

La microbiologie du sol est une branche de l'écologie microbienne dont l'objectif principal est l'étude du rôle des micro-organismes dans le sous-écosystème appelé aussi « système ».

Les sols se forment dans la zone d'interface entre la lithosphère et l'atmosphère, où se développent les organismes vivants de la biosphère. Le sol a été défini comme « la partie de la croûte terrestre où la géologie et la biologie se rencontrent ».

II.1. Composition du sol

II.1.1. La composition minérale : les sols minéraux dérivent directement de la décomposition des roches mères ou d'autres matériaux inorganiques. On y trouve principalement de la silice, de l'aluminium et du fer, puis, en moindre quantité, les éléments suivants : Ca, Mg, K, Na, Mn, N, S, P.

II.1.2. La composition organique : la matière organique contenue dans le sol est l'humus. Il s'agit de matières organiques provenant de la transformation de la matière organique d'êtres morts. Cette transformation est réalisée par les organismes vivants du sol.

L'humus absorbe et retient l'eau ainsi que les ions (positifs uniquement) du sol, puis les transfère vers les racines des végétaux. Il est donc responsable de la fertilité du sol. Il contient également de l'air et de l'eau.

La nature d'un sol est déterminée par sa composition, mais aussi par son environnement climatique et géographique, qui conditionnent à la fois la distribution de sa végétation et de sa faune.

Les principaux facteurs physico-chimiques qui agissent significativement sur les microenvironnements sont d'ordre climatique : la température et l'eau.

II.1.3. La microflore du sol : La population microbienne du sol, connue sous le nom de *microflore tellurique*, se compose de six groupes principaux de micro-organismes : bactéries, actinomycètes, champignons, algues, protozoaires et virus. Même si les bactéries sont les plus abondantes, leur poids global sur une superficie donnée est inférieur à celui des autres organismes, car elles sont extrêmement petites.

Un Kg de sol fertile contient environ 3 000 milliards de bactéries, 400 millions de champignons microscopiques, 50 millions d'algues, 30 millions d'animaux unicellulaires (protozoaires) et de vers, ainsi que toutes sortes d'insectes.

Les micro-organismes adhèrent de manière spécifique ou non spécifique aux particules inertes ainsi qu'aux surfaces des organismes vivants du sol.

La présence des microbiotes autochtones est permanente et n'est pas liée à l'apport externe de nutriments, contrairement à la microflore allochtone.

L'activité microbienne principale des sols se localise dans les couches superficielles, riches en matières organiques, où les microorganismes se fixent massivement, ainsi que dans l'humus et surtout dans la rhizosphère périphérique des racines végétales.

II.1.3.1. Les bactéries : sont en général des hétérotrophes, c'est-à-dire des organismes qui tirent leur énergie de la dégradation de la matière organique du sol. Ce sont les plus nombreux, leur nombre étant généralement plus important que celui des cinq autres groupes réunis.

En fonction des propriétés physico-chimiques du sol, tous les types physiologiques de bactéries sont représentés dans la microflore tellurique : autotrophes et hétérotrophes, psychrophiles, mésophiles et thermophiles, aérobies, anaérobies facultatifs et anaérobies. Les bactéries les plus répandues dans le sol sont les *Corynebacteriaceae*, qui pourraient représenter jusqu'à 65 % de la microflore bactérienne totale ; les bacilles sporulés en représenteraient environ 25 %, et les 10 % restants comprendraient différents genres.

Ce sont des bactéries spécialisées dans la dégradation de la cellulose (en anaérobiose, elle est décomposée par des *Clostridium* mésophiles et thermophiles), de la lignine (le composé végétal le plus difficilement métabolisé), de la pectine et de la chitine. On y trouve également des réducteurs de sulfate, des fixateurs d'azote, etc.

II.1.3.2. Les actinomycètes : Ce sont des bactéries filamenteuses hétérotrophes, dont la plupart sont des Gram positifs. Ces bactéries possèdent un mycélium ramifié dont le diamètre (0,5 à 1,5 µm) est plus fin que celui des champignons.

Leur classification est basée sur la structure de leur appareil végétatif (bâtonnets ou mycéliums) et sur leur mode de reproduction (fragmentation, formation de conidies, de sporangiophores ou de sporangioles). Les actinomycètes sont des décomposeurs primaires de la matière végétale résistante, comme l'écorce, les feuilles et les tiges. Ils sont particulièrement efficaces dans la dégradation de la cellulose, de la chitine et de la lignine. Les espèces du genre *Frankia* forment des symbioses fixatrices d'azote avec les casuarinacées et d'autres plantes supérieures.

Ces bactéries possèdent également d'autres capacités métaboliques très importantes, comme la production de pigments et d'antibiotiques.

Le genre *Streptomyces* produit la géosmine, un composé volatil qui confère au sol son odeur terreuse caractéristique.

II.1.3.3. Les champignons : les champignons comprennent les levures et les moisissures. Ils sont répartis en quatre groupes selon leur régime alimentaire : les **décomposeurs** (matière organique fraîche), les **prédateurs** (notamment les nématodes), les **pathogènes** et **parasites** (occasionnant des dégâts sur les cultures) et les **symbiotiques** (champignons *Trichoderma* ou *mycorhiziens*). Leur rôle dans la décomposition de la matière organique et le recyclage des éléments est très important. Ils dégradent la cellulose et la lignine des végétaux.

Les champignons du sol forment une biomasse qui est souvent aussi importante que la biomasse bactérienne. Ils sont également dominants dans les sols acides, mais absents dans les sols saturés d'eau, car ces conditions sont bien plus favorables aux bactéries.

La grande majorité des champignons isolés sont ceux qui produisent un grand nombre de spores, notamment les Mucorales (*Mucor*, *Mortierella*, *Rhizopus*) et les déuteromycètes (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Alternaria* et *Botrytis*).

