

## Chapitre 4: Transformations édaphiques d'origine microbienne Cycles biogéochimiques

### I. Le cycle de carbone

#### Introduction

Dans la nature le carbone se retrouve sous 2 formes :

#### Le Corganique :

- ✓ Produit par des organismes vivants.
- ✓ La liaison du carbone se fait avec d'autres carbones ou à des éléments comme l'H, N, P dans les molécules organiques ou les hydrocarbures.

#### Le Cinorganique :

- ✓ Il est associé à des composés inorganiques qui ne contiennent pas de lien C-C ou C-H. Exemples : le C du CO<sub>2</sub> atmosphérique et le C des calcaires CaCO<sub>3</sub>.

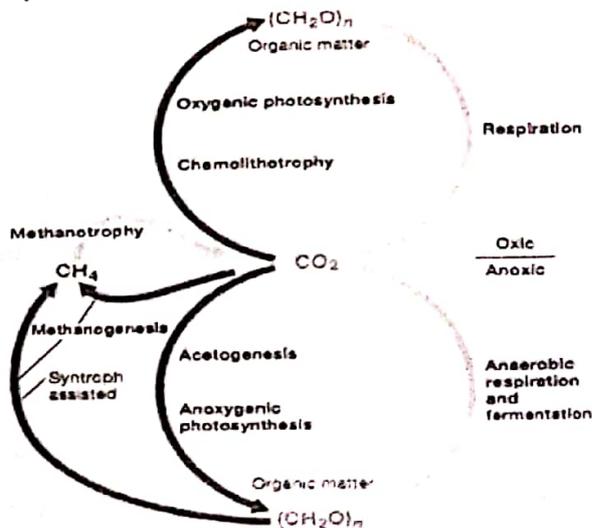
On distingue deux cycles du carbone : cycle du carbone organique et cycle de carbone inorganique. Ces 2 cycles sont reliés.

Deux phases essentielles : (cycle de carbone)

- ✓ **La phase de fixation du gaz carbonique CO<sub>2</sub> atmosphérique :**
  - Se réalise par les organismes photosynthétiques (plantes, algues, cyanobactéries, quelques bactéries photosynthétiques).
  - conduit à la synthèse de composés carbonés.
- ✓ **La phase de régénération :**
  - Ces composés seront ensuite retournés au sol avec les résidus végétaux, ou à travers les consommateurs après leur mort (animaux).

Le processus de base du recyclage du carbone est le couple photosynthèse-respiration, c'est à dire la conversion du C inorganique du CO<sub>2</sub> en C organique par la photosynthèse et subséquemment l'inverse.

Les mécanismes qui régissent le cycle du carbone au niveau de la biosphère sont : la photosynthèse, la respiration et la régénération (décomposition aérobie ou anaérobie).



Cycle du carbone

مكتبة النور  
AZROU  
Près du Campus Universitaire  
GSM : 06 78 18 79 36 Tél : 05 28 24 89 59

### La photosynthèse

- La photosynthèse est effectuée par les producteurs primaires (végétaux chlorophylliens).
- Elle consomme le  $\text{CO}_2$  et produit l' $\text{O}_2$  et de la matière organique (composés C, H, O, N).
- Il s'agit de molécules dont la base demeure les éléments C, H et O, auxquels s'ajoute d'autres éléments en faibles quantités comme l' N, le P et/ou le S. Cette partie de la matière organique correspond à la productivité primaire, et les organismes impliqués (bactéries, algues et plantes) sont les **producteurs primaires**.
- Ceux-ci captent l'énergie solaire et la transforment en énergie chimique qu'ils stockent dans leurs tissus.
- Cette énergie est transférée aux organismes **consommateurs**, incluant les animaux.
- Le bilan global des réactifs et produits de la photosynthèse :
  - $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{énergie lumineuse} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$

