

Chapitre 1 : Introduction au sol et à ses fonctions écologiques

1.1. Généralités et importance du sol

Le sol constitue l'un des compartiments essentiels de la biosphère. Interface dynamique entre la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère, il joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Ressource naturelle non renouvelable à l'échelle humaine, le sol est au cœur des enjeux liés à la biodiversité, à la production agricole et à la sécurité alimentaire.

Face à la pression croissante exercée par les activités anthropiques (agriculture intensive, urbanisation, pollution, déforestation) et aux effets du changement climatique, la compréhension du fonctionnement du sol et de ses fonctions écologiques devient indispensable pour assurer une gestion durable des ressources naturelles.

En tant que ressource altérable non renouvelable, il convient de conserver la qualité des sols afin de bénéficier des services écosystémiques rendus par cette ressource. Le sol est très sensible aux altérations liées aux pollutions, à la surexploitation ou au changement climatique. Son altération influence directement la qualité de l'eau et de l'air, la biodiversité, le climat et peut altérer la santé des populations humaines. D'autre part, le recyclage des fonciers dégradés en particulier la requalification des friches industrielles est un enjeu crucial pour minimiser la consommation de terres agricoles occasionnée par l'étalement urbain.

1.2. Définition du sol

Le matériel brunâtre sur lequel on marche et qui salit nos chaussures, n'est que la partie superficielle du sol. Il est superbement composé de débris de roches de grains de sable et d'argile, de morceaux de plantes et d'animaux morts. Entre ces éléments, il y a plus ou moins d'espace où circulent l'air et l'eau et où vivent une multitude d'être vivants, tout ça fait partie du sol.

Le sol est défini comme la **couche superficielle meuble de la croûte terrestre**, résultant de l'altération de la roche mère sous l'influence du climat, des organismes vivants, du relief et du temps. Il est capable de supporter la vie végétale et abrite une grande diversité d'organismes.

D'un point de vue écologique, le sol est un **système vivant complexe et dynamique**, caractérisé par des interactions permanentes entre composantes minérales, organiques, biologiques, liquides

et gazeuses. Il constitue un réservoir de nutriments, un milieu de vie et un acteur clé des cycles biogéochimiques.

1.3. Composantes du sol

Le sol est composé de débris de roches, de grains de sable et d'argile, de morceaux de plantes et d'animaux morts. Entre ces éléments, il y a plus ou moins d'espace où circulent l'air et l'eau et où vivent une multitude d'êtres vivants.

Selon la nature des roches, la couverture végétale et surtout le climat, ses propriétés sont différentes. Ainsi on ne trouve pas les mêmes sols en climat froid (souvent argileux et riches en matières organique) et en climat chaud et tropical (appelés de manière générique « sols rouges »). Les spécialistes des sols (les pédologues) classent notamment les sols selon leur composition et leur texture.

Le sol met plusieurs milliers d'années à se constituer. Dans certaines conditions, la roche-mère, élément minéral est altérée par l'air et l'eau. Cela permet l'installation de premières plantes pionnières. Ensuite, la matière organique provenant de plantes et d'animaux morts forme en surface une litière. Décomposée par la faune du sol, elle est transformée en humus. Puis mélangé à des éléments minéraux, le sol devient cultivable, c'est ce que l'on appelle de la terre arable. Il évolue continuellement en fonction de la vie en surface et sous la surface : activité humaine, activité biologique, pluies, sécheresses, pollution, érosion...

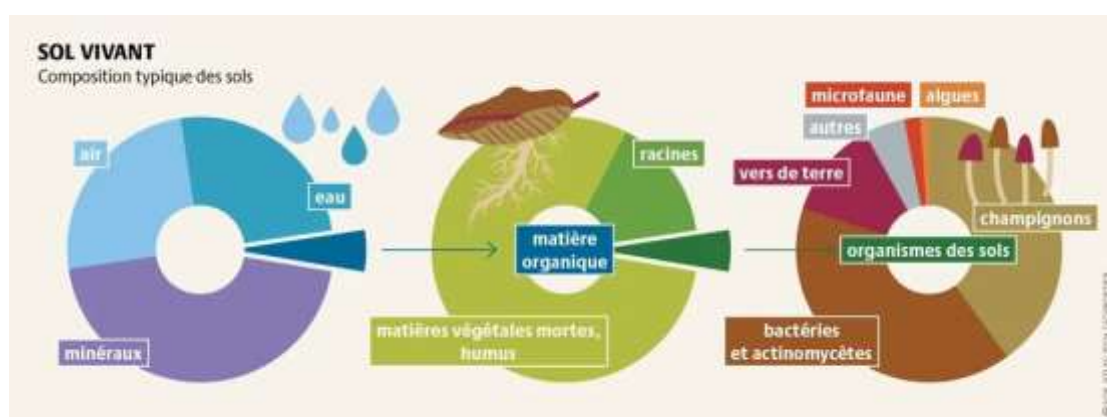


Figure 1.1 : Composition et diversité biologique du sol (FAO, 2015). *Status of the World's Soil Resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.*

