

LE SOL, UNE INTERFACE VIVANTE ENTRE LITHOSPHERE ET ATMOSPHERE

Posters de 1e année :

- Le phénomène sédimentaire
- Les écosystèmes : structure, fonctionnement et dynamique (SVJ2)

Albert Demolon (1932) a défini le sol comme étant « la **formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants** ».

Pour l'écologie, le sol fait **partie du biotope** de part ses **caractères édaphiques** mais il autorise la **coexistence de très nombreux organismes** de tailles très diverses et de ce fait le sol est un **réservoir** unique de **biodiversité microbienne, animale et végétale**.

mise en contexte et émergence de la problématique :

document 1 : le sol, une interface entre les enveloppes terrestres et la biosphère

Les **sols** forment une couche de quelques millimètre à plusieurs mètres, **entre la lithosphère et l'atmosphère. Ils résultent de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère**, sous l'action des pluies de l'**hydrosphère** et des êtres vivants appartenant à la **biosphère**.

Les processus conduisant à la formation d'un sol se nomme la **pédogenèse**.

document 2 : réseau trophique d'une haie

Les êtres vivants du sol ont également un **rôle essentiel dans le maintien des réseaux trophiques** en **permettant de recycler la matière organique en éléments minéraux** nécessaires à la croissance des végétaux, producteurs primaires à la base des chaînes alimentaires

document 3 : problèmes soulevés par l'artificialisation des sols

Cependant l'artificialisation des sols soulève de nombreux problèmes (pollution, déstockage du carbone, érosion, inondation ...) et remettent en cause les services écosystémiques rendus par les sols (épuration des eaux souterraines, stockage du carbone, substrats pour les êtres vivants)

Problématique :

De quoi est constitué un sol et comment se forme-t-il ? en quoi est-il une structure dynamique ?

Comment les caractères physiques, chimiques et biologiques du sol lui permettent de participer aux cycles biogéochimiques ?

Quels sont les rôles joués par les sols sur les activités humaines impliquant de les protéger et de les exploiter avec précaution ?

Document 4 : composition volumétrique des sols

Un sol est une structure complexe par ses nombreux composants très différents : matière organique fraîche, matière organique décomposée, fragments de roche-mère, minéraux issus de la roche-mère, minéraux altérés, solution du sol, atmosphère du sol.

En moyenne, **la phase solide** (constituée à de plus de 95 % par la fraction minérale) **occupe 40 % à 70 %** (sol très fragmenté à sol très compacté) **du volume** du sol, **le reste** correspondant à la **phase liquide** et la phase gazeuse, les proportions de ces phases dépendent de l'hydratation du sol.

I. La phase solide des sols

La phase solide du sol est l'ensemble de **tous les éléments solides**, qu'ils soient d'origine minérale ou organique.

1. les sols se structurent verticalement en horizons → cf TP

document 3 : un sol brun typique de région tempérée (brunisol) et son découpage en horizons

Le sol peut être découpé en **différents niveaux superposés** qu'on appelle **horizons** : **les horizons les plus superficiels** sont les **plus riches en matière organique et en organismes vivants** alors qu'on observe un **gradient croissant de la fraction minérale en profondeur jusqu'à atteindre la roche-mère** (sous-sol).

On distingue classiquement, dans un **sol brun prairial ou forestier appelé brunisol**, les horizons suivants (dont l'épaisseur peut varier) :

- **l'horizon organique (O)** constitué par la litière et l'humus
- **l'horizon de lessivage (A)** : composé en **proportions égales d'humus et de matière minérale**. Il constitue la **terre arable** propice à la nutrition des plantes
- **l'horizon d'accumulation (B)** : **pauvre en humus** et donc plus clair que l'horizon A, **et riche en minéraux et fragments de roches**.
- **l'horizon d'altération (C)** : où se déroule la **fragmentation et l'altération de la roche-mère** dont les débris sont identifiables
- La **roche-mère** peu ou pas altérée parfois notée **horizon R** appartient au sous-sol.

On peut noter des **variations latérales de structure et de composition du sol** qui peuvent être **dues à** :

- la **répartition des organismes aériens**, qui produisent localement plus ou moins de matière organique (feuilles mortes, déjections...) en fonction du site où l'on se trouve,
- la **présence et les mouvements d'eau à proximité** (présence d'un ruisseau, d'une mare... dont l'eau peut percoler dans le sol depuis les berges),
- la **variation de la roche-mère** sous-jacente,
- l'existence de **micro-climats**...