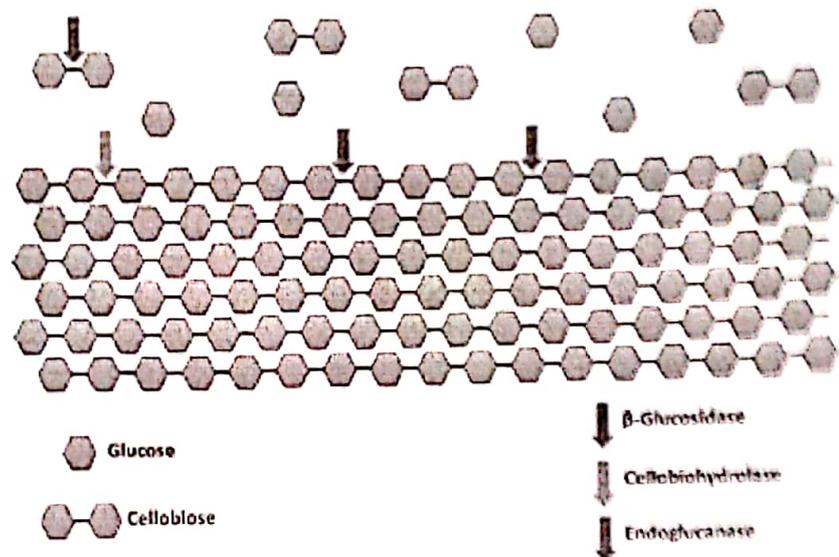
### La respiration

- Les consommateurs tirent leur énergie en ingérant les tissus des producteurs primaires et en respirant.
- La **respiration** est l'inverse de la photosynthèse : à partir de l'oxygène libre  $\text{O}_2$ , elle transforme toute matière organique en  $\text{CO}_2$  :
- La respiration consomme de l' $\text{O}_2$  et rejette du  $\text{CO}_2$  et sert à transformer la matière organique en énergie.
- Elle est réalisée aussi bien par les végétaux que par les animaux.
  - bilan global est :
    - $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{énergie}$ .

### La phase de régénération : la décomposition

- La décomposition est effectuée par les microorganismes présents dans les couches superficielles du sol.
- Elle implique les microorganismes du sol qui dégradent la matière organique (amidon, cellulose, hémicellulose, lignines, protéines, cires...).
- Elle consiste soit :
  - En une décomposition aérobie en présence d' $\text{O}_2$  dans le sol.
  - En une fermentation anaérobie en absence d' $\text{O}_2$  dans le sol.
  - Ces deux mécanismes produisent du  $\text{CO}_2$  :
  - La fermentation anaérobie produit du  $\text{CO}_2$  et du méthane, alors que les microorganismes responsables de la décomposition aérobie produisent du  $\text{CO}_2$  par leur respiration.
- a. **Dégradation de la cellulose = cellulolyse**
- La cellulose est un polysaccharide très répandu dans les cellules végétales où elle constitue l'essentiel de leurs parois.

- C'est une longue chaîne de polymères de glucose alignés selon divers modes.
- Sa dégradation dans le sol dépend de sa structure et du degré de l'activité des microorganismes cellulolytiques.
- Généralement, sa dégradation enzymatique aboutit en premier temps à la cellobiose (dimère de glucose).
- La cellobiose est ensuite transformée en glucose par une enzyme : la cellobiase.
- Les microorganismes cellulolytiques appartiennent à de très nombreuses espèces, les actinomycètes sont les organismes cellulolytiques par excellence.



#### ↓ La microflore cellulolytique mésophile aérobie

- Bactéries : *Cytophaga*, *Cellvibrio*, actinomycètes.
- Champignons : *Aspergillus*, *Curvularia*, *Fusarium*, *Phoma*, *Trichoderma*.
- Les conditions écologiques sont :
  - pH voisin de la neutralité
  - Approvisionnement en azote ammoniacal
  - Humidité proche de la capacité au champ
- Cette microflore cellulolytique mésophile aérobie conduit à la dégradation totale de la cellulose et la production de gaz carbonique.
- Dans les sols hydromorphes: uniquement quelques bactéries:
  - *Clostridium*, *Plectidium*, *Terminosporus*.
- Dans ces conditions la cellulolyse est ralentie, on trouve en plus de CO<sub>2</sub>, des hydrates de carbone, de l'éthanol et des acides organiques (acétique, formique, succinique, butyrique, lactique).

#### ↓ La microflore cellulolytique thermophile :

- Dans les fumiers et les composts où la température est élevée ( $=50^{\circ}\text{C}$ )
- *Clostridium thermocellum*, *Clostridium thermocellulaseum*.

### b. Dégradation de la lignine = ligninolyse:

- La lignine est classée en 3ème position de point de vue abondance après la cellulose et l'hémicellulose.
- Il s'agit de polymères de dérivés du phénylpropane (composés aromatiques).
- Les organismes ligninolytiques sont les basidiomycètes dont:
  - *Agaricus*, *Polyporus*, *Armillaria*, *Lepiota*, *Pholiota*.

## II. Le cycle de l'azote

### Introduction

L'azote (N) se trouve dans l'atmosphère sous forme de gaz  $\text{N}_2$ : forme moléculaire diatomique, représente 78% de l'atmosphère terrestre.