II.1.3.4. Les algues et les bactériophages : ils ont une importance mineure en nombre et en activité, mais ils contrôlent l'équilibre biologique du système.

Les algues du sol comprennent des espèces coccoïdes et filamenteuses. Les groupes les plus courants sont les *Chlorophyceae* et certaines diatomées, qui sont particulièrement présentes dans les milieux humides.

Parmi les micro-organismes photosynthétiques du sol, les cyanobactéries dominent dans les sols neutres et alcalins, tandis que les algues sont plus communes dans les sols acides.

Les algues isolées dans le sol sont variées et se développent dans les zones humides superficielles, au niveau des films d'eau entourant les particules.

Les algues ne sont jamais aussi nombreuses dans le sol que les bactéries, les actinomycètes ou les champignons. Elles sont présentes en grand nombre là où la lumière pénètre et où l'humidité est suffisante.

II.1.3.5. Les protozoaires : les genres de protozoaires du sol sont les mêmes que ceux des environnements aquatiques. Très peu d'entre eux sont exclusivement trouvés dans le sol. Les espèces les plus communes sont : *Heteromita globosa*, *Colpoda cucullus* et *Hartmanella hyalina*. Ce sont des consommateurs de bactéries, de levures et de champignons ; ils participent également à la décomposition de la matière organique.

II.2. Interactions microorganismes/plantes

Les interactions entre populations microbiennes peuvent être négatives (compétition, amensalisme), positives (commensalisme, synergie ou mutualisme), ou positives pour l'une et négatives pour l'autre population (parasitisme ou prédation). De nombreux exemples montrent l'existence de tous ces types d'interactions entre populations microbiennes dans les sols. L'inhibition des champignons pathogènes *Gaeumannomyces graminis* des racines de blé par *Pseudomonas fluorescens*, due à la production in situ d'un antibiotique de type phénazine, est un exemple d'interaction amensale entre microorganismes.

Il existe dans le sol de nombreux types d'associations symbiotiques entre microorganismes et plantes. Les plus remarquables sont la formation de nodules dans les systèmes racinaires par les **bactéries fixatrices d'azote** et de mycorhizes par les mycètes.

II.2.1. La rhizosphère

II.2.1.1. Définition : la région du sol sous l'influence de la racine.

II.2.1.2. Les bactéries de la rhizosphère : les bactéries les plus communes sont à Gram négatif, avec pour genres principaux *Pseudomonas*, *Achromobacter* et *Agrobacterium*, auxquels s'ajoutent des bactéries du cycle de l'azote et des bactéries aérobies cellulolytiques. On trouve également des bactéries fixatrices d'azote des genres *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* et *Frankia*.

II.2.1.3. Localisation

- dans le sol, à proximité de la racine (sol rhizosphérique) ;
- à la surface de la racine (rhizoplan).
- insérées dans les tissus de la racine sans y former d'organes particuliers (endo-rhizosphère).

II.2.1.4. Fonctions principales :

- consommation des productions de la racine (on parle de « rhizodéposition » pour désigner l'ensemble des composés organiques issus de la racine) ;
- promotion de la croissance des plantes ;
- protection des plantes contre les parasites ;
- symbioses mutualistes (nodulaires) ;
- compétition avec les plantes pour les éléments minéraux ;
- parasitisme et autres effets antagonistes.

II.2.2. Les mycorhizes (myco = champignon et rhiza = racine)

II.2.2.1. Définition : association symbiotique, généralement à bénéfice mutuel, entre un champignon et la racine d'une plante.

II.2.2.2. Contrat de symbiose entre le champignon et la plante.

Les sols fournissent aux plantes les éléments nutritifs dont elles ont besoin pour effectuer leur photosynthèse et donc croître. La plante s'engage à fabriquer des sucres en utilisant le gaz carbonique de l'air et l'énergie de la lumière. Elle fournira une partie de ces sucres aux micro-organismes champignons, afin de leur apporter le carbone et l'énergie dont ils ont besoin.

En retour, le champignon s'engage à fournir à la plante de l'eau et des sels minéraux qu'il aura prélevés dans le sol, à distance de ses racines. Le champignon est en effet plus efficace que la plante pour mobiliser et transporter les sels minéraux.

II.3. Rôle des microorganismes dans les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs

La matière organique présente dans le sol, l'eau et les autres écosystèmes subits de multiples transformations métaboliques microbiennes qui permettent de libérer ses éléments chimiques constitutifs sous forme inorganique : carbone, azote, soufre, etc.

Ce processus de **biodégradation microbienne** de la matière organique sous toutes ses formes est général à tous les écosystèmes de la planète. Il est permanent et s'effectue par la circulation de la matière entre les organismes vivants et leur environnement.

Il s'effectue alternativement par **biosynthèse de matière organique** à partir de ses éléments minéraux constitutifs (C, H, O, N), puis par **décomposition oxydative**. Ce dernier processus permet leur retour à leur état minéral initial à travers les différents **cycles biogéochimiques des éléments**.

II.3.1. Cycle du carbone

Le cycle du carbone comprend trois étapes : la fixation, la minéralisation et la rétention.

Le carbone existe sous des formes réduites, telles que le méthane et les matières organiques, et sous des formes oxydées, telles que le dioxyde de carbone (CO₂) et le monoxyde de carbone (CO).

II.3.1.1. Réduction du carbone (photosynthèse) : la transformation du gaz carbonique en matière organique est assurée en premier lieu par la réduction ou la fixation, qui correspond à l'étape de synthèse au cours de laquelle le carbone du gaz carbonique est incorporé dans des molécules organiques.

- l'activité photosynthétique des plantes vertes et des algues, puis, dans une moindre mesure, des bactéries photosynthétiques dont le rôle est prédominant dans les océans (cyanobactéries).

II.3.1.2. Oxydation du carbone organique : le CO₂ atmosphérique résulte essentiellement de l'oxydation de la matière organique par les organismes vivants hétérotrophes (animaux, végétaux et microorganismes).