2. la fraction minérale du sol provient de l'altération de la roche mère

2.1 la granulométrie définit la texture du sol → cf TP et évolue au cours du temps

document 6 : évolution en fonction du temps de la granulométrie d'un sol

La fraction minérale du sol provient de **l'altération de la roche mère**. Les éléments sont **classés en fonction de leur taille**. On y trouve :

- **des graviers, < 2 cm**, ils correspondent à des **fragments de la roche mère altérée** et **permettent** à l'eau de s'infiltrer en profondeur sans s'accumuler, on parle de **drainage**.
- **des sables, < 2 mm**, ce sont des **minéraux résiduels**, dont le quartz. Ils **permettent** au sol d'avoir des pores le rendant **perméable à l'eau et à la circulation de l'air**.
- **des limons, < 50 μm** , s'ils sont présents **en grande quantité**, ils remplissent les pores et **rendent le sol imperméable à l'eau et anoxique**.
- **des argiles < 2 μm** , **retiennent les ions dont le K^+ et l'eau**. Attention ici le nom « d'argiles » dépend de la taille et non de leur sens strict géologique (smectites, kaolinites ..)

La **texture du sol** est déterminée par les **proportions des 3 fractions les plus fines** lors d'une décantation, cette proportion **dépend de la vitesse d'altération de la roche mère par les agents physico-chimique et de l'activité des organismes présents dans le sols**

2.2 les agents physico-chimique de l'altération (cf 1e année)

document 7 : les étapes de la pédogenèse

L'altération est largement due aux agents physiques et chimiques, lorsqu'une roche est mise à l'affleurement, elle se retrouve mise au contact :

- de l'air avec ses fluctuations de température, ses vents...
- de l'eau météoritique ou de ruissellement.

Elle subit donc les **processus d'altération mécaniques**, (cryoclastie par exemple) **et chimique**. L'eau qui s'infiltré par les diaclases dissout les roches carbonatées ou hydrolyse les minéraux en libérant des ions et en formant des argiles. (cf 1e année)

Les particules résiduelles qui restent sur place, initient la formation du sol.

L'altération et notamment le type d'argile formée, **est dépendante des conditions climatiques et de la roche mère qui conditionnent le type de sol formé**

document 8: formation d'argiles différentes à partir d'une roche mère granitique en fonction du climat,

Le type d'argile formée dépend des conditions climatiques et notamment de la température et de l'humidité.

Document 9 : comparaison d'un sol forestier tempéré et d'un sol forestier équatorial

La comparaison d'un sol forestier tempéré, de type **arénitique** (conditions de bisiallisation) et d'un sol forestier équatorial, de type **latéritique** (conditions de monosiallisation ou d'allitisation) montre :

- **pour le sol arénitique**, une épaisseur de l'ordre de 2 m ;
- **pour un sol latéritique** : sol à concrétion (avec horizons A et B) sous lequel se trouve une **cuirasse latéritique** (ferralitique et/ou alumineuse) de plusieurs mètres, avant plusieurs mètres d'argiles de type kaolinite (épaisseur totale : dizaine de mètres).

2.3 l'altération des roches est accélérée par les racines des plantes et les biofilms bactériens

cf document 6

En condition abiotiques, à pH5 et 20°C, des minéraux de 1mm de diamètre mettraient plus centaines voire milliers d'années pour disparaître par hydrolyse.

Or la croissance en épaisseur des **racines végétales** qui s'insèrent dans les diaclases **fracturent davantage la roche et les microorganismes** qui se multiplient à la surface de ces fractures **forment un biofilm**, leurs polysaccharides pariétaux **retiennent l'eau nécessaire à l'hydrolyse des minéraux**.

La sécrétion, par les racines de protons mais aussi les acides organiques sécrétés par les mycètes et les bactéries accélèrent cette hydrolyse.

3. la fraction organique du sol provient de l'évolution de la litière → cf TP

La fraction organique du sol ne constitue généralement que **0,4 à 10 % de la masse du sol mais son rôle est essentiel**. Elle correspond aux molécules organiques présentes dans le sol (en dehors de celle représentée par les organismes vivants).

3.1 la minéralisation primaire de la matière organique

cf document 2

La matière organique du sol est constituée par les organismes morts qui représentent la nécromasse (cadavres, feuilles mortes, fruits morts, bois mort, mucus, mues...) et par **les déjections des êtres vivants** (y compris l'urée). Elle subit tout d'abord **l'action des détritivores qui la fragmentent** en plus petites particules. **On distingue** parmi ces détritivores selon leur régime alimentaire, **les nécrophages, saprophages, coprophages et géophages. (cf TP)**

Viennent ensuite les **décomposeurs** au sens stricts, champignons et bactéries, qui oxydent la matière organique en CO₂ et H₂O, SO₄²⁻, NO₃⁻, Fe³⁺, on parle de **minéralisation primaire**.