Les organismes vivants ont besoin d'azote pour fabriquer des protéines et des acides nucléiques.

La plupart des organismes surtout les plantes ne peuvent pas utiliser la forme moléculaire diatomique  $\text{N}_2$ . Ils ont besoin de la forme d'azote fixée :

- Ammoniac  $\text{NH}_3$  (forme ammoniacal) : azote lié à l'Hydrogène
- Nitrates  $\text{NO}_3$  (forme nitrique) : azote lié à l'oxygène

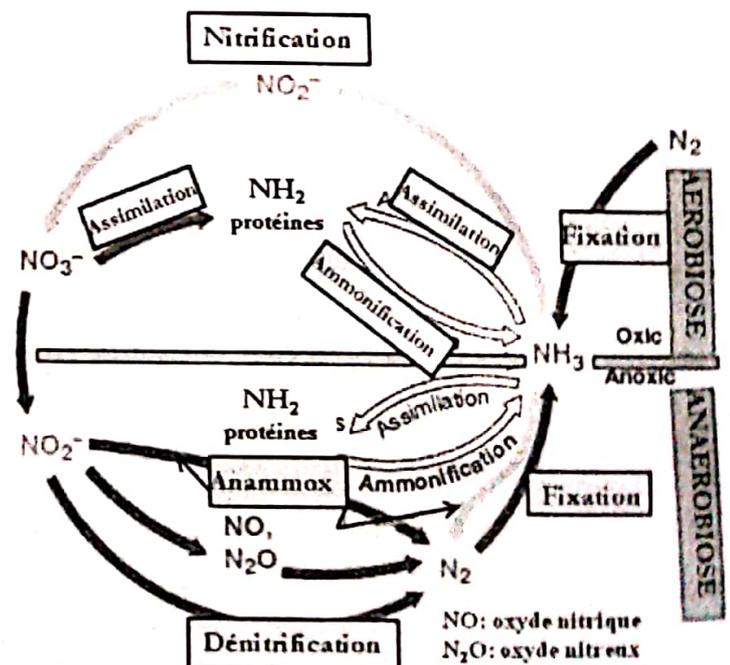
Ces formes minérales proviennent de l'action des microorganismes et des enzymes du sol sur la matière organique.

Le cycle de l'azote est très complexe : il comporte 3 processus de base

- Fixation de l'azote diatomique  $\text{N}_2$
- Nitrification
- Dénitrification

### Étapes du cycle de l'Azote et bactéries impliquées

Déroulement du cycle de l'azote au niveau du sol

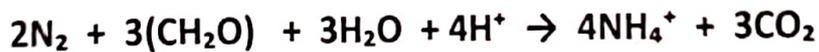


مكتبة النور  
AZROU  
Près du Campus Universitaire  
RSMA : 08 78 18 79 35, TEL : 05 28 74 89 59

- ❖ Les organismes capables d'utiliser le nitrate comme accepteur d'électrons sont toutes les bactéries.
- ❖ Elles sont très répandues sur la surface terrestre.
- ❖ L'ammonium issu de la minéralisation de la matière organique apparaît à la surface en premier lieu, du fait de sa charge positive, il est adsorbé sur les colloïdes du sol chargés négativement et empêché de ce fait de pénétrer dans le sol.
- ❖ Le taux d'O<sub>2</sub> étant élevé à la surface, favorise la nitrification: l'activité des microorganismes nitrifiants est favorisée.
- ❖ Les nitrates formés chargés négativement sont facilement lessivés et enfoncés dans le sol où le taux d'O<sub>2</sub> est faible, le nitrate est alors utilisé par des microorganismes dénitrifiants comme accepteur d'H en présence de matière organique, les produits finaux sont alors l'N moléculaire N<sub>2</sub> ou l'oxyde nitreux qui diffusent dans l'atmosphère.

#### Fixation de l'azote moléculaire

- ❖ Fixation de l'azote: c'est la réduction de l'azote atmosphérique en azote ammoniacale utilisable par les plantes et les animaux.
- ❖ Se fait par des microorganismes possédant une enzyme: *La nitrogénase*



- ❖ Dans les sols où le pH est élevé (alcalin), l'ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ammoniaque) se transforme en ammoniac gazeux NH<sub>3</sub>:



**Ammonium + hydroxyl → ammoniac (gaz) + eau.**

- ❖ La fixation peut se faire selon 3 modèles:
  - ⚡ Fixation libre de l'azote moléculaire par *Azobacter*, *Clostridium* ou les cyanobactéries.
  - ⚡ Symbiose associative entre les graminées et les bactéries fixatrices d'azote moléculaire dans la rhizosphère *Azospirillum*
  - ⚡ Symbiose obligatoire : symbiose entre légumineuses et *Rhizobium*, entre les actinomycètes *Frankia* et les plantes non légumineuses (*Alnus*).
- Symbiose obligatoire