Inversement à la fixation, la minéralisation correspond à l'étape au cours de laquelle le carbone contenu dans les composés organiques retourne dans l'environnement sous forme minérale.

La conversion du carbone organique en carbone minéral est assurée par :

a. La respiration : de nombreuses bactéries aérobies interviennent pour décomposer les composés organiques et les renvoyer à la terre.

Par exemple, les bactéries cellulolytiques du genre *Cytophaga*. Les bactéries pectinolytiques, les actinomycètes et les bacilles. Les produits de cette dégradation sont l'humus.

En anaérobiose, la matière organique est :

b. Fermentée, ce qui aboutit à la formation de méthane (CH₄).

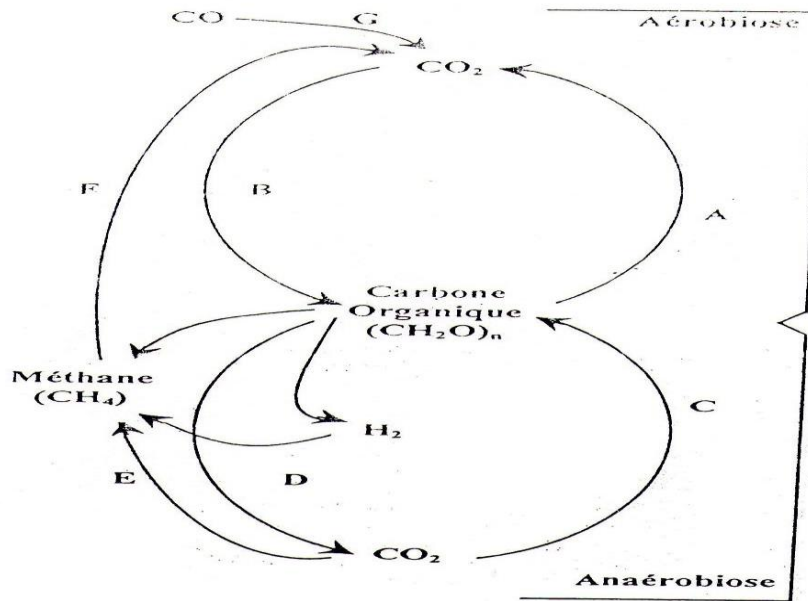


Figure : 9-3. Cycle du carbone. (A) : respiration (plantes, animaux, microorganismes), (B) : fixation réductrice du carbone par photosynthèse (algues, plantes, cyanobactéries) et chimolithotrophie (bactéries), (C) : fixation réductrice du carbone (photosynthèse bactérienne anoxygénique), (D) : fermentation et respiration anaérobie, (E) : méthanogénèse (archaébactéries méthanogènes), (F) : oxydation du méthane (bactéries méthanotrophes), (G) : oxydation du CO atmosphérique.

II.3.2. Cycle d'azote

Le cycle de l'azote est un cycle biogéochimique qui décrit les différentes étapes par lesquelles l'azote passe sous ses diverses formes (diazote, nitrate, nitrite, ammoniac, azote organique). Au cours du cycle, l'azote prend différentes formes toxiques :

Symbole chimique	Nom	Toxicité
NH ₃	Ammoniac	Extrêmement toxique pour tous les poissons. Non assimilables par les plantes.
NH ₄ ⁺	Ammonium	Environ 100 fois moins toxique que l'ammoniac. assimilables par les plantes.
NO ₂ ⁻	Nitrites	Extrêmement toxiques pour tous les poissons. assimilables par les plantes.
NO ₃ ⁻	Nitrates	Peu toxique pour la plupart des poissons. Toxiques pour des poissons sensibles. Extrêmement toxique pour les invertébrés marins.

La fixation, la nitrification, la dénitrification, l'assimilation et l'ammonification sont les cinq étapes du cycle de l'azote.

II.3.2.1. La fixation de l'azote

L'atmosphère terrestre contient presque **79 % d'azote**, principalement sous forme de N₂ et, dans une moindre mesure, de NO₂, NO, NH₃, NH₄⁺, etc. Seules les bactéries sont capables d'absorber directement cet élément, c'est-à-dire le N₂, alors que les plantes sont incapables.

La fixation de l'azote (**1**) est un processus par lequel ces bactéries transforment l'azote atmosphérique en ammoniac (NH_3) grâce à l'enzyme **nitrogénase** (**Absent chez les plantes**), puis en ions ammonium.

Deux types de bactéries sont impliqués dans ce processus :

- les bactéries fixatrices d'azote vivent à l'état libre (fixation libre) ;
- les bactéries fixatrices d'azote vivent en association symbiotique (fixation symbiotique).

L'azote des engrais industriels (**1C**) est quant à lui fixé par des procédés physico-chimiques.

a. Les bactéries fixatrices d'azote vivent à l'état libre (fixation libre) et réalisent une fixation non symbiotique (**1A**). On les trouve dans les sols en contact direct avec les racines des plantes. Elles comprennent des bactéries hétérotrophes **aérobies** comme *Azotobacter* et *Beijerinckia*, ou anaérobies comme *Clostridium* et *Desulfovibrio*, ainsi que des organismes photosynthétiques comme les algues bleues (*Cyanophycées*) et les cyanobactéries. On peut aussi rencontrer certaines moisissures comme *Penicillium*, *Aspergillus* et *Mucor*.

b. Les bactéries fixatrices d'azote vivent en association symbiotique (1B)

Deux groupes de bactéries ont été identifiés comme fixatrices d'azote en association avec les plantes supérieures. Il s'agit des Rhizobiums, qui s'associent généralement aux légumineuses, mais aussi à d'autres espèces (*papilionacées*, *mimosacées*, *césalpiniacées*), et des *Frankia*, des bactéries filamenteuses sporulantes, associées à des plantes dites actinorhiziennes, comme les *casuarinacées*.

