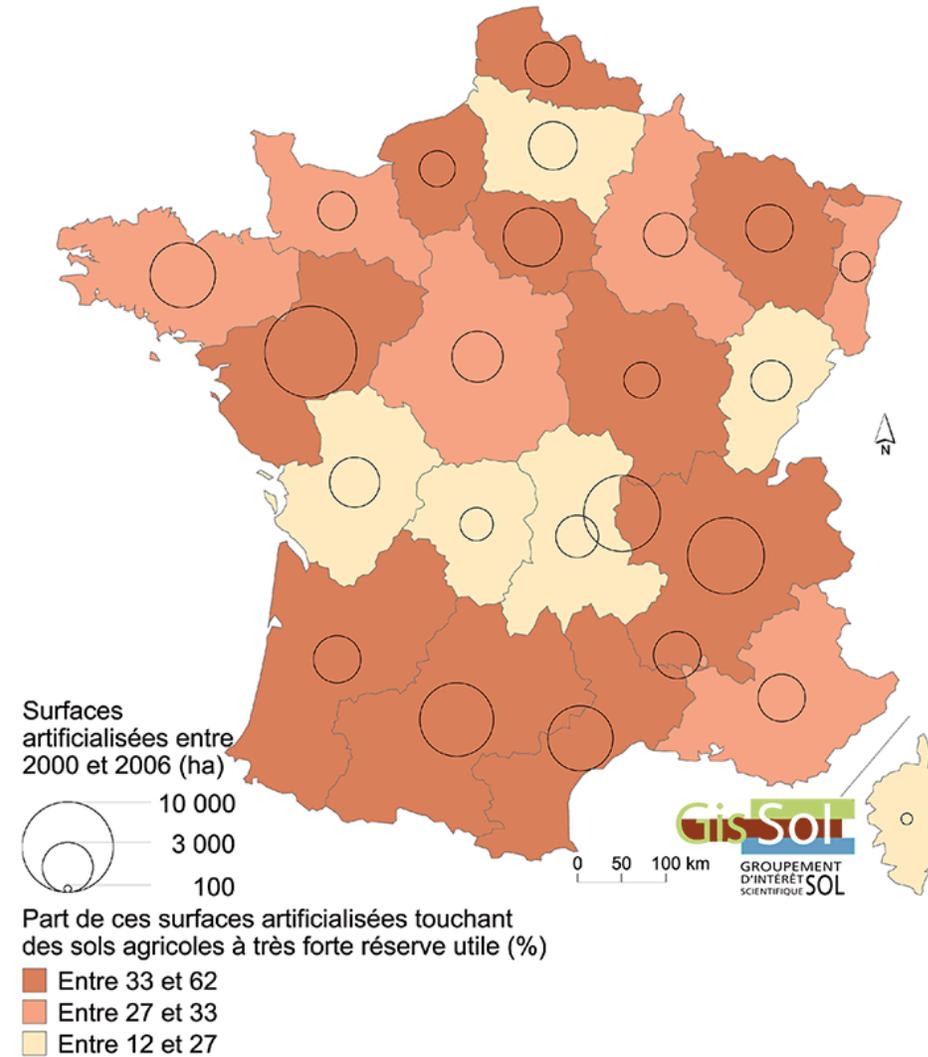
% de pertes de surfaces agricoles utiles :

Jaune claire : 12 à 27 %

Maron claire : 27 à 33 %

Maron foncé : 33 à 62 %

La pression de l'artificialisation entre 2000 et 2006 sur les sols agricoles à très forte réserve utile en eau



Source : SOeS-Gis Sol, 2010.

Traitements : SOeS, 2010.

Mesure 2009-2022

Portail officiel : <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-artificialisation>



Consommation d'espaces entre le 1er janvier 2009 et le 1er janvier 2022

Portail de
l'artificialisation des sols

Visualisation des flux de consommation d'espace pour la période de 2009 à 2022

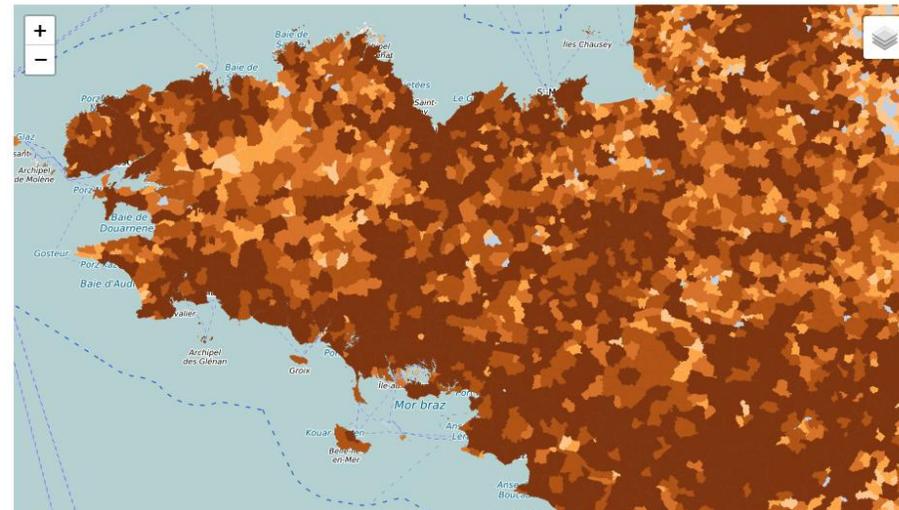
Consommation d'espace pour la période 2009-2022 (m²)

légende

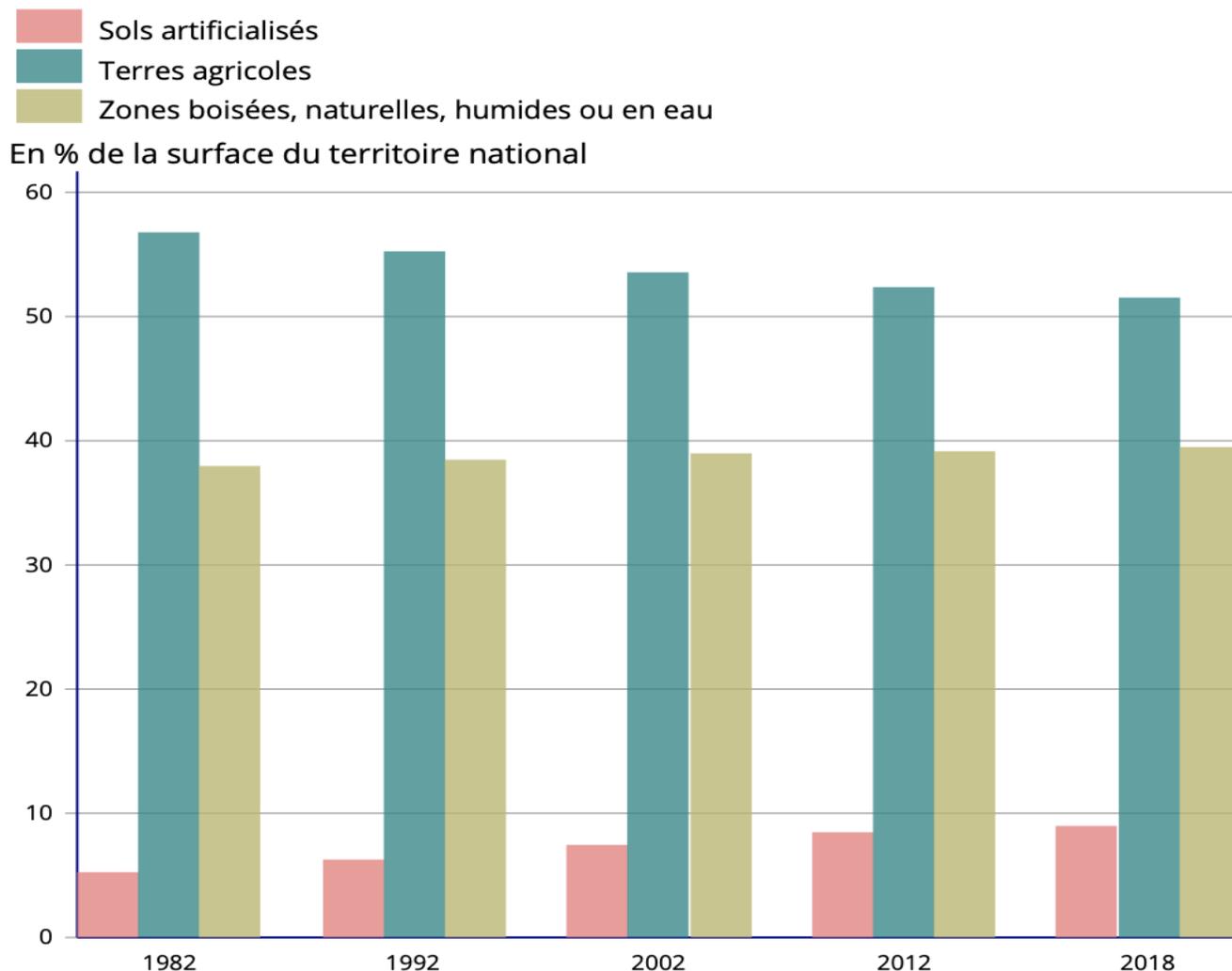
- de 0 à 10 000 m² (entre 0 à 1 ha)
- de 10 000 à 20 000 m² (entre 1 et 2 ha)
- de 20 000 à 50 000 m² (entre 2 et 5 ha)
- de 50 000 à 100 000 m² (entre 5 et 10 ha)
- de 100 000 à 200 000 m² (entre 10 et 20 ha)
- plus de 200 000 m² (plus de 20 ha)