Document 10 : classification de la pédofaune selon la taille des organismes

Cette pédofaune peut être classée selon la taille des organismes, on distingue ainsi la **macrofaune** visible à l'oeil nu, la **mésafaune** visible à la loupe binoculaire (entre 200 μm et 2 mm) et la **microfaune** (inférieure à 200 μm) comme les mycètes et les bactéries.

3.2 la formation de l'humus ou humification et la minéralisation secondaire

Document 11 : les différentes voies de formation de l'humus et quelques propriétés

Une partie de la matière organique, les composés phénoliques tels que la lignine et les tanins, échappent à la minéralisation primaire et forment l'humus, polymères non dégradables par les minéralisateurs.

Il existe **trois voies de synthèse des substances humiques**

- Certains de ces polymères sont **peu transformés** et forment les humines résiduelles, on parle d'humification par héritage
- d'autres polymères libérés par la digestion extracellulaire des minéralisateurs se recombinent spontanément avec des monomères d'oses et d'aa et **forment par polycondensation** des molécules de plus en plus ramifiées, on parle d'**humification par polycondensation**. Ainsi se forment :
 - les **acides fulviques** brun-jaune clair, solubles quelque soit le pH du fait de leurs groupements alcools et ac carboxyliques
 - les **acides humiques** de couleur marron et solubles en milieu basiques du fait des groupements COO-
 - l'**humine noire d'insolubilisation**, hydrophobe et insoluble.
- Enfin, certaines humines **proviennent des parois de bactéries mortes**, on parle alors d'humification par néosynthèse bactérienne microbienne et d'humines microbiennes.

L'humus quelque soit son origine s'oxyde spontanément mais très lentement, on parle de **minéralisation secondaire**.

Document 12 : bilan des minéralisation dans le sol

3.3 la minéralisation de la matière organique dépend de son rapport C/N

Document 13: rapports C/N de quelques matières organiques

La **biodégradabilité** de la matière organique **dépend de son rapport C/N** : pour une bonne minéralisation de la matière organique, il est très important que la richesse en carbone et en azote soit équilibré et que le **rapport C/N soit assez faible** car les détritivores et les décomposeurs nécessitent du carbone comme source d'énergie et de l'azote en tant qu'intermédiaire dans la synthèse de leurs protéines.

Si un de ces éléments manque, la minéralisation ralentit voire s'arrête et, par conséquent, les végétaux n'ont pas suffisamment d'éléments nutritifs pour leur développement et le sol peut perdre une partie de sa structure.

Un rapport trop fort est typique d'une matière végétale riche en lignine (qui ne contient pas d'azote et dont le rapport est voisin de 100) et **difficilement dégradable**.

4. la bioturbation animale permet de mélanger la litière et la fraction minérale du sol et favorise la formation du complexe argilo-humique

Document 14 : formation du complexe argilo-humique

Le Complexe Argilo-Humique (CAH) est constitué par l'association des acides humiques et des argiles. Les molécules d'humus, électronégatives comme celles de l'argile ne peuvent normalement se fixer entre elles directement, elle se lient par l'intermédiaire d'ions Ca^{2+} ou Fe^{2+} ou Fe^{3+} , formant un « pont » entre l'argile et l'humus.

Le CAH par sa capacité à fixer de manière réversible les cations présents dans la solution du sol est indispensable à la nutrition des plantes. De plus, les micelles d'humus empêchent aux argiles de se dispersées et stabilisent le sol.

Document 15 : Les vers de terre et les sols

Document 16 : effets de la bioturbation par les vers du sol.

Les animaux se déplaçant dans le sol et particulièrement les lombriciens en creusant des galeries verticales enfouissent la litière et forment des turricules en surface. Dans l'intestin de ces animaux géophages, les argiles s'associent étroitement à l'humus grâce au calcium sécrété par les glandes digestives et une glycoprotéine sécrétée par les mycètes présents dans leur intestin, la glomaline.

Ainsi ils participent à la formation du complexe argilo-humique.

Plus largement par les galeries creusées, la bioturbation permet :

- d'améliorer l'écoulement de l'eau et l'aération du sol
- la pénétration des racines en profondeur en donc l'amélioration de l'ancrage et de la nutrition des végétaux
- l'enrichissement en matière organique du sol et la multiplication des bactéries

Parce qu'ils modifient la structure de leur écosystème, les lombrics sont des espèces ingénieurs.