Les rhizobiums, qui s'installent dans les cellules, se différencient en bactéroïdes et synthétisent la nitrogénase, l'enzyme qui catalyse la fixation de l'azote de l'air. Dans le cas des symbioses actinorhiziennes, les hyphes de *Frankia* qui pénètrent dans les cellules végétales se différencient en vésicules, siège de la synthèse de la nitrogénase.

❖ **Formation du nodule** : les bâtonnets Gram (-) mobiles, classés dans le groupe Rhizobium, agissent au niveau des poils absorbants des racines. Ils lisent la paroi cellulaire et pénètrent directement dans la racine.

La plante réagit à cette association en accélérant la division cellulaire à cet endroit, ce qui donne finalement une forme **nodulaire (un gonflement au niveau des racines)** appelée **nodule** ou **nodosité**. C'est dans ces nodules que l'azote atmosphérique (N_2) est fixé, puis assimilé par la plante.

II.3.2.2. Ammonification

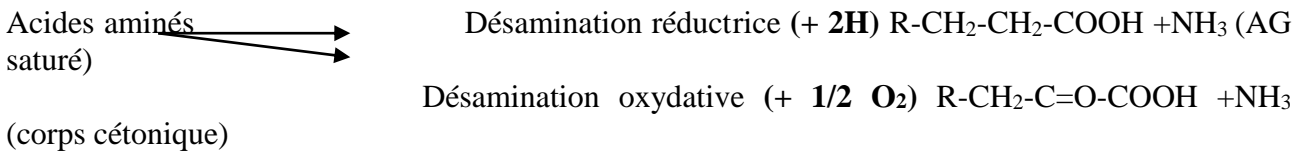
Presque tout l'azote du sol est intégré à des molécules organiques, principalement des **protéines**, lors de la décomposition d'un organisme végétal mort ; les protéines sont hydrolysées en acides aminés grâce à des enzymes protéolytiques (**3**).

Ces acides aminés perdent ensuite leur groupement aminé, qui est converti en ammoniac (NH_3) au cours d'un processus appelé désamination (**B**) (**désamination directe, oxydative ou réductrice**).

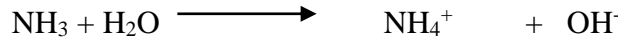
De nombreuses bactéries et mycètes aérobies et anaérobies participent à la libération de l'ammoniac ; ce processus est appelé **ammonification** (transformation de l'azote organique en azote ammoniacal). (**B**) comme suit :

Décomposition (enzymes)
Protéines provenant des cellules mortes $\xrightarrow{\text{Microbienne}}$ acides aminés.

\swarrow Désamination direct $\text{R-CH=CH-COOH} + \text{NH}_3$ (AG insaturé)



- La libération d'ammoniac (NH₃) à l'extérieur de la cellule microbienne est influencée par les conditions physico-chimiques du sol.
- L'ammoniac est un gaz qui s'échappe rapidement d'un sol sec, mais si le sol est **humide**, il se dissout dans l'eau pour former de l'ammonium (NH₄⁺).



- Les bactéries et les plantes utilisent les ions ammonium (NH₄⁺) pour synthétiser des acides aminés.

II.3.2.3. Nitrification (transformation de l'ammonium en nitrites, puis en nitrates).

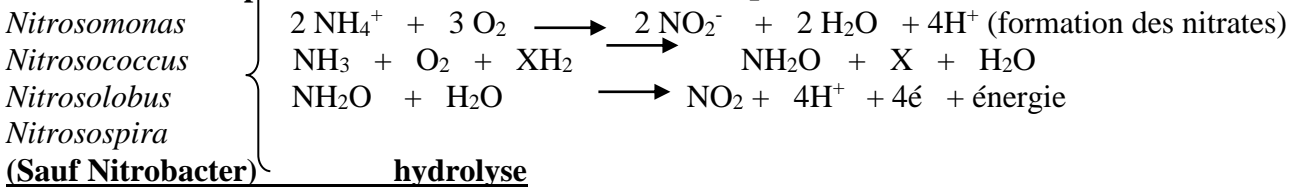
L'azote issu de la minéralisation des matières organiques est principalement de l'ammonium (NH₄⁺) ; cette forme azotée peut également être apportée sous forme d'engrais. En conditions aérobies, des micro-organismes l'oxydent en deux étapes pour se procurer de l'énergie (bactéries autotrophes).

Il s'agit de la formation de NO₂⁻ et NO₃⁻ par oxydation de NH₃⁺ et NH₄⁺ (C = 4) par des bactéries **autotrophes nitrifiantes** appartenant aux genres *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira* et *Nitrosolobus*. Ces bactéries vivent dans le sol et tirent leur énergie de l'oxydation des ions NH₄⁺.



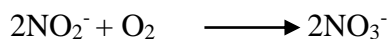
- la nitrification s'effectue en deux étapes :

❖ **1^{ère} étape** : c'est la formation du nitrite NO₂ O₂ selon la réaction suivante :

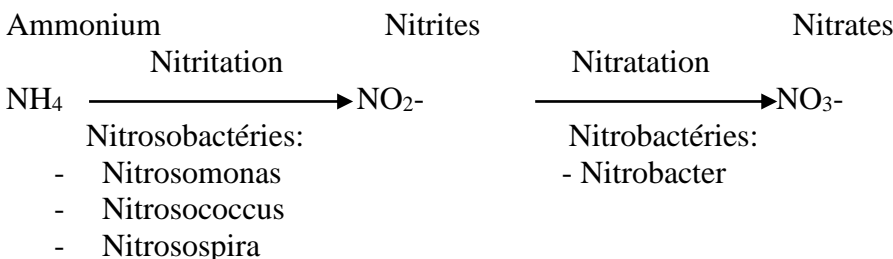


- Ces réactions sont catalysées par une enzyme fixée sur la membrane des bactéries, l'**ammoniooxygénase**.