Le sol est un système naturel complexe, ouvert et dynamique, généralement décrit comme un système triphasique composé de trois phases intimement liées : solide, liquide et gazeuse.

i. La phase solide

La phase solide constitue l'armature du sol. Elle est formée d'une fraction minérale issue des processus d'altération physico-chimique de la roche mère (sables, limons et argiles) et d'une fraction organique comprenant la matière organique fraîche, la biomasse microbienne et l'humus stabilisé. Cette phase contrôle les principales propriétés physiques du sol (texture, structure, porosité, stabilité structurale) ainsi qu'un grand nombre de propriétés chimiques, notamment la capacité d'échange cationique et l'adsorption des éléments nutritifs et des contaminants (Bohn et al., 2001).

ii. La phase liquide

La phase liquide, représentée par la solution du sol, occupe une partie des pores et constitue le principal vecteur de transfert des éléments minéraux, des composés organiques dissous et des microorganismes. Elle joue un rôle fondamental dans les processus biogéochimiques, les réactions d'oxydoréduction, la nutrition minérale des plantes et le fonctionnement des communautés microbiennes (Hillel, 2004).

iii. La phase gazeuse

La phase gazeuse, présente dans les pores non saturés, est composée principalement d'oxygène, de dioxyde de carbone, d'azote et de vapeur d'eau. Sa composition diffère souvent de celle de l'atmosphère en raison de l'intensité des processus respiratoires racinaires et microbiens. Cette phase conditionne l'aération du sol, la respiration biologique et les processus de minéralisation et de nitrification (Paul, 2015). Les interactions étroites et continues entre ces trois phases, fortement influencées par l'état hydrique, l'activité biologique et les conditions climatiques, confèrent au sol son caractère évolutif. Elles déterminent son fonctionnement global, sa fertilité, sa résilience face aux perturbations et sa capacité à fournir des services écosystémiques essentiels tels que la production végétale, la régulation des cycles biogéochimiques et le stockage du carbone (FAO, 2015).

1.4. Formation du sol : la pédogenèse

La pédogenèse désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques responsables de la formation et de l'évolution des sols à partir de la roche mère. Le sol est ainsi le résultat d'une transformation progressive d'un matériau minéral initial sous l'influence combinée de facteurs environnementaux agissant sur de longues périodes. Ce processus confère au sol ses propriétés morphologiques, physiques, chimiques et biologiques, qui conditionnent son fonctionnement et sa fertilité.

1.4.1. Facteurs de formation du sol

La formation du sol repose sur l'action conjointe de cinq facteurs fondamentaux, classiquement décrits par le modèle de **Dokuchaev–Jenny** :

a. La roche mère

La roche mère constitue le matériau parental à partir duquel le sol se développe. Elle détermine la composition minéralogique et chimique initiale du sol, influençant directement sa texture, sa teneur en éléments nutritifs et son pH.

- Les roches siliceuses donnent généralement des sols pauvres et acides,
- Les roches calcaires produisent des sols riches en calcium, souvent basiques,
- Les roches volcaniques peuvent engendrer des sols très fertiles.

b. Le climat

Le climat, à travers la température et les précipitations, joue un rôle majeur dans la vitesse et l'intensité de l'altération des roches ainsi que dans l'activité biologique.

- Les climats chauds et humides favorisent l'altération chimique intense et la formation de sols profondément différenciés,
- Les climats froids ou arides ralentissent les processus pédogénétiques et conduisent à des sols peu évolués.

Le climat contrôle également les processus de lessivage, d'accumulation des sels et la dynamique de la matière organique.

c. Les organismes vivants

Les organismes vivants (végétation, micro-organismes, faune du sol) jouent un rôle central dans la pédogenèse.

- Les plantes fournissent la litière végétale, source principale de matière organique,
- Les micro-organismes assurent la décomposition, l'humification et la minéralisation,
- La faune du sol (vers de terre, arthropodes) améliore la structure par bioturbation, favorisant l'aération, l'infiltration de l'eau et la formation des agrégats.