En sol acide, les bactéries sont peu nombreuses et les Lombriciens qui s'en nourrissent sont absents, on trouve en revanche des Enchytrides qui se nourrissent de mycètes, cependant étant plus petits, leur capacité de bioturbation est limitée.

II. Les phases fluides des sols

1. la phase gazeuse → cf TP

Document 17 : la porosité du sol

Les gaz sont contenus et circulent à travers les **pores du sol qui sont plus (macropores) ou moins (micropores) interconnectés**. La **porosité** du sol, en lien avec sa granulométrie, va influencer l'importance de cette fraction gazeuse.

Un sol non tassé a une porosité d'environ 40 %. Ces pores sont soit formés par l'agglomération de ses composants, on parle de **porosité texturale**, soit par l'action des organismes, bioturbation animale, croissance des racines végétales, on parle de **porosité structurale**.

Document 18 : Composition comparée de l'air du sol et de l'atmosphère

Les gaz du sol proviennent **en partie de l'atmosphère** avec laquelle des échanges se réalisent mais ces échanges relativement réduits permettent au sol d'agir comme un **isolant thermique**, ce qui **permet le passage de l'hiver pour nombre d'animaux et pour les végétaux**.

Les pressions partielles des différents gaz sont aussi **influencées par l'activité biologique** du sol :

- **consommation de O_2 et production de CO_2** par la respiration des différents organismes (en particulier les racines des végétaux : la moitié de la respiration du sol est d'origine végétale),
- **production de CH_4 par les bactéries méthanogènes et de N_2O par les bactéries dénitrifiantes en respiration anaérobie**,
- **fixation de N_2 par des bactéries libres ou symbiotiques** (ex : Rhizobium avec les Fabacées)

Certains gaz produits par la biocénose du sol sont des **gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4)**

2. la solution du sol → cf TP

2.1 notion de réserve utile pour les plantes

L'eau du sol provient de l'**eau de pluie mais seulement une partie est utilisable par les plantes**

Le stockage de l'eau dans le sol dépend de ses propriétés physico-chimiques et de sa granulométrie.

document 19 : évolution du potentiel hydrique du sol en fonction de son humidité

La **teneur en eau à saturation** est la teneur maximale en eau **quand tous les pores sont remplis**.

La **perméabilité** du sol est son **aptitude à laisser passer l'eau**, ce qui est permis **seulement par la macroporosité ou porosité efficace**.

L'eau peut se trouver sous 3 formes dans le sol :

- l'**eau de gravité**, non liée, qui **circule librement** dans les pores et n'est pas retenue par le sol. Quelques heures ou quelques jours après un arrosage ou des précipitations, l'eau de gravité a percolé : c'est le **ressuyage** (elle n'est donc pratiquement pas utilisée par les végétaux)

- l'**eau liée** qui est **retenue dans les pores du sol par différentes forces** :
 - l'eau capillaire située dans les interstices entre les particules et retenue par tension superficielle, **c'est la seule fraction réellement disponible pour les végétaux** qui peuvent vaincre les forces capillaires, on parle donc d'**eau liée disponible**
 - l'eau de rétention fortement adsorbée par les particules du sol, eau **liée non disponible**
 - l'eau de constitution, emprisonnée dans les particules hydrophiles comme les argiles (eau également non disponible pour les végétaux).

La résultante de ces forces qui retiennent l'eau dans les pores du sol constitue le **potentiel hydrique ψ** du sol ou potentiel chimique de l'eau. **L'eau de constitution et l'eau de rétention présentent une forte composante matricielle du potentiel hydrique du sol**, ce qui explique leur faible capacité à être mobilisée. Pour rappel : le potentiel hydrique est égal en valeur absolue, à l'énergie qu'il faut dépenser pour faire passer un gramme d'eau de l'état lié à l'état libre. Il est toujours négatif et exprimé en unités de pression.

La fraction d'eau qui peut être prélevée par les plantes, ou réserve utile, se situe dans un intervalle situé entre les deux limites suivantes :

- **la capacité au champ ou capacité de rétention maximale** : situation où l'eau liée est à son maximum après ressuyage. L'eau aisément mobilisable par la plante est l'eau capillaire.
- **le point de flétrissement permanent** : situation où l'eau n'est plus mobilisable, toute l'eau liée appartenant à l'eau non disponible (**eau de constitution et de rétention**). On observe alors souvent et plutôt rapidement le flétrissement de la plante : perte de rigidité d'une plante herbacée due à un manque d'eau qui affecte la turgescence et donc le maintien du végétal.