❖ **2^{ème} étapes** : C'est la formation de nitrates par *Nitrobacter* selon la réaction :

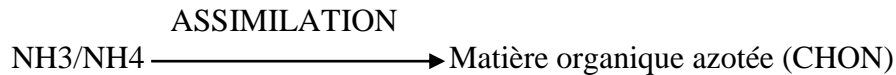


Remarque : *Nitrobacter* et *Nitrosomonas* sont des bactéries autotrophes.



II.3.2.4. Assimilation (incorporation de l'azote des nitrates dans les acides aminés et les autres composés organiques azotés) ;

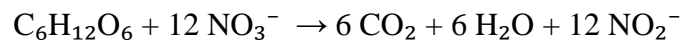
- Les plantes utilisent généralement les nitrates (NO_3) comme source d'azote pour la synthèse des protéines, dans un processus appelé **assimilation (A = 5)**.
- Les ions nitrates (NH_4^+) ont plus de chances d'entrer en contact avec les racines des plantes que les ions ammonium (NH_4^+).
- Les NH_4^+ constituent la meilleure source d'azote, car leur intégration dans les protéines ne nécessite pas d'énergie. Toutefois, comme ils portent une charge positive, ils sont habituellement liés dans les sols chargés négativement, ce qui limite leur mobilité.