L'activité biologique est donc un moteur essentiel de la structuration et de la fertilité des sols.

d. Le relief

Le relief influence fortement la distribution et l'évolution des sols à travers :

- le drainage de l'eau,
- l'intensité de l'érosion,
- l'accumulation ou la perte de matériaux fins et de matière organique.

Les sols développés en position de pente sont souvent peu épais et jeunes, tandis que ceux situés en bas de versant ou en plaine sont généralement plus profonds et mieux évolués.

e. Le temps

Le temps est un facteur déterminant de la pédogenèse. La formation d'un sol fonctionnel nécessite des centaines à des milliers d'années. Plus la durée d'évolution est longue, plus les processus pédogénétiques conduisent à une différenciation marquée des horizons et à une complexité accrue du profil pédologique.

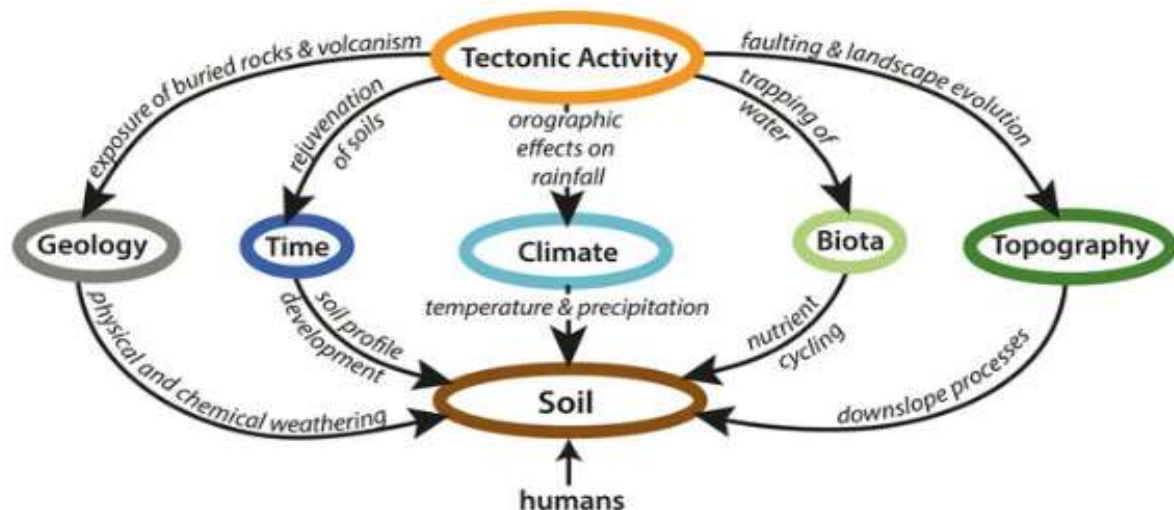


Figure 1.2. Tectonic activity has a direct influence on the major soil-forming factors, namely parent material (geology), time, climate, organisms (biota) and topography defined by Jenny (1994).

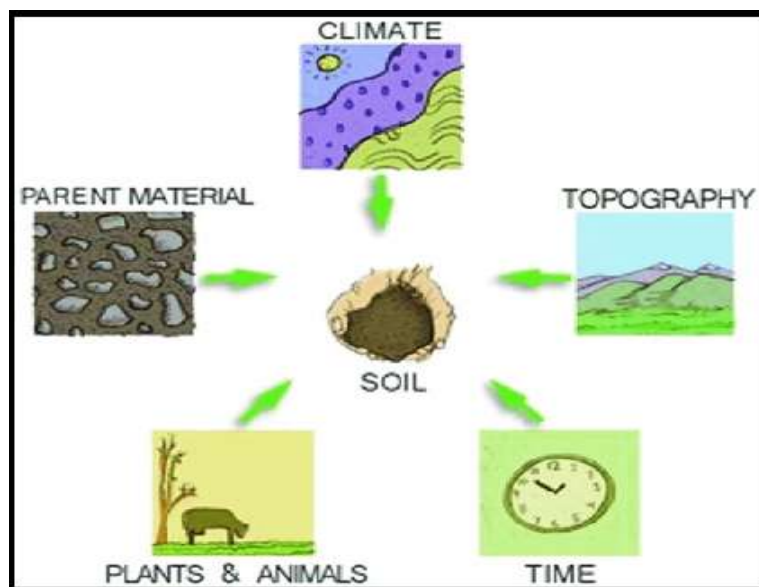


Figure 1.3. Facteurs de formation du sol (Jenny, 1941).