Les valeurs de réserves utiles dépendent de la granulométrie du sol et de sa teneur en matière organique :

- **Plus les particules minérales sont grandes** comme dans un **sol sableux**, et plus les pores entre les particules le sont aussi. Cela **réduit les forces de capillarité**, ce qui facilite l'absorption d'eau par les plantes, **mais augmente également le ressuyage** et donc **diminue la capacité au champs**. Un sol sableux nécessitera donc une irrigation régulière.
- A l'inverse, **la réserve utile augmente quand la taille des particules diminuent**, comme dans un **sol limono-argileux**
- **enfin la matière organique du sol**, en réalisant des liaisons hydrogène avec l'eau **peut retenir jusqu'à 90 % de son poids en eau**

2.2 notion de capacité d'échange cationique ou CEC

La solution du sol contient de nombreux ions provenant de l'altération des roches (K^+) et du recyclage de la matière organique (NH_4^+ , NO_3^- et PO_4^{3-}).

Les colloïdes du sol, argiles et acides humiques et fulviques, chargés négativement sont capables de retenir les cations.

En l'absence de cations, les argiles se repoussent mutuellement et **sont à l'état dispersé.**

En présence de calcium ou de fer, les argiles s'associent, c'est la **floculation.**

L'association des argiles avec l'humus dans le complexe argilo-humique réduit ainsi l'érosion des sols

→ Cf doc 14

document 20a : organisation du complexe argilo-humique et les échanges possibles de cations avec la solution du sol

La capacité d'échange cationique ou CEC est la quantité maximale de cations de la solution du sol que peut fixer un sol à un pH donné.

En pratique, on ne mesure que la quantité de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ , car ils représentent 99 % des cations fixés dans un sol.

document 20b : valeurs de la CEC (en mEq par Kg de sol sec) pour les argiles pure et les substances humiques

Les substances humiques peuvent fixer 5 à 10 fois plus de cations que les argiles car leurs charges négatives sont beaucoup plus nombreuses.

Cette **CEC** est donc **élevée** dans les **sols argileux** et **faible** dans les **sols sableux.**

La fixation de ces cations grâce au CAH limite la perte d'ions emportée par l'eau de gravité ou **lixiviation.**

Ces cations peuvent ensuite être libérés dans la solution du sol puis être absorbés par les plantes, cela augmente donc la fertilité du sol.

document 21 comparaison de la CEC d'un sol neutre et d'un sol acide et impact sur la fertilité du sol

Sur un sol acide, les protons occupent une partie des sites du complexes d'échange, ce qui **limite sa capacité à fixer les autres cations** et **diminue fortement la CEC**, ce qui **diminue la croissance des plantes, de plus les bactéries étant absentes, la minéralisation** de la nécromasse est **plus lente** et la **solution du sol moins riche** en cations. On a donc pour conséquence un **sol moins fertile**

Remarque : les anions n'étant pas retenus, les nitrates et phosphates apportés par les engrais subissent la lixiviation et entraînent la pollution des cours d'eau et leur eutrophisation par prolifération d'algues.

document 22 : Schéma bilan des échanges qu'un sol réalise avec les enveloppes terrestres et la biosphère

→ **Le sol est donc un système ouvert** réalisant de nombreux échanges avec les enveloppes terrestre et la biosphère

III. Le sol est une structure dynamique

La formation d'un sol ou **pédogenèse** permet la création d'une **succession écologique primaire** de la **roche mère** et son évolution jusqu'au stade climacique.

1. Le lithosol se forme par l'action des biofilms sur la roche nue

Après une éruption volcanique ou le passage d'un glacier par exemple ou encore une érosion intensive, les **roches nues** sont **rapidement recouvertes de biofilms de cyanobactéries et de lichen**. Les débris de ces organismes chlorophylliens nourrissent ensuite des **biofilms formés par des bactéries et des mycètes hétérotrophes**. Ces biofilms retiennent l'eau, les éléments minéraux et organiques et offrent un ancrage efficace sur le substrat. De plus, ils attaquent la roche mère par la sécrétion d'acides.

Le sol ainsi formé se nomme **lithosol**.

2. du stade pionnier au stade climacique, les micro-organismes du sol accélèrent les successions

➤ du stade pionnier au stade pelouse :

La présence initiale de lichens et de biofilms permet l'installation sur le lithosol de mousses et de petites **plantes pionnières herbacées annuelles**, on parle de **facilitation**. A ce stade le sol ne fait que quelques centimètre d'épaisseur.