Carte à afficher

- Consommation d'espace pour la période 2009-2022 (m²)
- Dont consommation à usage d'habitat 2009-2022 (m²)
- Dont consommation à usage d'activité 2009-2022 (m²)
- Taux d'espace consommé par rapport à la surface communale 2009-2022 (%)
- Variation population 2013-2019
- Variation ménages 2013-2019
- Variation emplois 2013-2019
- M² consommé / variation population (2013 à 2019)
- Evolution ménages / Ha consommé pour l'habitat (2013 à 2019)
- Evolution ménages+emplois / Ha consommé (2013 à 2019)



Choi



Evolution de l'artificialisation des sols en France métropolitaine D'après Agreste, enquêtes Teruti 1981-1990, Teruti 1992 – 2003 et Teruti-Lucas 2006 – 2015 raccordées sur la moyenne 2017-2018-2019 de la nouvelle enquête Teruti

Rappel TP

Comparaison
1950 /actuel



Dangers de l'artificialisation des sols

Dégradation des sols

Encadré 1 – Caractéristiques des Sols artificialisés, « Anthroposols » ou SUTMA.

Les sols artificialisés sont en général caractérisés par :

- une **extrême variabilité spatiale** ;
- la nature des **matériaux technogéniques** qu'ils contiennent, leur abondance et leur taille ;
- une **forte pierrosité** et des taux de compaction élevés ;
- une **faible capacité d'infiltration** et de rétention en eau (sauf sols végétalisés) ;
- des **pH élevés** pour les sols urbains et ceux des infrastructures de transport, **ou acides** pour les sols miniers et industriels ;
- des **teneurs en matière organique très variables** selon l'occupation et la genèse du sol considérées ;
- des **concentrations élevées** en métaux lourds (Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni) et en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ;
- des **concentrations souvent importantes de pesticides et de polluants émergents** (platinoïdes, retardateurs de flamme ou résidus médicamenteux).



Sol péri-urbain

Sol square et parc

Sol sous trottoir
urbanisation +

Augmentation du **risque d'inondation**

Du fait de **l'imperméabilisation** des sols

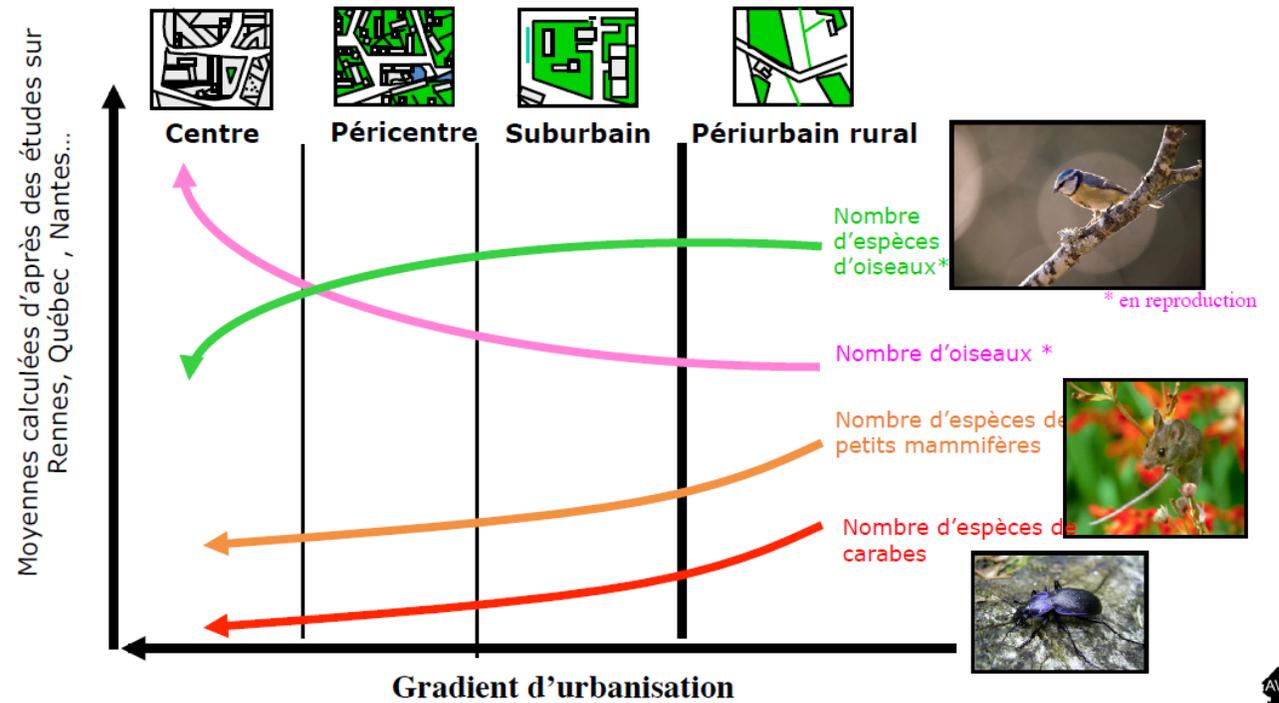


Conséquences nombreuses

Pertes de la biodiversité par destruction d'habitats

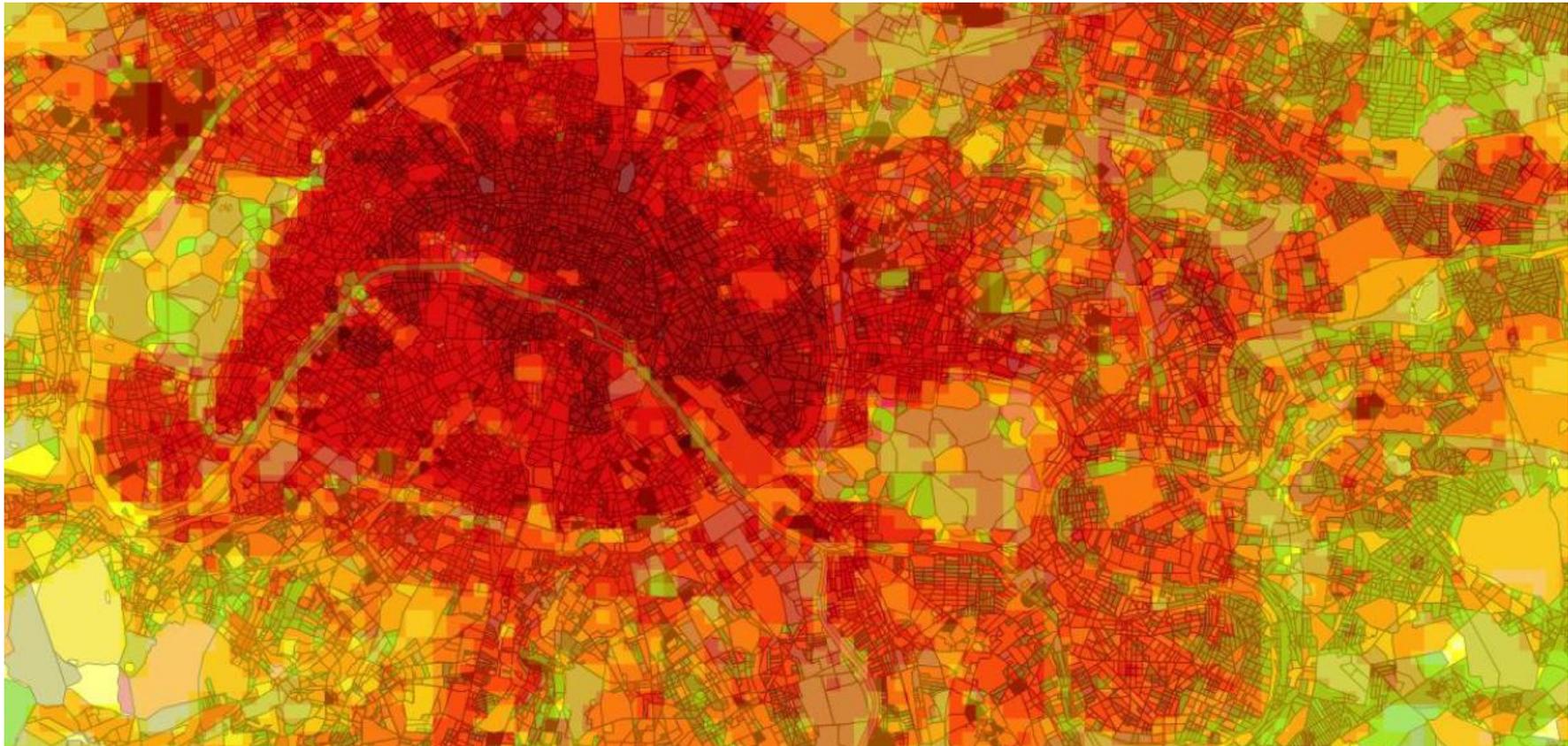


Étude de la biodiversité en milieu urbain (=10 ha)