- Dans un premier temps, les racines excrètent des flavonoïdes qui attirent le *Rhizobium* au voisinage des racines et activent des gènes bactériens qui codent pour le facteur de nodulation (facteur Nod).
  - Les poils absorbants de la plante subissent une déformation suite à la réception du signal: Ensuite un filament infectieux prolifère à l'intérieur de la racine et pénètre dans les cellules corticales.
  - Les bactéries pénètrent à l'intérieur de la cellule végétale via ce filament.
  - A l'intérieur des nodules, les bactéries se transforment en bactéroïdes. Leur forme devient irrégulière et plus importante, incapable de se diviser dans ces conditions.
- La fixation libre de l'azote moléculaire est effectuée par (types respiratoires):
- des bactéries aérobies strictes: (*Azobacter*, *Beijerinckia*, *Dexia*, *Spirillum*, *Aquaspirillum*, *Mycobacterium*, *Corynebacterium*),
  - des bactéries anaérobies facultatives (*Klebsiella* et *Bacillus*) ou
  - des bactéries anaérobies strictes (*Clostridium*, *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*).
- La fixation de l'N moléculaire s'effectue aussi par des bactéries et des cyanobactéries photosynthétiques.
- Bactéries photosynthétiques: *Spirillum* et *Chlorobium*.
  - Cyanobactéries: *Anabaena*, *Nostoc*, *Tolyphotrix*, *Calothrix*, *Gleocapsa*.
- Aucun champignon n'est capable de réaliser la fixation de l'azote moléculaire.

## Ammonification

- Ammonification résulte d'une désamination des AA de la matière organique.
- C'est une minéralisation des protéines.
- Elle aboutit à la formation de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) rapidement transformé en ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).
- L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est la forme la plus répandue dans les sols alcalins.
- Les microorganismes ammonifiants ont une grande diversité d'espèces:
- Bactéries: *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Clostridium*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Serratia*
- Actinomycètes et Champignons.

## Nitrification

- La nitrification permet la transformation des produits de la fixation (l'azote ammoniacal  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ) en nitrites  $\text{NO}_2^-$  et nitrates  $\text{NO}_3^-$ .
- C'est une réaction d'oxydation par catalyse enzymatique par des bactéries telluriques et aquatiques.
- Nitrification autotrophe. Se réalise en 2 étapes.
  - Nitrésation ou nitrification (Nitrosomonas)
 
$$2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$$
  - Les bactéries nitrosomonas réalisent la nitrésation ou nitrification, c'est à dire la transformation de l'ion ammonium en ion nitrite  $\text{NO}_2^-$ .

## Nitrification

- Nitratsion (Nitrobacter):
 
$$2\text{NO}_2^- + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_3^-$$
- Les bactéries nitrifiques autotrophes, aérobies et neutrophiles réalisent la nitratsion c'est à dire l'oxydation des ions nitrites en ions nitrates.
- L'ion nitrate est stable et assimilable par les plantes.
- Solubles dans l'eau, les nitrates en excès sont entraînés par lessivage des sols.
- Nitrification hétérotrophe:
  - Il existe des nitrifiants hétérotrophes tels que *Aspergillus fumigatus* à température faible.

## Quelques exemples de procaryotes dans le cycle de l'azote

### Key Processes and Prokaryotes in the Nitrogen Cycle

Process	Example organism
Nitrification ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$ )	<i>Nitrosomonas</i>
$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$	<i>Nitrobacter</i>
Denitrification ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ )	<i>Bacillus</i> , <i>Paracoccus</i> , <i>Pseudomonas</i>
$\text{N}_2$ fixation ( $\text{N}_2 + 8\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{H}_2$ )	<i>Frankia</i>
Ammonification	<i>Ammonium</i>
Ammonification (algues: $\text{N} \rightarrow \text{NH}_4^+$ )	Many organisms can do this
Ammonification ( $\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3$ )	<i>Bacillus</i>

## Dénitrification

- La production du nitrate est très importante, parce que cet ion peut être réduit et incorporé dans la biomasse microbienne et végétale. Ce processus est connu sous le nom de réduction anabolique du nitrate ou réduction assimilatrice.
- Alternativement, pour certains microorganismes, le nitrate sert d'accepteur final d'électrons au cours de la respiration anaérobie (respiration nitrate). Comme l'azote nitré n'est pas incorporé dans le matériel cellulaire, on parlera de la réduction catabolique du nitrate ou réduction dissimilatrice.
- Quand le nitrate est réduit en diazote gazeux ( $\text{N}_2$ ), l'azote est retiré de l'écosystème (perdu) et retourne à l'atmosphère par une série de réactions appelées collectivement dénitrification.