Ces herbacées annuelles à forte capacité de dispersion par la production en grande quantité de graines sont des stratégies « r ».

document 24 : l'effet Janzen Connel sur les successions végétales

Cependant, chaque plante pionnière favorise également le **développement dans le sol de pathogènes spécifiques** qui nuit au développement des nouvelles plantules de la même espèce.

La mort et la décomposition des ces plantes pionnières permet d'épaissir et d'enrichir petit à petit le sol et **l'espace libéré** par l'accumulation d'agents pathogènes pour les premières espèces pionnières est **rapidement comblé par l'arrivée de nouvelles espèces**. Ce **mécanisme de rétroaction négative d'une espèce sur ses propres descendants** via des micro-organismes du sol pathogène est appelé **l'effet Janzen-Connell**.

➤ Le stade prairie

S'installent alors des plantes **herbacées bisannuelles ou vivaces**. Ces plantes passant l'hiver sous forme de bulbes, tubercules ou rhizomes se développent plus rapidement à la fin de l'hiver et prennent le pas sur les herbacées annuelles au développement des plantules plus incertain. De plus ces **cryptophytes** ont souvent une **forte capacité de colonisation par multiplication végétative**.

L'espace se ferme petit à petit horizontalement.

➤ Passage au stade de lande puis au stades forestiers plus matures :

Avec l'arrivée des **chaméphytes buissonnantes puis de phanérophytes arborescents**, on assiste alors à la **fermeture verticale** de l'espace du fait d'une **compétition pour la lumière** induite par la croissance en hauteur des végétaux.

La succession végétale évolue ainsi en **lande** puis en **jeune forêt** puis **forêt mature**, caractéristique du **stade climacique**.

Document 25 : l'effet Janzen Connell inversé dans la forêt climacique

Les forêts tempérées sont **caractérisées par une espèce végétale dominante** grâce à des **rétroactions positives** sur ses descendants par les micro-organismes du sol, c'est un **effet Janzen Connell inversé**.

ATTENTION !!!!! en forêt climacique tempérée, une espèce arborescente végétale domine mais du fait de la grande diversité de niches écologiques possibles, la **biodiversité animale** est **maximale** et les **réseaux trophiques très complexes**.

3. Au cours du temps, le sol se brunifie (sol brun) puis se lessive (sol brun lessivé)

Document 26 : du lithosol au sol brun lessivé

Par apport de matière organique et par altération de la roche mère, le sol s'est épaissi jusqu'à un mètre.

L'altération de la roche mère libère du calcium et/ou du fer qui participent à la formation du complexe argilo-humique, les **horizons superficiels d'un jeune sol** riche en humus sont plutôt **noirs**.

Avec le temps, l'humus se dégrade et le Ca^{2+} se solubilise par lixiviation, en revanche le fer s'oxyde, et le sol prend alors une teinte plus brune, on parle de brunification et de sol brun.

Ainsi le sol brun s'épaissit jusqu'à atteindre un point d'équilibre où sa vitesse de formation correspond à sa vitesse d'érosion.

Cependant par l'action des milliers d'années de pluie, les ions Ca^{2+} ont fini d'être lixiviés et les ions de fer retenant moins les argiles, celles-ci se dispersent et migrent vers des horizons plus profonds par lessivage où elles reformeront des complexes stables en s'associant au calcium libéré par l'altération de la roche mère.

Ces sols ayant des argiles en profondeurs sont appelés des **sols bruns lessivés**. C'est le **stade final** de la pédogenèse **sous une forêt caducifoliée en milieu tempéré**, on parle de **pédoclimax**.

4. La végétation influence en retour la dynamique du sol et le type d'humus

Document 27 : le type de végétation détermine le rapport C/N et conditionne la fertilité du sol

➤ Dans une prairie, le rapport C/N est faible et l'humus de type mull

Les **herbacées** des prairies et des champs sont **pauvres** en tissus secondaires et donc **en lignine**, molécules sans azote, elles ont donc un **rapport C/N assez faible, inférieur à 15**.

Les **bactéries du sol** synthétisent également leur propre matière organique et ont un **rapport C/N entre 5 et 10**. Les **lombrics** se nourrissant des bactéries du sol, ils sont **nombreux** et la **matière organique** est **rapidement enfouie et dégradée** par les bactéries. La minéralisation est rapide, l'**humification** se fait essentiellement **par néosynthèse bactérienne et par polycondensation**, elle **ne modifie pas le pH du sol**, le **CEC important**.