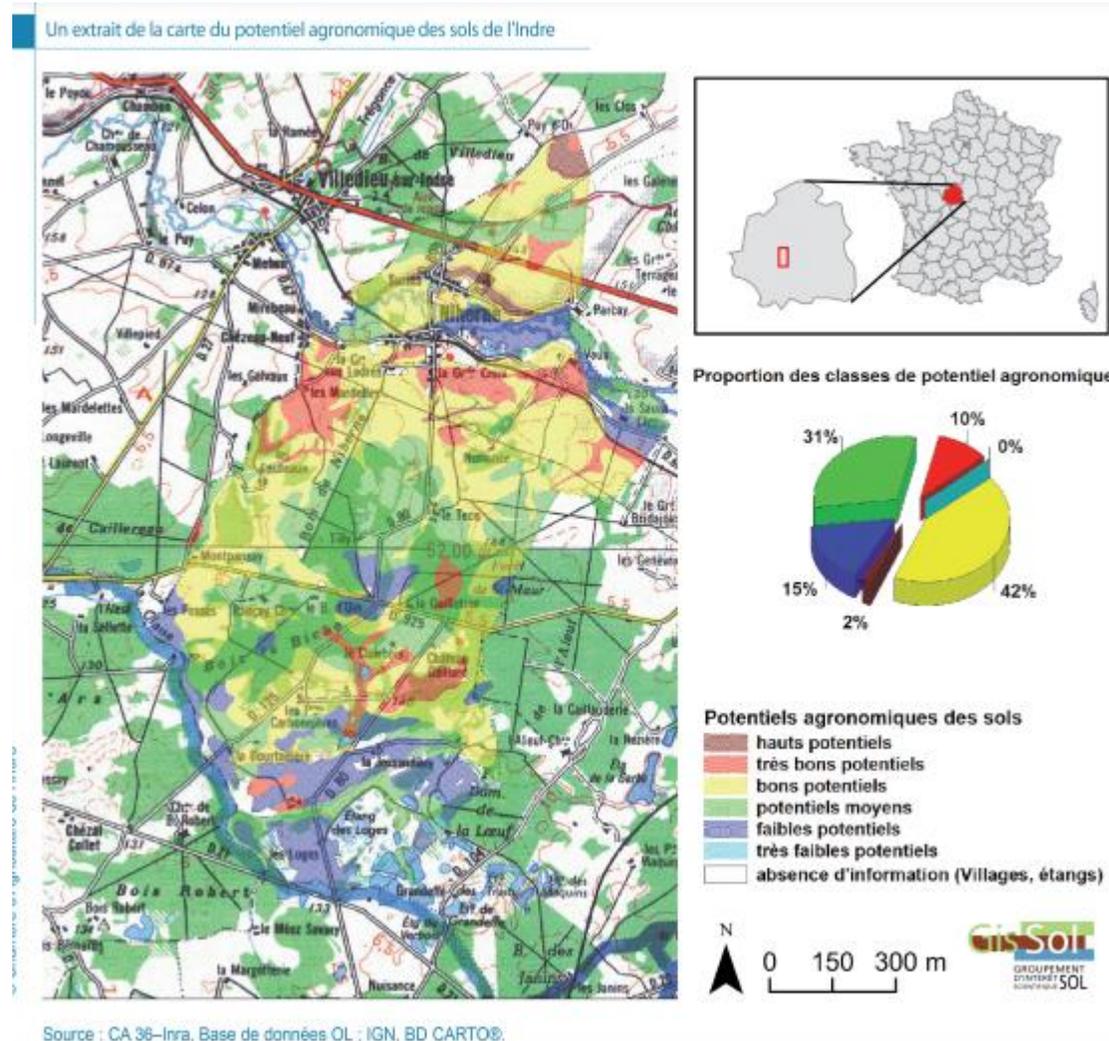
Réchauffement climatique, îlots de chaleurs urbains

Exemple de Paris en été



Réduction du potentiel agronomique des sols

Estimation
d'un potentiel
agronomique



Des solutions pour préserver les sols

Barrières brise-vent le long de la Volga en Russie

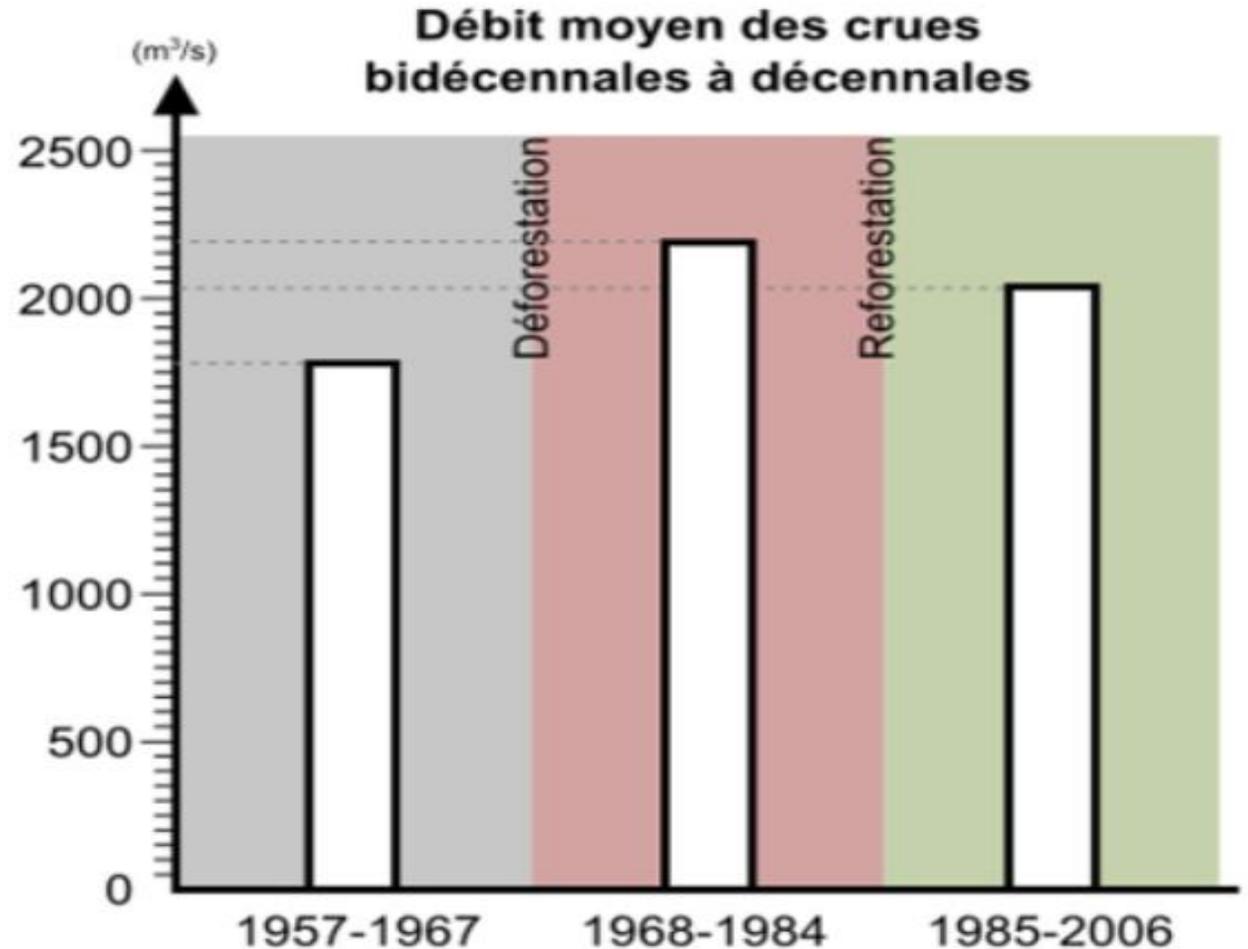
Barrières de 200 km de long plantées de trois rangées d'arbres, visibles par satellite. Plantées dans les années 1960, elles protègent les plaines de l'érosion éolienne (photo ISS050-E-52312, NASA)



Des solutions pour préserver les sols

Effet de la déforestation puis de reboisement sur le débit moyen des crues dans le bassin versant de la rivière Gan (affluent du Yangtze, Chine)