La pédogenèse résulte de l'interaction de cinq facteurs majeurs : la roche mère (P), le climat (C), les organismes vivants (O), le relief (R) et le temps (T). L'action combinée de ces facteurs contrôle la vitesse d'évolution du sol, ses propriétés morphologiques, physico-chimiques et biologiques, ainsi que le degré de différenciation de son profil pédologique.

1.4.2. Organisation du sol en horizons pédologiques

Sous l'effet des processus pédogénétiques, le sol s'organise verticalement en horizons superposés formant le **profil pédologique**. Chaque horizon possède des caractéristiques propres.

- **L'horizon O** correspond à la couche organique superficielle, constituée de débris végétaux et animaux à différents stades de décomposition. Il joue un rôle fondamental dans l'apport de matière organique, la protection du sol contre l'érosion et la régulation du microclimat du sol.
- **L'horizon A** est un horizon organo-minéral riche en humus et en activité biologique. Il constitue la couche la plus fertile du sol et la plus importante pour la croissance des plantes. C'est dans cet horizon que se concentrent les racines, les microorganismes et la majorité des processus biologiques.
- **L'horizon B** est une zone d'accumulation (illuviation) des éléments minéraux lessivés depuis les horizons supérieurs, tels que les argiles, les oxydes de fer et d'aluminium ou les carbonates. Il influence fortement la rétention en eau, la réserve minérale et les propriétés chimiques du sol.
- **L'horizon C** correspond à la roche mère altérée, encore peu transformée par les processus pédogénétiques. Il représente le stade initial de formation du sol et assure la transition entre le sol et la roche sous-jacente.

Cette organisation verticale conditionne la fertilité du sol, la disponibilité en eau, la circulation des nutriments et le fonctionnement global des écosystèmes naturels et agricoles.

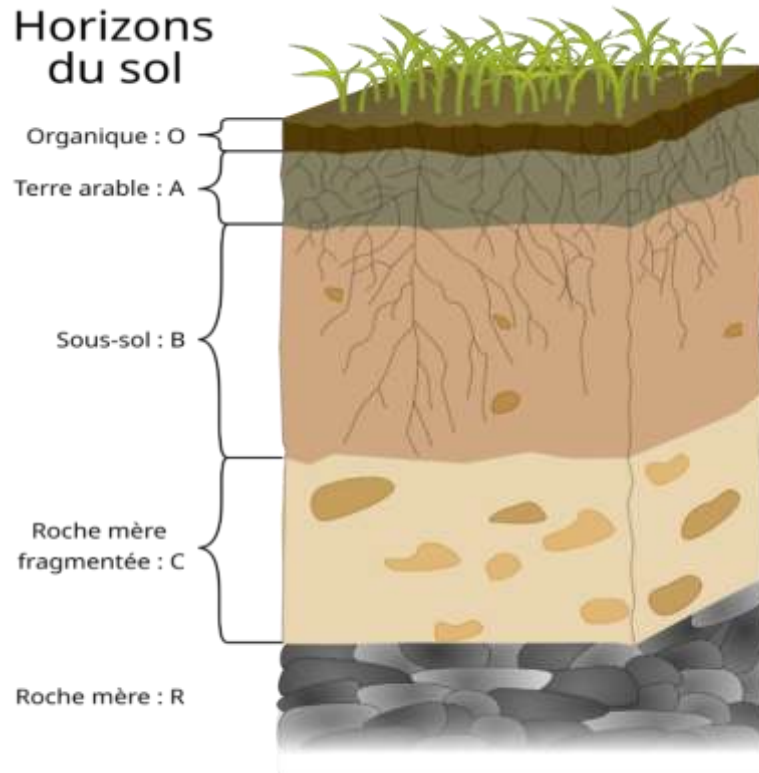


Figure 1.4 : Profil pédologique du sol montrant la différenciation verticale des horizons (O, A, B, C).

1.5. Rôle du sol dans les écosystèmes

Le sol constitue un compartiment central des écosystèmes terrestres. Il assure des fonctions écologiques fondamentales en interaction étroite avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. À travers ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, le sol conditionne la productivité des écosystèmes, le maintien de la biodiversité, la régulation des cycles biogéochimiques et la durabilité des systèmes naturels et agricoles.

1.5.1. Support de la production végétale

Le sol joue un rôle primordial dans la production végétale en fournissant aux plantes les conditions indispensables à leur croissance et à leur développement. Il assure notamment :

- **L'ancrage mécanique des plantes**

Le sol constitue le support physique des systèmes racinaires, permettant aux plantes de se maintenir en position verticale et de résister aux contraintes mécaniques telles que le vent

ou l'érosion hydrique. La structure du sol, sa porosité et sa stabilité conditionnent la pénétration et le développement des racines.