Tous ces éléments contribuent à la formation d'un sol fertile où la matière organique est rapidement recyclée. on parle d'**humus de type mull ou doux**

➤ Dans une forêt climacique, le rapport C/N est fort et l'humus de type moder

Au contraire, une forêt climacique constituée de **chênes, de hêtres ou de pins**, produisent une **matière organique plus riche en lignine** avec un **rapport C/N élevé, entre 20 et 100**.

Dans ce sol forestier, pauvre en azote, la croissance des bactérie est très ralentie, ce n'est pas le cas de **mycètes** qui ont un **rapport C/N entre 20 et 100** et sont donc moins exigeants en azote. De plus ces mycètes produisent des acides et une diminution de **pH entre 5,5 et 4**. La croissance des bactéries du sol étant de plus, inhibée par l'acidité du sol, les **mycètes éliminent ainsi les espèces bactériennes concurrentes**, c'est une **compétition par modification du milieu**.

Enfin, les **tannins** présents en grande quantité dans les feuilles induisent des **troubles digestifs chez les détritivores** phytophage.

Ainsi, **l'enfouissement de la MO plus faible, l'acidité et les tanins entraînent une très faible minéralisation de la matière organique, l'humification est essentiellement par héritage** avec également beaucoup d'**acides fulviques**, qui teintent en jaunes brun les cours d'eau, on parle d'**humus de type moder ou dur**

Les acides fulviques entrant peu dans la formation du CAH et que les lombriciens sont absents, il y a **très peu de CAH**. Enfin **l'acidité réduit également la CEC** et de ce fait, celle-ci est deux fois plus faible dans une forêt que dans une prairie.

Sur ce **sol acide pauvre en ions**, les **arbres poussent lentement**, la **productivité est faible** et le **recyclage** de la matière organique est **lent**.

IV Les enjeux de la gestion des sols

1. les sols fournissent des services écosystémiques essentiels

Ces services sont regroupés en 3 groupes :

➤ des services d'approvisionnement

Tout d'abord, le sol par sa portance offre un **substrat indispensable à la vie et aux activités anthropiques**

rq : Cette portance peut être diminuée sur les sols argileux en cas de pluie où les argiles floculées se dispersent, le sol devenant alors boueux.

Ces argiles sont par ailleurs utilisées dans la **fabrication des briques et des poteries**.

Le sol par sa fertilité permet de **produire de la biomasse végétale**, utilisée comme **nourriture** mais **aussi** comme **source de fibres textiles**, papier, comme **sources de matériaux de construction** (bois) ou **source d'énergie** (biogaz, bois pour le chauffage)

Depuis la fin du 20^e siècle, les **microorganismes** du sol sont aussi des **producteurs d'antibiotiques**.

Enfin, par leur érosion et lixiviation, les sols participent aussi à la **fertilité des écosystèmes aquatiques**.

➤ des services de régulation

Les détritivores et les décomposeurs recyclent les « déchets » biologique (compostage, inhumation) en les minéralisant, ce qui d'une part, **reconstitue la fertilité du sol** mais **limitent** aussi la prolifération des **pathogènes**.

Par leur perméabilité, les sols **filtrent** l'eau de pluie en **retenant les métaux lourds** comme le cuivre mais aussi les **pesticides et polluants industriels**. A court terme, cela purifie l'eau mais à long terme le sol accumule ces polluants.

En zone humide, les sols retenant l'eau **évitent les inondations**

Enfin, le sol a un **double rôle dans le climat** ; il **fixe du carbone** mais **produit** par ailleurs des **gaz à effet de serre**, N₂O et CH₄ dans les zones humides.

Rq : le projet 4 % vise à fixer chaque année par les sols les CO₂ produit par les activités humaines en augmentant la matière organique des sols, cette piste est intéressante pour les sols d'agriculture intensive où l'humus est pauvre mais les sols forestiers ou d'agriculture non conventionnelle n'ont pas forcément une grande marge d'augmentation.

➤ des services culturels

Ce sont des services immatériels comprenant le **patrimoine archéologique et l'esthétique des paysages**.

2. L'impact des activités anthropiques sur les sols menacent la pérennité de ces services

Document 29 : la dégradation des sols et leurs principales causes

2.1 les conséquences de l'agriculture intensive

L'agriculture est la première utilisatrice des sols. Aujourd'hui, **12 % des terres émergées dans le monde sont cultivées.**

document 30: effets des méthodes de cultures sur la structure d'un sol cultivé après 5 ans d'exploitation

Les **problèmes** causés par l'**agriculture intensive** sont nombreux :

➤ problème de l'érosion des sol

Un sol se développe lorsque son érosion est inférieure à sa genèse.