I.3.2.5. Dénitrification (transformation des nitrates en azote moléculaire).

À la différence de la nitrification, la dénitrification est un processus biologique réducteur qui se produit en conditions anaérobies.

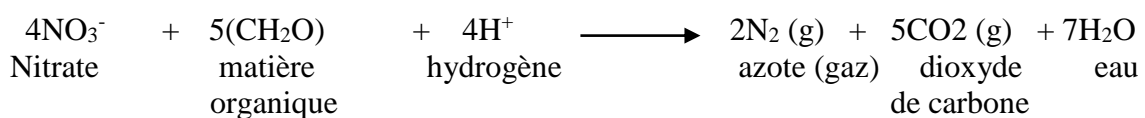
En l'absence d' O_2 , le nitrate peut être utilisé comme accepteur final des électrons lors d'un processus appelé **respiration anaérobie**.



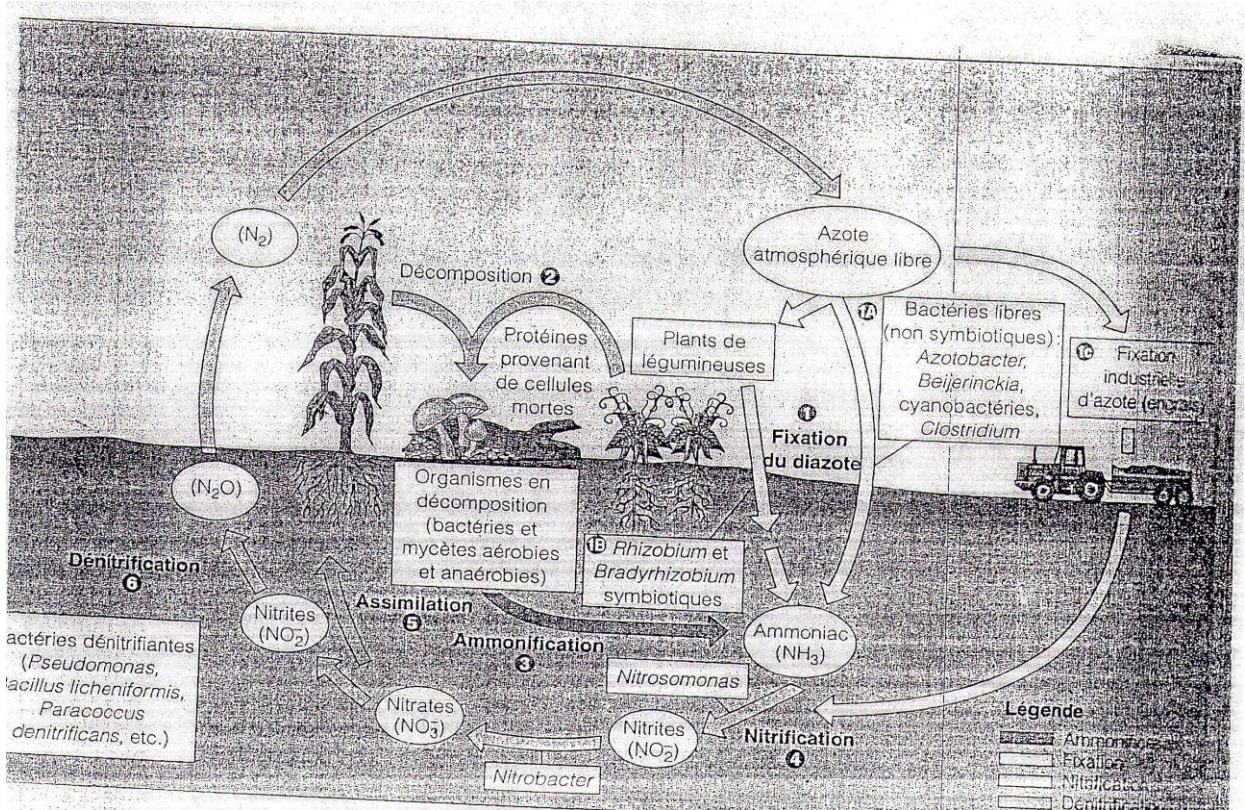
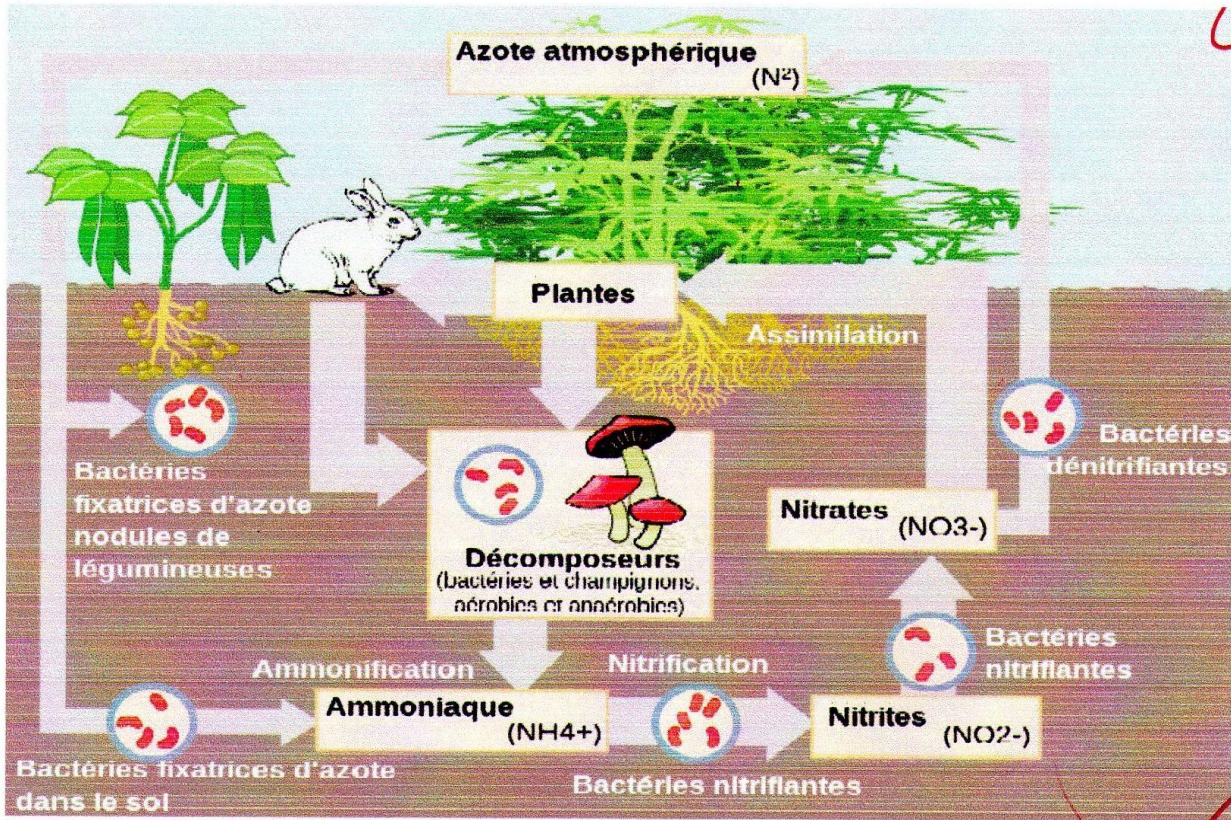
Le processus de dénitrification (**D = 6**) entraîne une libération d'azote sous forme gazeuse : il retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N_2 , avec comme produits secondaires du CO_2 et de l'oxyde d'azote N_2O , un gaz.