- **L'approvisionnement en eau**

Le sol agit comme un réservoir d'eau accessible aux plantes. Grâce à sa porosité et à sa capacité de rétention hydrique, il stocke l'eau issue des précipitations ou de l'irrigation et la restitue progressivement aux racines. L'eau du sol est essentielle aux processus physiologiques des plantes, notamment la photosynthèse, le transport des nutriments et la régulation thermique.

- **La fourniture des éléments nutritifs**

Le sol fournit aux plantes les éléments minéraux essentiels (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, oligo-éléments) nécessaires à leur croissance. Ces nutriments proviennent de l'altération des minéraux, de la décomposition de la matière organique et de l'activité biologique du sol. La capacité du sol à stocker, échanger et libérer ces éléments conditionne directement la fertilité des écosystèmes.

Ainsi, le sol détermine la productivité primaire des écosystèmes naturels (forêts, prairies, steppes) et agricoles, et constitue un facteur clé de la sécurité alimentaire mondiale.

1.5.2. Réservoir de biodiversité

Le sol abrite une biodiversité exceptionnelle composée de micro-organismes (bactéries, champignons dont les mycorhizes), de microfaune (protozoaires, nématodes), de mésofaune (acariens, collemboles) et de macrofaune (vers de terre, insectes du sol). Ces organismes interagissent au sein de réseaux trophiques complexes assurant la décomposition de la matière organique, le recyclage des nutriments, la structuration du sol et la régulation des cycles biogéochimiques. La biodiversité du sol constitue un pilier essentiel du fonctionnement des écosystèmes et de la durabilité des systèmes agricoles, contribuant directement à la fertilité des sols et à la sécurité alimentaire.

Cette biodiversité joue un rôle clé dans la décomposition de la matière organique, le recyclage des nutriments et la structuration du sol, dont nous pouvons citer ces rôles comme suit :

- **Micro-organismes** : Décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments.
- **Microfaune** : Régulation des populations microbiennes, libération des éléments nutritifs.

- **Mésafaune** : Fragmentation de la matière organique, amélioration de la structure du sol.
- **Macrofaune** : Aération, structuration du sol, formation de galeries favorisant l'infiltration de l'eau.

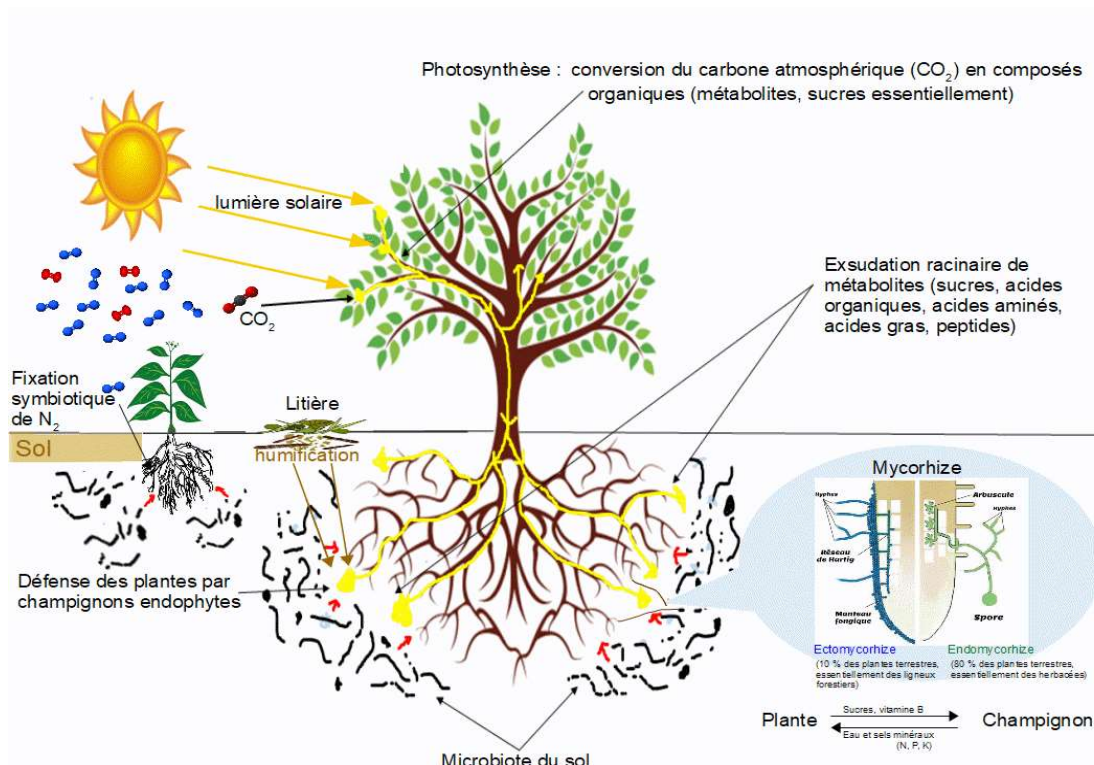


Figure 1.5 : Biodiversité du sol et organisation fonctionnelle.