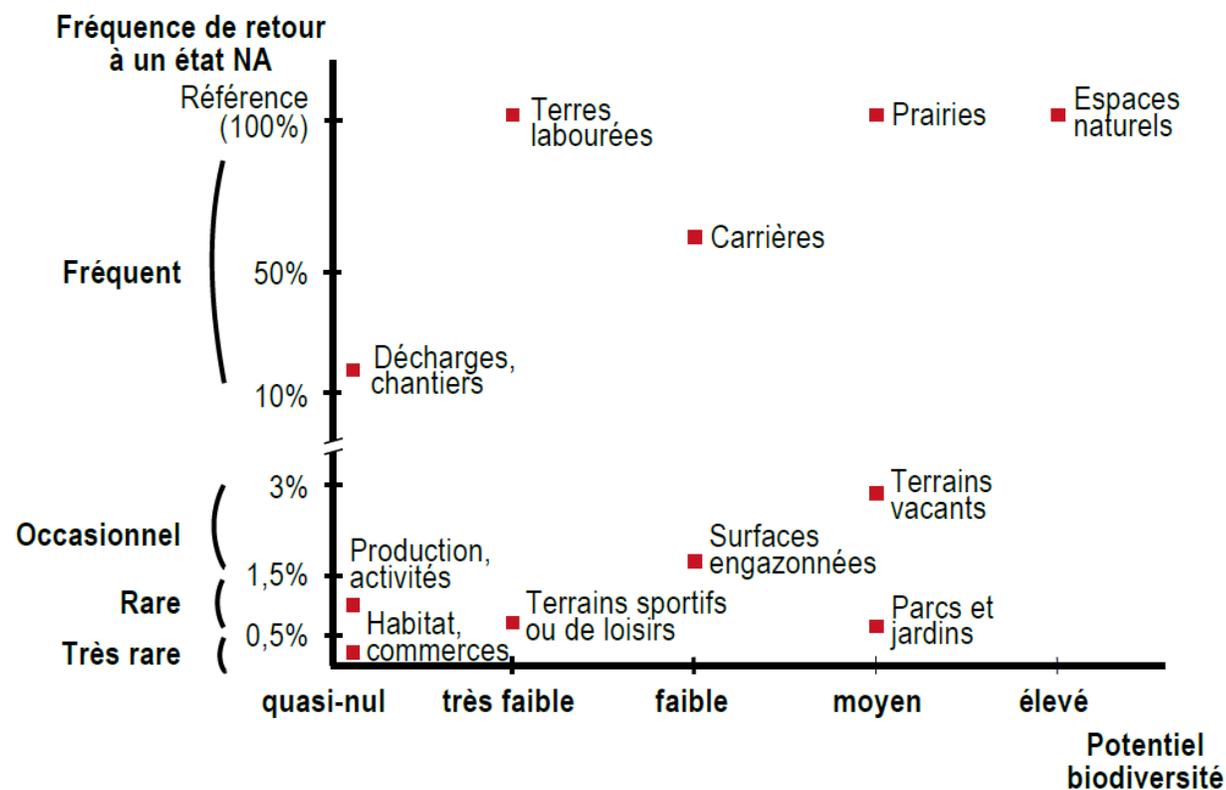
Dans les années 1960-1970, une partie du bassin versant a été déforestée pour des raisons agricoles. Puis, au vu des dégâts produits par les crues, la région a été reboisée à 77% de sa surface initiale dans les années 80. (D'après Lorin, 2018, adapté d'après Liu et al., 2015)



Un retour vers l'état naturel +/- difficile

Relation retour / degré d'artificialisation

Figure 3 : Potentiel biodiversité et réversibilité de différents usages du sol



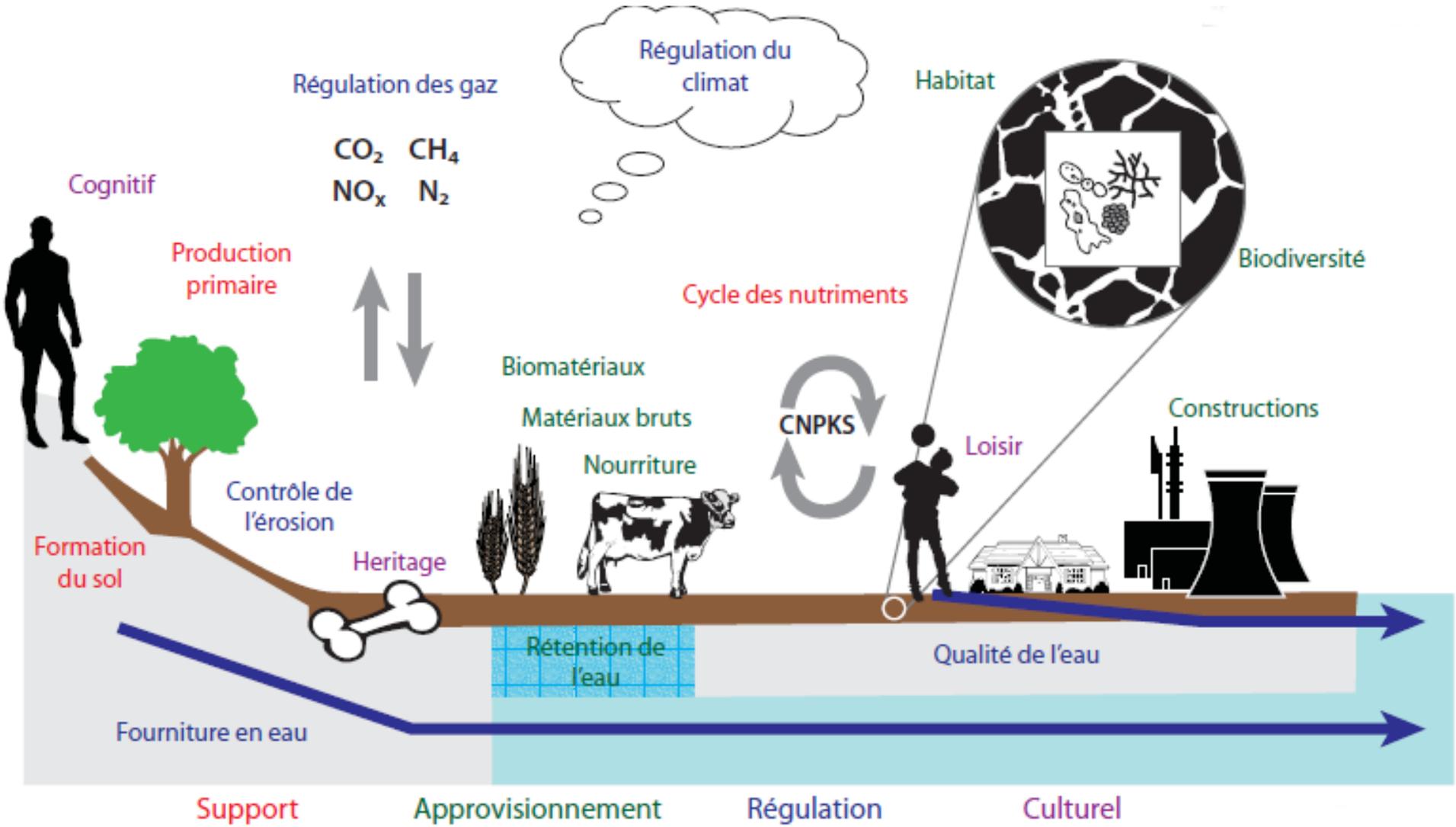
2.3 Notion de services écosystémiques

Définition : service écosystémique = bénéfices que les humains retirent des écosystèmes **sans avoir à agir** pour les obtenir