Il s'agit d'une réaction de réduction du nitrate par l'intermédiaire de bactéries qui transforment la matière organique. La réaction est de type :



Ce processus est réalisé par des bactéries hétérotrophes aérobies anaérobies facultatives des genres *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Micrococcus* et *Achromobacter*, qui réduisent les nitrates en composés gazeux : les oxydes d'azote (NO , N_2O , parfois même jusqu'au N_2). Ce processus entraîne des pertes d'azote depuis le sol jusqu'à l'atmosphère.



URE 27.3 Cycle de l'azote. En général, l'azote de l'atmosphère passe successivement par les étapes de fixation, de nitrification et de dénitrification. Les nitrates assimilés par les plantes et les animaux après la nitrification passe par les étapes de décomposition et d'ammonification, puis il est de nouveau soumis à une nitrification.

Le schéma ci-dessous illustre le cycle de l'azote dans le système terrestre :

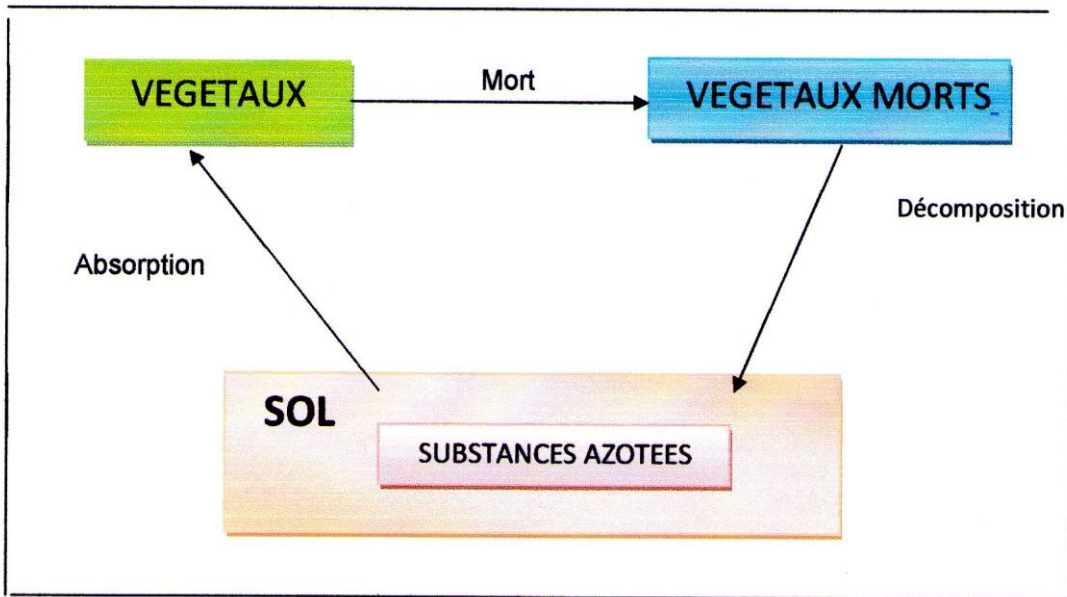


Schéma ultra simplifié du cycle de l'azote dans le système terrestre

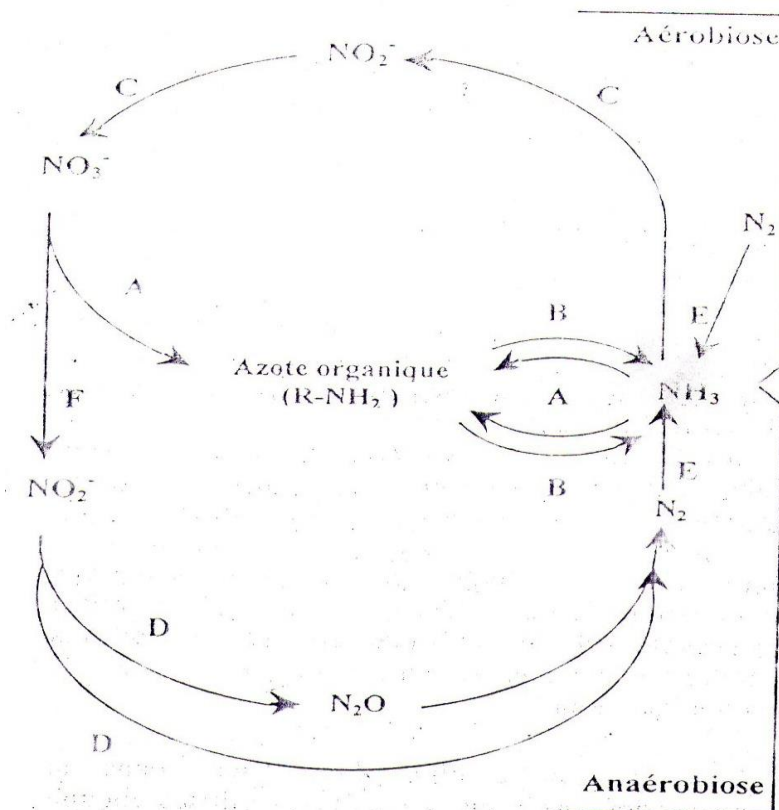


Figure : 9-4. Cycle de l'azote. (A) : Assimilation, (B) : Ammonification, (C) : Nitrification, (D) : Dénitrification, (E) : Fixation de l'azote atmosphérique, (F) : Réduction dissimilatoire des nitrates.

II.3.3. Bactéries intervenant dans le cycle du soufre

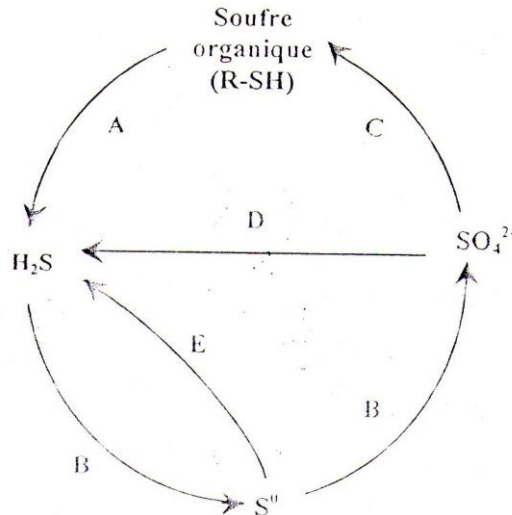


Figure : 9-5. Cycle simplifié du soufre. (A) : Minéralisation, (B) : Oxydation, (C) : Réduction anabolique, (D) : Réduction catabolique, (E) : Réduction.

II.3.3.1. L'assimilation : le soufre est assimilé par les plantes sous forme de sulfates (SO_4), puis immédiatement réduit avant d'être incorporé dans les composés organiques.

Exemple : formation de groupements sulfhydryle (SH) dans les acides aminés soufrés.

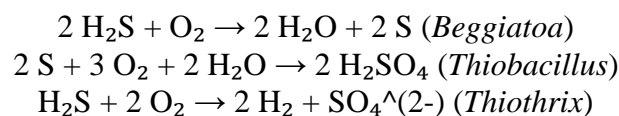
II.3.3.2. La réduction des sulfates en sulfures : les sulfates (SO_4) sont chimiquement stables et ne se réduisent pas **spontanément** ; ils sont directement utilisés comme source de soufre dans la biosynthèse des algues, des plantes, des champignons et des bactéries ;
La réduction s'effectue selon deux méthodes :

- **Réductions anaboliques** : intégration des sulfates dans la biosynthèse de composés organiques (R-SH). Ex. : *Desulfovibrio*.
- **Réductions cataboliques** : dans la respiration anaérobie, les sulfates sont utilisés comme accepteur final des électrons et sont réduits en sulfure (SH).

II.3.3.3. Minéralisation du soufre organique en une forme inorganique : le sulfure d'hydrogène (H_2S) : les composés soufrés des animaux et des plantes sont décomposés par des microorganismes, ce qui aboutit à la formation de H_2S .

II.3.3.4. Oxydation du soufre : l' H_2S obtenu est oxydé en soufre élémentaire, puis en sulfate (SO_4^{2-}), par :

- des bactéries aérobies : *Thiobacillus*, *Beggiatoa* et *Thiothrix*.
- des bactéries anaérobies : *Chromatium*.