a. Diversité des organismes du sol

- **Les micro-organismes** : bactéries, archées, champignons (dont les mycorhizes) et actinomycètes, responsables de la majorité des processus biochimiques du sol.
- **La microfaune** : protozoaires et nématodes, qui se nourrissent principalement de micro-organismes et participent à la régulation de leurs populations.
- **La mésafaune** : acariens et collemboles, jouant un rôle clé dans la fragmentation de la matière organique et le contrôle des communautés microbiennes.
- **La macrofaune** : vers de terre, insectes du sol, termites, fourmis, qui modifient profondément la structure du sol par leurs déplacements et leurs activités biologiques.

b. Fonctions écologiques de la biodiversité du sol

Les organismes du sol interagissent au sein de réseaux trophiques complexes et assurent des fonctions écologiques majeures :

- **Décomposition de la matière organique** : transformation des résidus végétaux et animaux en humus stable,
- **Recyclage des nutriments** : libération progressive des éléments minéraux assimilables par les plantes,
- **Structuration du sol** : formation d'agrégats stables, amélioration de la porosité et de l'aération,
- **Régulation des cycles biogéochimiques** : cycles du carbone, de l'azote, du phosphore et du soufre.

c. Rôles spécifiques des groupes biologiques du sol

- **Micro-organismes** : Décomposition de la matière organique, minéralisation des nutriments, fixation biologique de l'azote, dégradation des polluants.
- **Microfaune** : Régulation des populations microbiennes, stimulation de l'activité microbienne, libération rapide des éléments nutritifs.
- **Mésafaune** : Fragmentation de la matière organique, incorporation des résidus dans le sol, amélioration de la structure et de la stabilité des agrégats.
- **Macrofaune** : Aération du sol, bioturbation, formation de galeries favorisant l'infiltration de l'eau, le drainage et le développement racinaire.

d. Importance écologique et agronomique

La biodiversité du sol constitue un pilier fondamental du fonctionnement des écosystèmes terrestres. Elle contribue directement :

- à la fertilité des sols,
- à la résilience des écosystèmes face aux perturbations,
- à la durabilité des systèmes agricoles,
- et à la sécurité alimentaire.

La dégradation des sols (érosion, pollution, compactage, perte de matière organique) entraîne une diminution de cette biodiversité, compromettant à long terme le fonctionnement des écosystèmes et la production végétale.

1.5.3. Régulation des cycles biogéochimiques

Le sol joue un rôle central dans la régulation des cycles biogéochimiques en assurant le stockage, la transformation et le transfert des éléments chimiques essentiels à la vie. Par l'intermédiaire de ses composantes minérales, organiques et biologiques, le sol constitue une interface majeure entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère, influençant directement le fonctionnement des écosystèmes et les équilibres environnementaux à différentes échelles spatiales et temporelles.

1.5.3.1 Régulation du cycle du carbone

Le sol représente l'un des plus importants réservoirs de carbone de la planète, stockant davantage de carbone que la biomasse végétale et l'atmosphère réunies. Le carbone du sol est principalement présent sous forme de matière organique issue des résidus végétaux et animaux, de la biomasse microbienne et de l'humus stable.

Les processus de décomposition, d'humification et de stabilisation de la matière organique déterminent la dynamique du carbone dans le sol. Une partie du carbone est minéralisée et libérée sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) par la respiration microbienne, tandis qu'une autre partie est stabilisée à long terme grâce aux interactions avec les minéraux argileux et les oxydes métalliques. Cette capacité de stockage et de séquestration du carbone confère au sol un rôle clé dans la régulation du climat, en limitant l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère.

1.5.3.2 Régulation du cycle de l'azote

Le sol constitue un compartiment fondamental du cycle de l'azote, élément essentiel à la croissance des plantes mais potentiellement polluant lorsqu'il est mal régulé. Plusieurs processus biologiques majeurs s'y déroulent :

- **La fixation biologique de l'azote**, réalisée par des micro-organismes libres ou symbiotiques, qui transforment l'azote atmosphérique (N_2) en formes assimilables par les plantes ;

- **La minéralisation de l'azote organique**, permettant la libération d'ammonium (NH_4^+) à partir de la matière organique ;
- **La nitrification**, processus aérobie au cours duquel l'ammonium est oxydé en nitrates (NO_3^-) par des bactéries spécialisées ;
- **La dénitrification**, processus anaérobie conduisant à la réduction des nitrates en gaz azotés (N_2O , N_2), contribuant aux pertes d'azote et aux émissions de gaz à effet de serre.