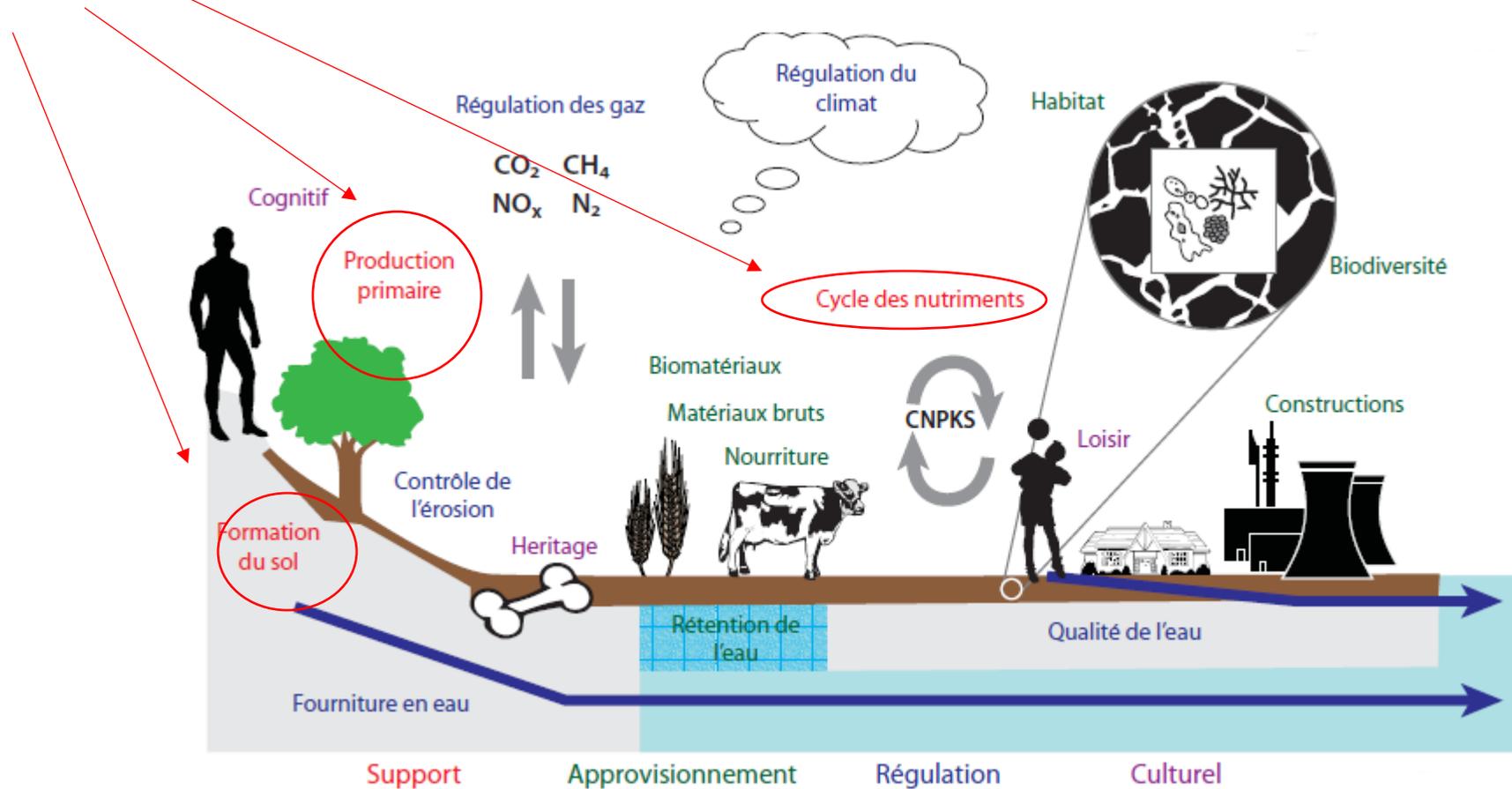
Ne pas confondre :
fonctions écologiques
et
services écosystémiques