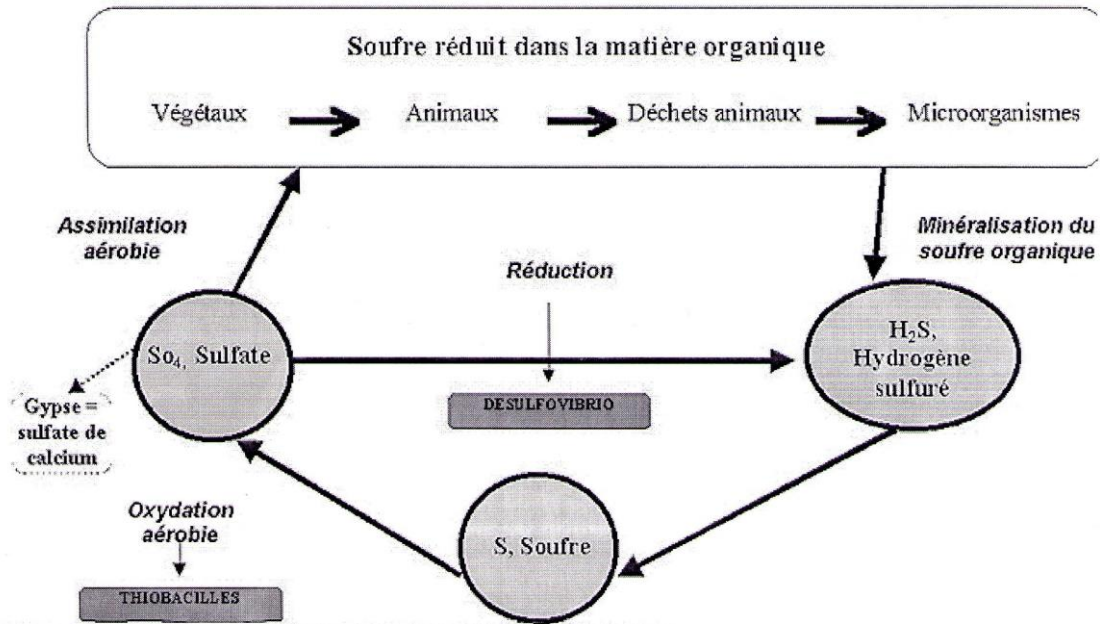


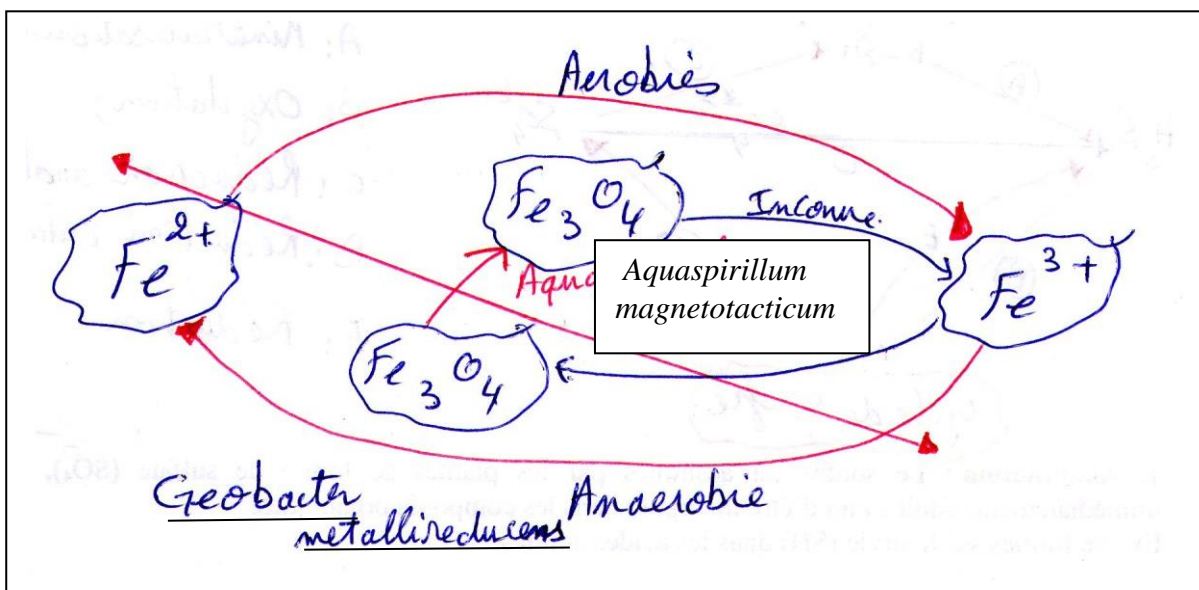
Schéma de cycle soufre. (3)

II.3.4. Cycle du fer : le fer est un nutriment très abondant dans la nature, mais dont la disponibilité effective est réduite en raison de sa très faible solubilité. Il existe sous deux états d'oxydation : le **fer ferrique** (Fe³⁺) et le **fer ferreux** (Fe²⁺), dont la disponibilité est également fortement liée au pH du milieu.

Les principaux groupes bactériens qui oxydent le Fe²⁺ en Fe³⁺ sont :

- *Thiobacillus ferrooxidans* dans les milieux acides ;
- *Gallionella* dans les milieux neutres ;
- *Sulfolobus* dans les milieux thermophiles acides.

La réduction du fer est principalement réalisée par des **bactéries ferrugineuses anaérobies** qui utilisent spécifiquement l'ion ferrique comme accepteur d'électrons lors de la respiration anaérobie, ce qui entraîne l'accumulation de composés ferreux dans le milieu.



À pH = neutre *Gallionella*

À pH = acide *Thiobacillus thiooxidans*
Leptospirillum

À pH acide + thermophiles = *Sulfolobus*.

II.3.5. Le cycle du phosphore

Le phosphore est également un nutriment essentiel qui participe à un cycle biogéochimique.

Il est essentiel à tous les organismes. Il existe principalement sous forme d'ion diphosphate PO_4^{2-} et subit peu de transformations. Le cycle du phosphore comprend la conversion des formes solubles en formes insolubles et des phosphates organiques en phosphates inorganiques. Ces transformations sont liées au pH.

Exemple : les bactéries *Thiobacillus* produisent des acides qui dissolvent le phosphate contenu dans les roches.

Contrairement au carbone, au soufre et à l'azote, il n'y a pas de formation de composés phosphorés volatils.