Tous les sols sont naturellement soumis à l'érosion mais celle-ci varie selon :

- la topographie : un sol aura davantage tendance à être érodé par ruissellement, glissements de terrain... que sa pente est importante
- le climat : des phénomènes climatiques extrêmes ou des saisons des pluies intenses (ex : moussons en région tropicale)
- le couvert végétal : en limitant l'impact direct des précipitations sur le sol et en maintenant sa cohérence mécanique grâce au réseau racinaire, **la végétation tend à limiter le phénomène d'érosion.** Au contraire, un sol nu sera très vulnérable à l'érosion.

En France, **on estime qu'on perd 1 mm de sol par an dans les territoires agricoles...** pour une ressource se formant avec un taux de 0,02 à 0,1 mm par an !

L'agriculture intensive favorise directement l'érosion des sols par :

- **un travail du sol (labour) excessif et/ou trop profond;**
- **une absence de couvert végétal** : le **sol laissé nu une bonne partie de l'année** voit une part non négligeable de ses éléments fertiles emportés par l'eau (érosion hydrique) ou le vent (érosion éolienne mais cette dernière est peu fréquente en France). En cas de tempêtes ou de fortes pluies, c'est plusieurs dizaines de tonnes de sol par hectare et par an qui peuvent disparaître et être entraînés vers les cours d'eau qu'ils rendent boueux.

De plus, **l'augmentation de la surface des terres agricoles par déforestation** (on estime que la planète perd environ 7 millions d'ha de forêt par an) ou encore le **remembrement** intervenu en Europe au XXe siècle, sont des processus qui tendant à faire disparaître le couvert végétal et donc à déstabiliser les sols, les rendant plus vulnérables à l'érosion.

➤ Le problème de la diminution de la porosité par tassement

Le passage d'engins de plus en plus lourds provoquent le **tassement des sol et diminue leur porosité**, un sol compacté ne laisse alors passer ni l'eau, ni l'air et la faune des recycleurs du sol (par exemple, les vers de terre) diminue.

La baisse de la qualité des sols peut donc induire une baisse des rendements des récoltes et de leur qualité nutritive.

➤ Le problème de la pollution

Enfin le développement d'une agriculture plus intensive, si elle a permis d'accroître les productions vivrières, a contribué à la **pollution des sols notamment suite à l'usage intensif d'engrais de synthèse** (pour palier l'épuisement des ressources minérales des sols) **et de produits phytosanitaires**. Ces produits contiennent des molécules qui ne sont pas toutes dégradables. Elles peuvent donc rester dans le sol ou être entraînées par la pluie vers les nappes phréatiques ou les rivières ou être transférées vers les plantes, les animaux et l'homme.

Ex : chlordécone, insecticide organochloré utilisé jusqu'en 1993 dans les plantations de bananiers aux Antilles pour lutter contre le charançon du bananier, encore présent dans le sol, est reconnu comme à l'origine de prématurités et de cancers.

Vers des pratiques agricoles responsables ?

Une prise de conscience récente de la fragilité et de la finitude de la ressource pédologique peut aujourd'hui commencer à s'observer. On note ainsi localement l'inflexion de certaines pratiques agricoles : labours moins profonds et moins fréquents, enherbement, replantation de haies bocagères...

2.2 les conséquences de l'artificialisation des sols et de l'accroissement des zones urbaines

document 31 : l'extension des villes en rapport avec l'artificialisation des sols

Beaucoup de sols subissent une **artificialisation qui ne cesse de croître** à mesure que la population humaine augmente : habitations, industries, infrastructures routières, zones commerciales ou de loisirs... La « bétonisation » des sols semble inarrêtable.

Ces **terrains devenus imperméables** où l'eau ne peut plus s'infiltrer peuvent alors former des **zones de ruissellement intense, favorisant les épisodes d'inondations ou de crues** qui ensuite affectent les sols en amont ou en aval.

A cela, il faut également ajouter :

- la **mise en décharge** de déchets et **l'épandage** de déchets notamment les boues de stations d'épuration et les composts urbains, qui contaminaient les sols avant l'instauration de réglementations contraignantes,
- **les rejets de polluants** organiques et de métaux par les sites industriels, anciens ou actuels

document 32 : la préservation des sols : un enjeu pour l'humanité

En bilan : Toutes ces menaces affectent les diverses fonctions du sol, comme la production alimentaire, ou encore la filtration et le stockage des eaux souterraines, principale source d'eau potable.

D'après diverses sources dont la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture), on estime que près de la moitié des sols du monde sont déjà dégradés en conséquence des activités humaines, phénomène qui s'accroît et qui pourrait s'aggraver avec les changements climatiques