Diversité des services rendus par les sols



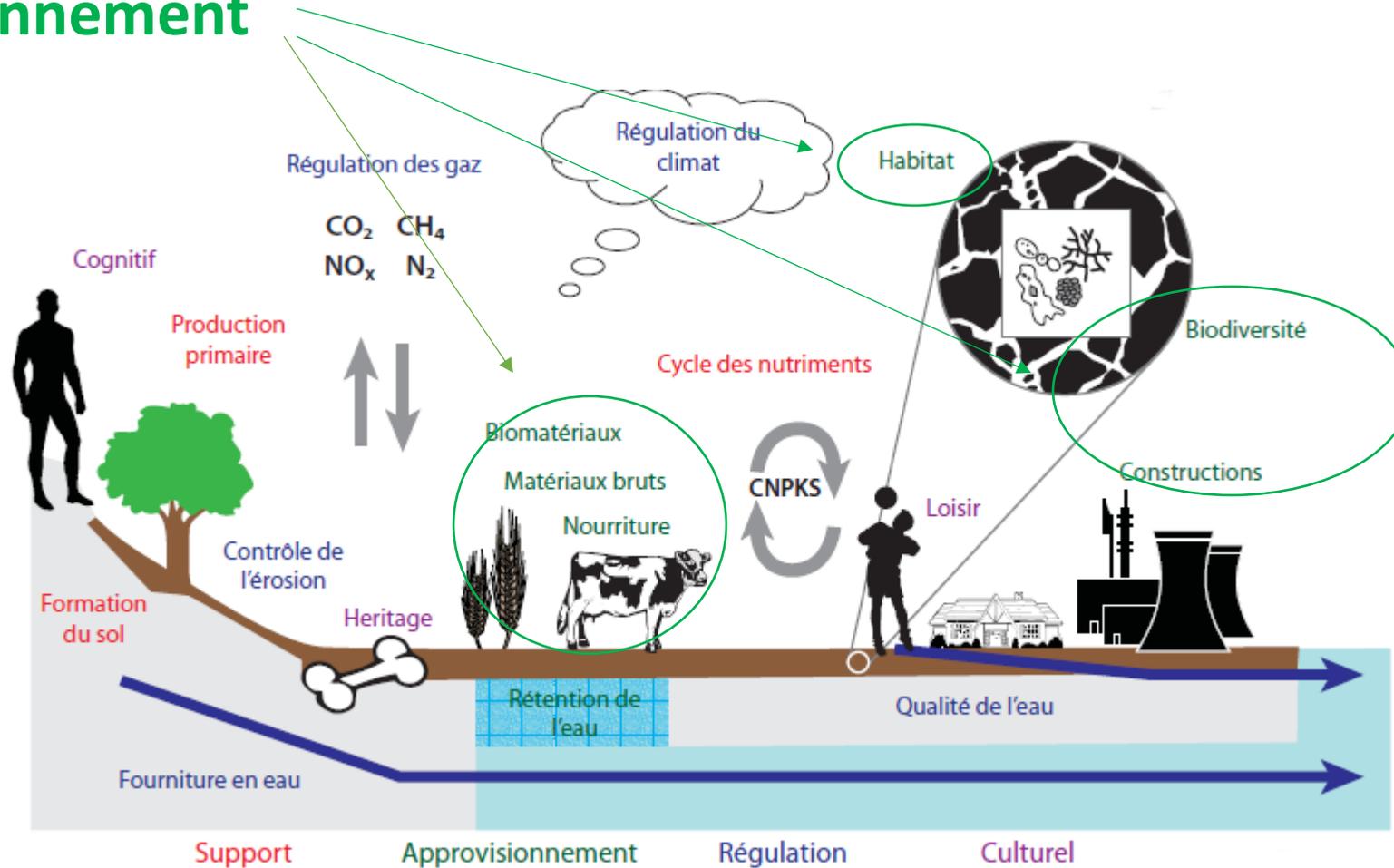
4 grandes catégories de services

Support = maintien



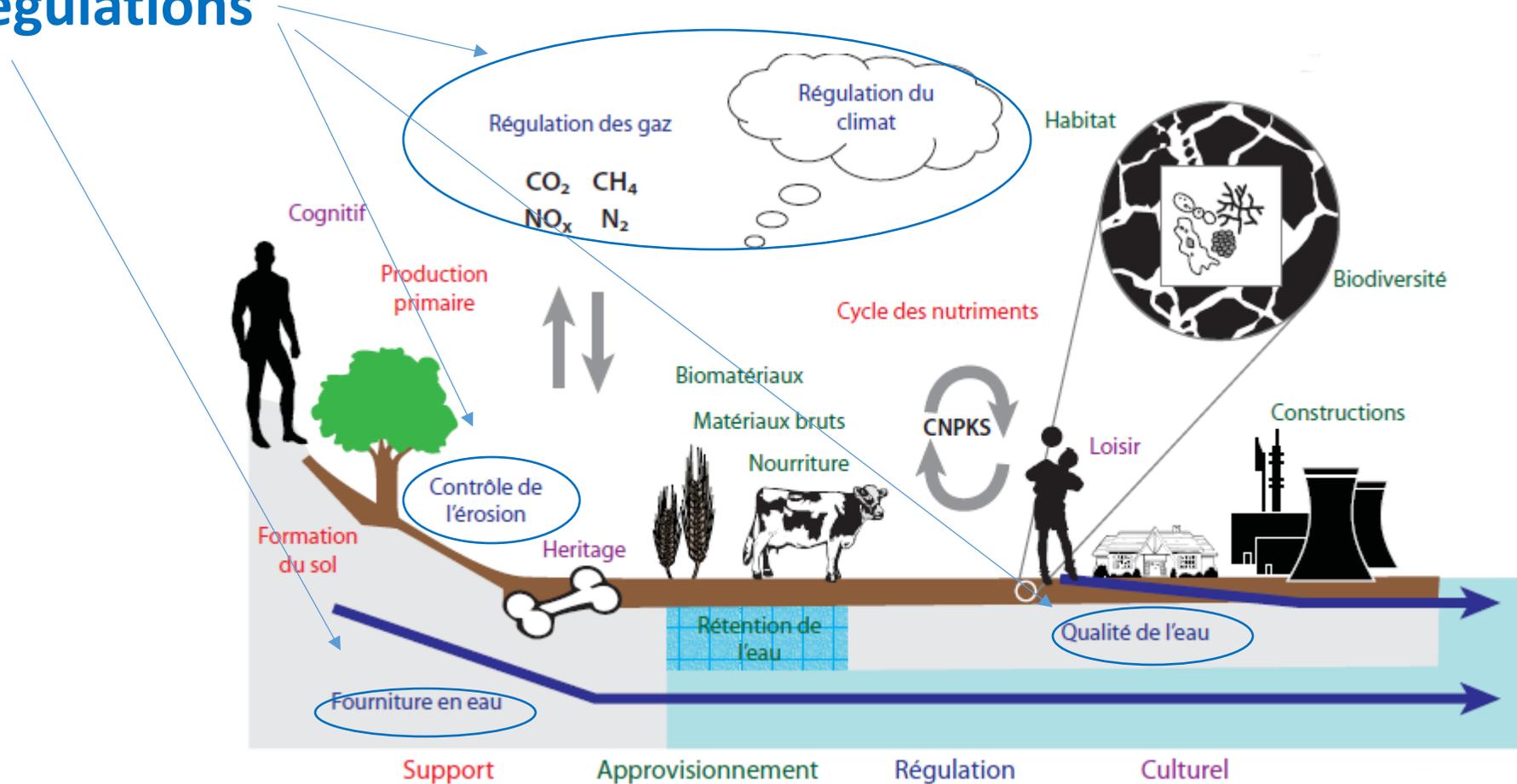
4 grandes catégories de services

Approvisionnement



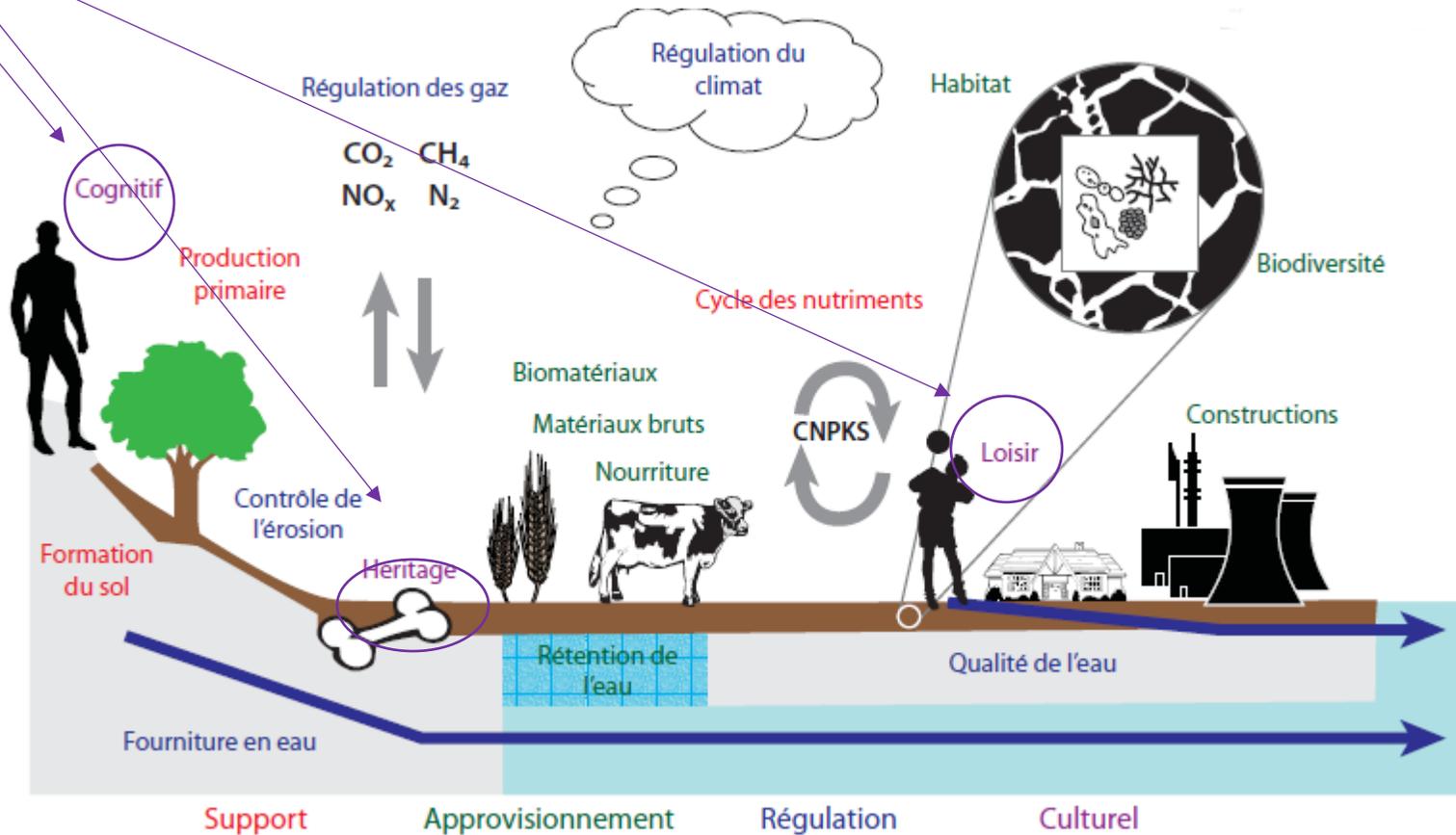
4 grandes catégories de services

Régulations

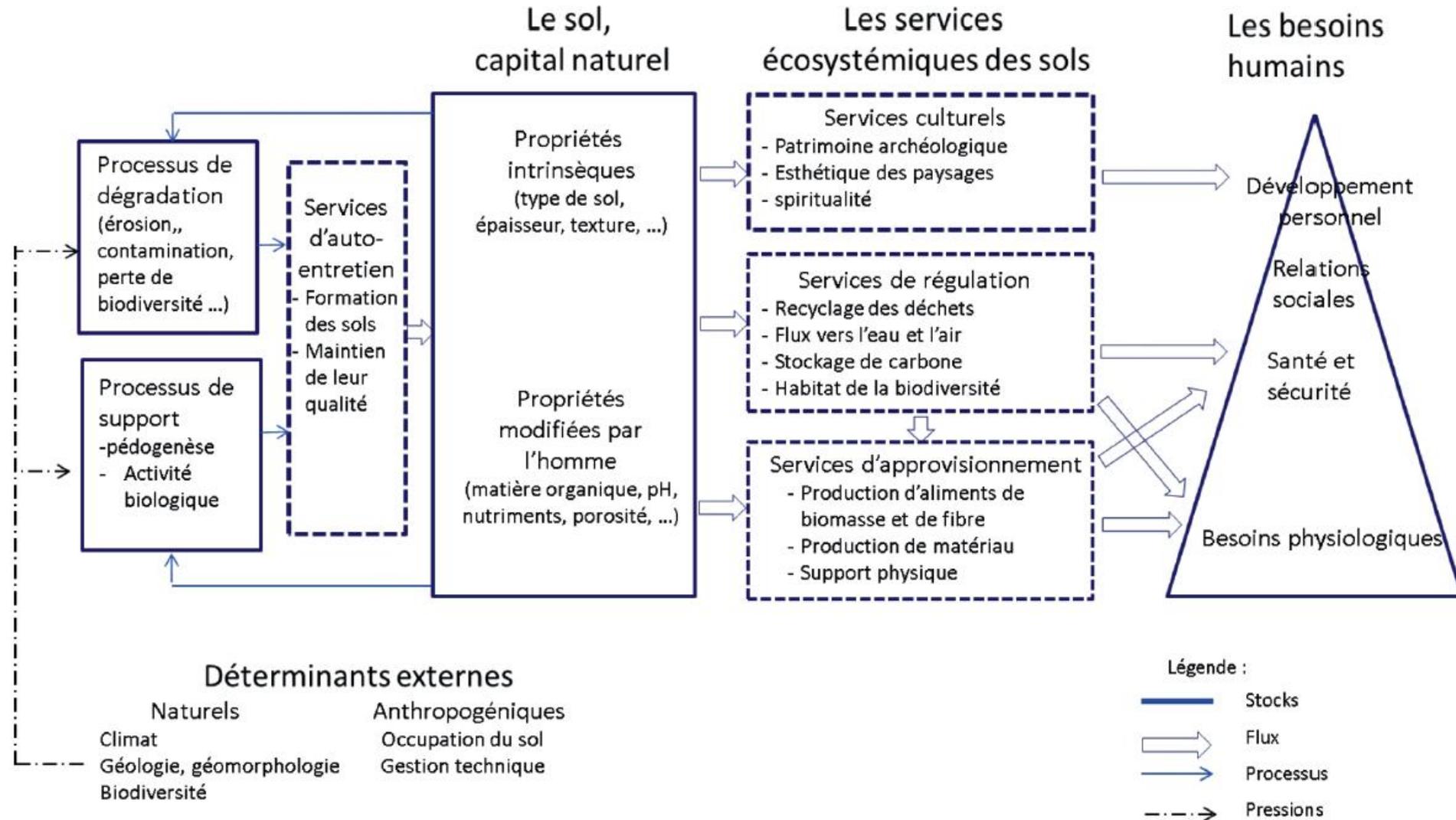


4 grandes catégories de services

Culturels



Services écosystémiques



Services écosystémiques apportés par les sols

Bilan : diversité des services rendus

Service écosystémique	Bénéficiaire direct (bénéficiaire indirect)
Structuration du sol	Agriculteur
Fourniture d'N minéral aux plantes cultivées	Agriculteur (→ Société)
Fourniture d'autres nutriments aux plantes cultivées	
Stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées	Agriculteur (→ Société)
Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion	Agriculteur et Société
Pollinisation des espèces cultivées	Agriculteur
Régulation des graines d'adventices	Agriculteur (→ Société)
Régulation des insectes ravageurs	Agriculteur (→ Société)
Atténuation naturelle des pesticides par les sols	Société
Régulation de la qualité de l'eau vis-à-vis du N, du P et du COD	Société
Stockage et restitution de l'eau bleue	Société
Régulation du climat global par atténuation des GES et stockage de C	Société
Potentiel récréatif (activités de plein air sans prélèvement)	Société
Potentiel récréatif (activités de plein air avec prélèvement)	Société