L'équilibre entre ces processus conditionne la disponibilité de l'azote pour les plantes, la fertilité des sols et la qualité des eaux souterraines.

1.5.3.3 Régulation du cycle de l'eau

Le sol joue un rôle déterminant dans le cycle hydrologique en régulant la circulation, le stockage et la restitution de l'eau. Grâce à sa structure et à sa porosité, il favorise l'infiltration des eaux de pluie, limite le ruissellement de surface et réduit les risques d'érosion et d'inondation.

Le sol agit également comme un réservoir hydrique, stockant l'eau dans ses pores et la rendant progressivement disponible pour les plantes et les organismes du sol. Il participe en outre à la filtration et à l'épuration naturelle de l'eau, en retenant les particules fines, les nutriments et certains polluants avant leur transfert vers les nappes phréatiques.

1.5.3.4 Interactions et enjeux environnementaux

Les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau sont étroitement interconnectés au sein du sol. Toute modification des propriétés physiques, chimiques ou biologiques du sol (changement d'usage des terres, pratiques agricoles, dégradation) peut perturber ces cycles et entraîner des impacts environnementaux majeurs tels que l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, la contamination des ressources en eau et la perte de fertilité des sols.

Ainsi, le sol constitue un régulateur essentiel des équilibres environnementaux globaux, jouant un rôle clé dans la régulation du climat, la durabilité des écosystèmes et la préservation de la qualité des ressources en eau.

1.5.4. Filtration et dégradation des polluants

Grâce à ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, le sol agit comme un filtre naturel, capable de retenir, transformer ou dégrader de nombreux contaminants.

1.6. Liens entre sol, biodiversité et sécurité alimentaire

La sécurité alimentaire mondiale repose de manière étroite et durable sur la qualité, la fonctionnalité et la résilience des sols. En tant que support de la production agricole et réservoir de biodiversité, le sol constitue un pilier fondamental des systèmes alimentaires. La capacité des sols à fournir des services écosystémiques essentiels conditionne non seulement les rendements agricoles, mais aussi la stabilité des productions face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques croissantes.

1.6.1 Rôle des sols dans la sécurité alimentaire

Des sols fertiles, bien structurés et biologiquement actifs assurent une production agricole durable en fournissant aux plantes les ressources nécessaires à leur développement. Ils permettent notamment :

- **Des rendements agricoles stables et durables**, grâce à une disponibilité équilibrée des nutriments et de l'eau ;
- **Une meilleure résistance aux stress climatiques**, tels que les sécheresses, les excès hydriques ou les vagues de chaleur, grâce à une bonne capacité de rétention en eau et à une structure favorable au développement racinaire ;
- **Une réduction de la dépendance aux intrants chimiques**, les sols biologiquement actifs assurant une part importante de la fertilisation par le recyclage naturel des nutriments.

Ainsi, la durabilité des systèmes agricoles dépend directement du maintien de la fertilité physique, chimique et biologique des sols.

1.6.2 Contribution de la biodiversité du sol aux agroécosystèmes

La biodiversité du sol joue un rôle clé dans le fonctionnement et la résilience des agroécosystèmes. Les interactions entre micro-organismes, faune du sol et racines des plantes favorisent :

- **La disponibilité des nutriments**, par la décomposition de la matière organique, la minéralisation et la fixation biologique de l'azote ;
- **L'amélioration de la structure du sol**, grâce à la formation d'agrégats stables, à la bioturbation et à l'augmentation de la porosité ;

- **La résilience des agroécosystèmes**, en renforçant la capacité des sols à absorber les perturbations (stress hydrique, attaques biologiques, changements climatiques).

Les associations symbiotiques, telles que les mycorhizes et les rhizobactéries, illustrent le rôle stratégique de la biodiversité du sol dans l'optimisation de l'absorption des nutriments et l'amélioration de la productivité végétale.

1.6.3 Dégradation des sols et menaces sur la sécurité alimentaire

À l'inverse, la dégradation des sols constitue une menace majeure pour la sécurité alimentaire mondiale. Les processus tels que :

- l'érosion hydrique et éolienne,
- la salinisation,
- la pollution chimique,
- la compaction,
- la perte de matière organique et de biodiversité,

entraînent une diminution de la fertilité des sols et une baisse progressive de la productivité agricole. Cette dégradation réduit la capacité des sols à fournir des services écosystémiques essentiels et accentue la vulnérabilité des systèmes agricoles face aux changements climatiques.