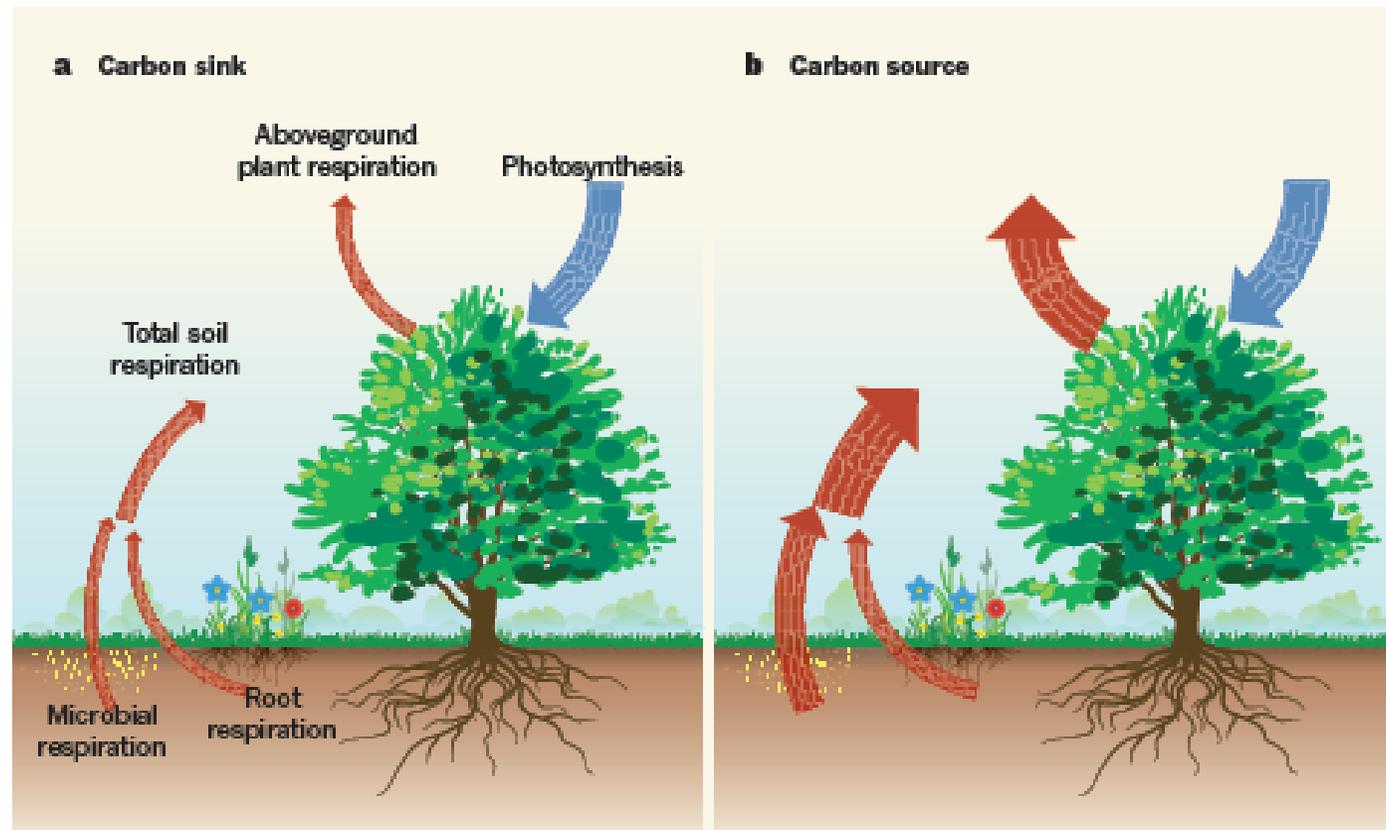
Typologie du MEA	Typologie de l'EFESE	Exemples
Services de support ou d'auto-entretien	Fonctions écologiques	Maintien des cycles de vie (eau, azote, carbone), protection des habitats et des ressources génétiques, production primaire, décomposition, formation des sols, qualité et fertilité des sols
Services d'approvisionnement ou de prélèvement	Biens produits par les écosystèmes	Végétaux (bois, algues...), fibre végétales (coton...), animaux (gibier, poissons...), biens agricoles, eaux de surface et souterraines, substances médicinales - fonction de support physique
Services de régulation	Services de régulation	Régulation du climat global, régulation du climat local, régulation des débits de crues, pollinisation des cultures, régulation de la qualité de l'eau, de l'air, fourniture en azote et en P assimilable par les plantes (et implication dans plusieurs grands cycles géochimiques N, O, P, K...) régulation des insectes ravageurs
Services culturels et spirituels	Services culturels	Activités récréatives et de loisir, chasse, pêche de loisir, expérimentation, qualité de vie, esthétique des paysages
	Patrimoine naturel	Sites et espèces emblématiques, sites et paysages naturels protégés, emblématiques, sacrés, produits labellisés

TABLEAU 2
Relations entre les services fournis par les sols,
les fonctions associées et les indicateurs de ces services ou fonctions
(Le tableau n'est pas exhaustif, mais focalisé sur certains services de régulation)

Service	Fonction	Mesure, indicateur
Régulation du cycle de l'eau	Infiltration, ruissellement, rétention de l'eau, transfert de l'eau dans le sol, évaporation, absorption par les plantes	Réserve utile en eau, vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, différence entre précipitations et ruissellement, quantité d'eau drainée par le sol
Régulation de l'érosion	Infiltration, ruissellement, agrégation – désagrégation, transports solides	Quantité de terre érodée (t terre/ha/an)
Régulation du climat global via la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)	Production / transformation de GES, stockage de C, biodégradation, minéralisation des matières organiques, dénitrification, nitrification	Variation du stock de C du sol (t C/ha/an), émission de GES (t eq CO ₂ /ha/an)
Régulation de la qualité de l'environnement, atténuation de contaminants	Filtration, adsorption, biodégradation, assimilation, précipitation, transfert	Capacité d'échange cationique (CEC), teneur en C, minéralisation potentielle de C ou N, biomasse microbienne, activité microbienne hétérotrophe...

Sol et carbone : lien avec le cours cycle du carbone BG-A

Le stockage du carbone dans les sols



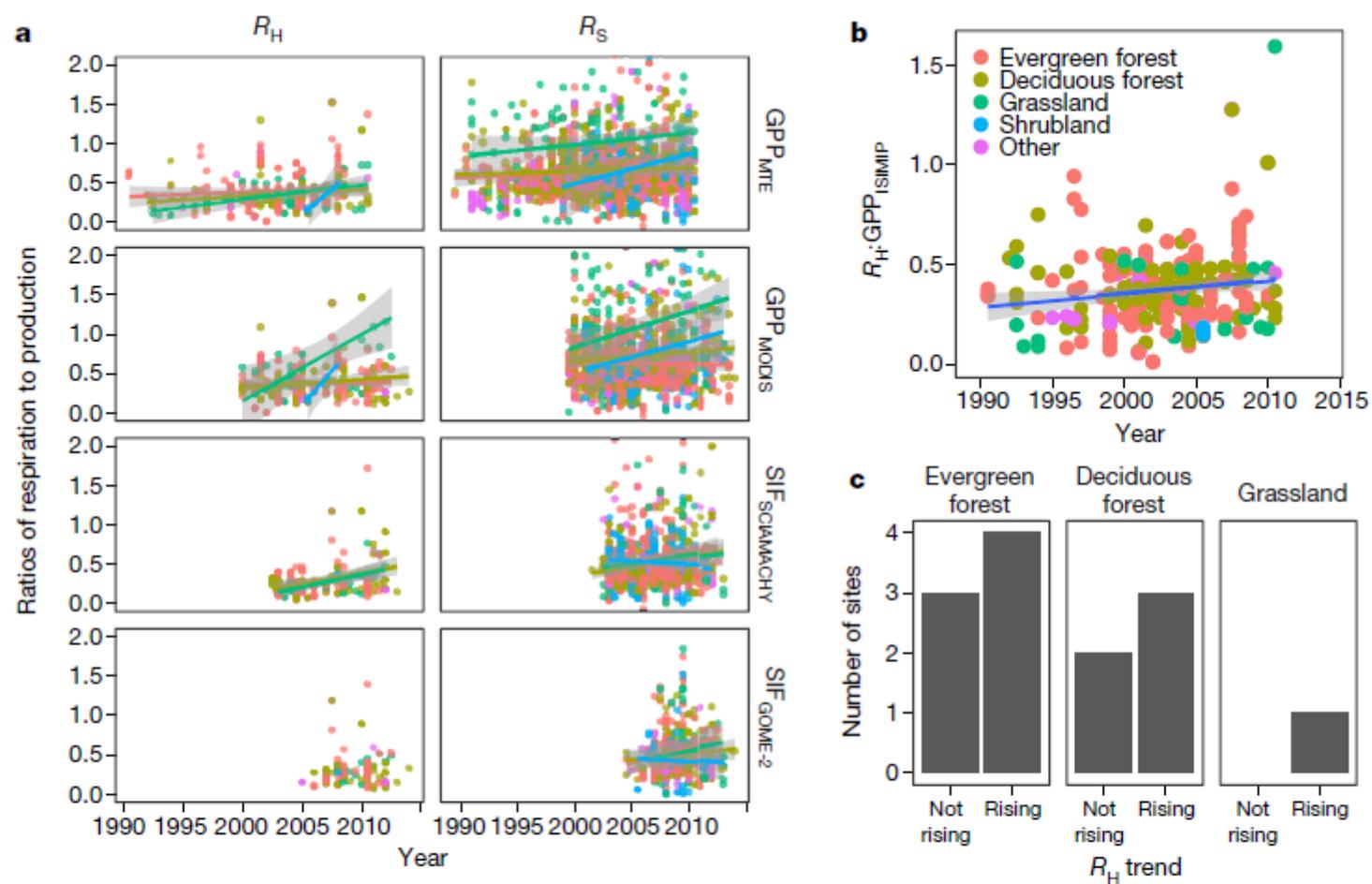


Fig. 2 | Changes in ratios of respiration to production over time.

a, Changes in the ratio of respiration to GPP and SIF over time. Two respiration fluxes (R_H and R_S), two GPP sources (the MTE and MODIS datasets), and two SIF sources (the SCIAMACHY and GOME-2 datasets) are shown. For clarity, several high-ratio points are cut off. Points and linear regression lines are coloured by land cover (see key in **b**); lines in a panel imply that the overall temporal trend was significant in that panel. Grey shading shows 95% confidence intervals; residuals from these

models are shown in Extended Data Fig. 3. **b**, Changes in the ratio of field-measured R_H to GPP modelled by suite of land models²³ over time. The trend line shows the statistically significant ($P < 0.001$) positive temporal trend in $R_H:GPP$ using the GPP of ISMIP models (see Table 1) and accounting for climate, land cover, disturbance and so on. **c**, Site-specific R_H trends in managed, unmanaged and natural ecosystems. Linear trend (not rising, slope ≤ 0 , versus rising, slope > 0) of R_H for sites in the SRDB⁹ reporting at least three annual R_H measurements over at least eight years.

Santé des sols : un sujet d'actualité

BRGM- Décembre 2023



ACCESSIBILITÉ ▾ FR EN

LE BRGM SUR LE WEB ▾ in X Instagram YouTube ē

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

RECHERCHE

JE SUIS

MENU

Accueil / Actualité / Santé des sols : le BRGM signe le manifeste européen de la Mission Sol

ACTUALITÉ

Santé des sols : le BRGM signe le manifeste européen de la Mission Sol

Partager in X f

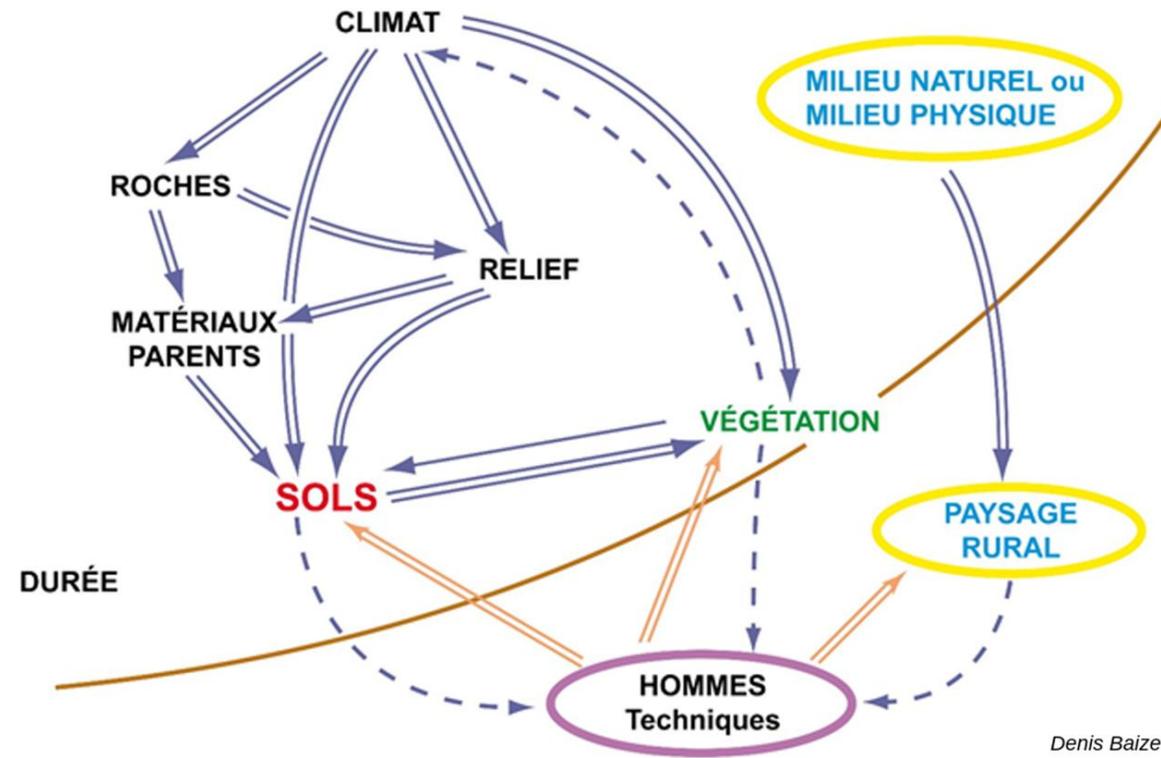
Conclusion

Importance de la pédologie

Importance de la préservation des sols

Sol : système complexe

Nombreuses interactions



Nombreux sites possibles

Gissol,fr

GIS SOL Rechercher

Séminaire IGCS* 2024 :
La connaissance des sols au service des projets de territoires

Séminaire IGCS du 23 au 25 avril 2024 à Montpellier

Du 23 au 25 avril
Institut Agro Montpellier

*Inventaire Gestion et Conservation des Sols

50 km

Carbone et matières organiques des sols

Erosion des sols

Propriétés des sols de France

Thématiques

L'essentiel

- Un sol se forme en trois étapes :

Décomposition de la roche-mère

Enrichissement en matières organiques

Transfert de matières

- Plusieurs facteurs interviennent lors de la **pédogenèse** : le **climat**, le **matériau parental**, le **relief** et les **êtres vivants**.
- La durée d'une telle formation est variable en fonction du sol obtenu. Par exemple, il faut environ 10 000 ans pour obtenir un sol brun lessivé en plaine, en France métropolitaine, sous climat atlantique.
- Le sol continue ensuite son évolution pour atteindre un état d'équilibre dynamique appelé **pédoclimax**. En France métropolitaine, en plaine, sous climat atlantique, **il s'agit d'un sol brun lessivé à humus de type mull** associé à une végétation de type chênaie-charmaie.
- Des interactions croisées permanentes entre le sol et les végétaux expliquent les successions végétales. Ces interactions peuvent être **facilitatrices** et aider à l'installation des plantes suivantes dans la succession végétale ou au contraire **favoriser les peuplements peu diversifiés** par effet Janzen-Connell inversé. Ces interactions s'expliquent par le **recrutement des microorganismes** du sol jouant un rôle fondamental dans l'établissement de la végétation.
- Un sol est soumis à une **érosion** aboutissant au départ de ses éléments constitutifs et à un amincissement. Cette érosion peut être **naturelle ou accélérée par l'Homme**. Elle est dépendante de la topographie et du climat, ainsi que de la présence ou absence de végétation.
- Le sol est un ensemble **fragile**. Les **labours**, par exemple, diminuent l'infiltration de l'eau dans le sol et accélèrent donc l'érosion du sol. Ils modifient également la biodiversité du sol en diminuant la mycorhization, les communautés bactériennes et les communautés des vers anéciques.
- L'artificialisation des sols, en augmentation en France, augmente aussi l'érosion, facilite les inondations des zones urbaines, la pollution des cours d'eau et des nappes.
- Ces pratiques diminuent les services écosystémiques rendus par les sols.
Des solutions existent pour préserver le sol, comme la réhabilitation des sols dégradés, la lutte contre l'érosion ou le reboisement.