La Figure ci-dessous, illustre l'organisation verticale du sol en horizons pédologiques et la diversité biologique qu'il abrite. Ces deux dimensions structurale et biologique sont étroitement liées et conditionnent les fonctions écologiques du sol, notamment la fertilité, la productivité végétale et la résilience des agroécosystèmes, éléments clés de la sécurité alimentaire.

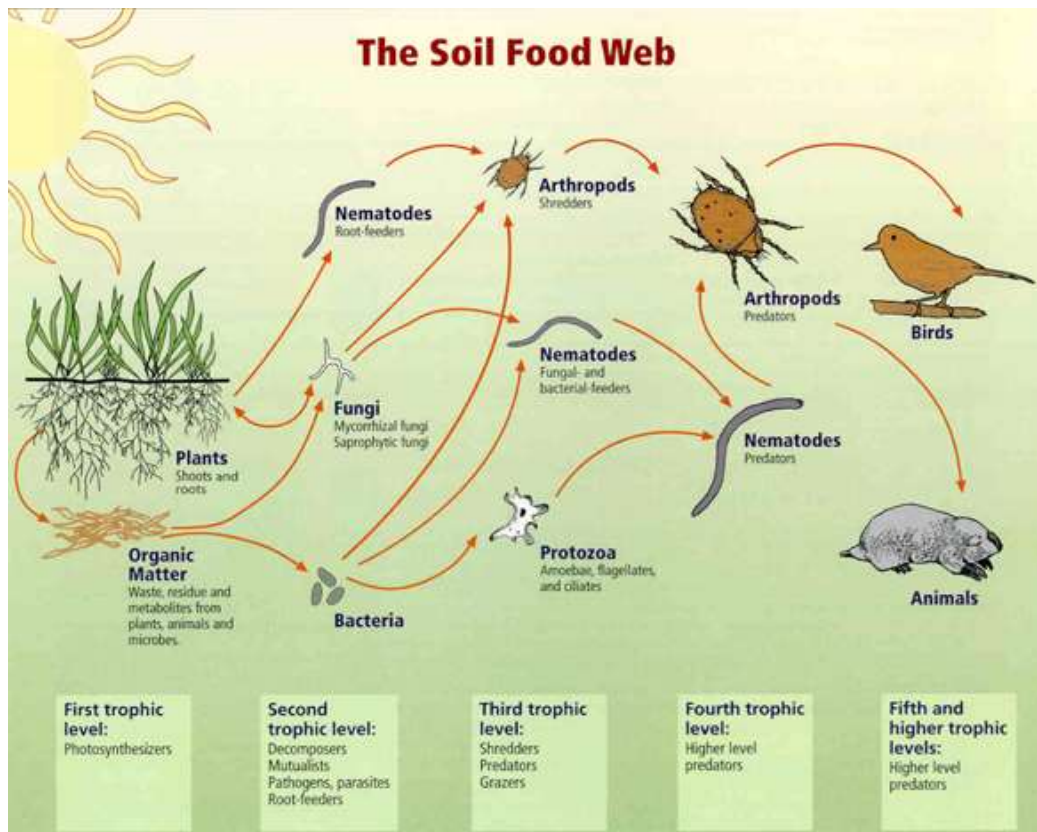


Figure 1.6. Relation entre le réseau trophique du sol, les oiseaux et les mammifères

1.6.4 Vers une gestion durable des sols

La préservation de la biodiversité du sol et la restauration des sols dégradés constituent des leviers essentiels pour assurer la sécurité alimentaire à long terme. Les approches de gestion durable des sols (agriculture de conservation, rotations culturales, apports organiques, réduction du travail du sol) permettent de maintenir la fertilité, d'améliorer la résilience des agroécosystèmes et de garantir une production alimentaire suffisante pour les générations futures.

Ainsi, le maintien de sols vivants et fonctionnels apparaît comme une condition indispensable à la durabilité des systèmes alimentaires et à la sécurité alimentaire mondiale.

Conclusion du chapitre

Le sol est une ressource stratégique, au carrefour des enjeux environnementaux, agricoles et alimentaires. Comprendre sa nature, sa formation et ses fonctions écologiques constitue une étape essentielle pour élaborer des stratégies efficaces de préservation des sols, de conservation de la biodiversité et de sécurité alimentaire durable.