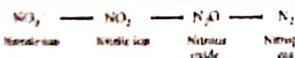
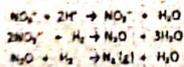
## Dénitrification

- En agriculture, la dénitrification est un processus nuisible. Par exemple, si des champs agricoles fertilisés avec des engrais de nitrate sont gorgés d'eau après de fortes pluies, des conditions anoxiques peuvent se développer et la dénitrification s'installe; cela supprime l'azote fixé dans le sol.
- Dans le cas du traitement des effluents, cependant, la dénitrification est bénéfique car elle convertit  $\text{NO}_3^-$  en  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  diminue la charge d'azote fixée dans l'effluent et qui serait susceptible de stimuler la croissance algale.

## La réduction dissimilatrice des nitrates = dénitrification

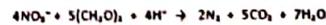
Dans des conditions anaérobies, les microorganismes dénitrifiants utilisent les nitrates comme accepteur final d'électrons à la place d'oxygène.

Si le nitrate est d'abord transformé en nitrite ce dernier ensuite en oxyde nitreux  $\text{N}_2\text{O}$  ou en diazote moléculaire  $\text{N}_2$ .



## La réduction dissimilatrice des nitrates = dénitrification

La réaction globale de dénitrification en présence de la matière organique est la suivante:



Nitrate + matière organique + hydrogène → azote + dioxyde de carbone + eau

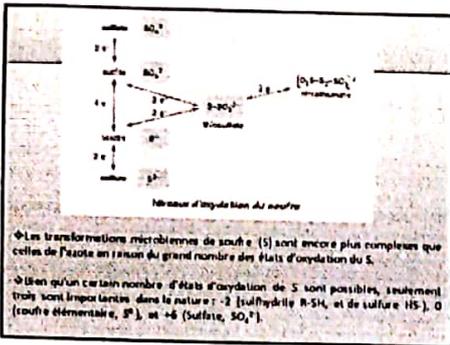
- Les microorganismes responsables de la dénitrification:
  - Des hétérotrophes en nombre limité: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Hyphomicrobium*, *Paracoccus*, *Denitrobacillus*.
  - Certains autotrophes: *Thiobacillus denitrificans*.

Ce phénomène n'existe pas chez les champignons car aérobies.

## Le cycle de soufre

### Introduction

- Tout comme l'azote, le soufre est un élément essentiel à la vie.
- Le cycle de l'azote et le cycle du soufre réservent de la planète.
- Le soufre étant contenu dans les roches ignées (volcaniques) principalement dans la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ).
- L'azote est principalement atmosphérique.
- Le dégazage de la croûte terrestre et subséquent l'alimentation sous des conditions aérobies produisant une grande quantité de soufre sous forme de  $\text{SO}_2$ .
- Après être associé aux organismes, le  $\text{SO}_4^{2-}$  est réduit et converti en formes organiques qui est un élément essentiel des protéines.
- Dans le sol, comme pour l'azote, le soufre existe essentiellement sous forme organique ou autres contenant des AA soufrés (Méthionine, Cystéine, cystéine).
- Le cycle du soufre et le cycle de l'azote se ressemblent dans le sens où ils représentent un nombre de réactions d'oxydation de ces éléments.



### Minéralisation du soufre organique = sulfhydrilisation

La matière organique contenant le soufre est décomposée par des microorganismes décomposeurs (hétérotrophes).

Le soufre organique est ainsi transformé en sulfures tel que sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S (gaz), (responsable des odeurs offensives caractéristiques de la putréfaction des protéines).

Plusieurs hétérotrophes interviennent dans la minéralisation du soufre organique : *Proteus*, *Serratia*, *Clostridium*, *Aspergillus*, *Microspor*.

Ce processus est favorisé par des T° entre 20 à 30 °C et un pH neutre.

### Sulfoxydation

**Microorganismes de la Sulfoxydation**

Constitués essentiellement par les microorganismes suivants :

- Les chimiolithotrophes du genre (*Thiobacillus*)
- Les chimiorganotrophes
- Les photoautotrophes : Les bactéries pourpres (*Chromatiobacteriaceae*) et vertes (*Chlorothibacteriaceae*) sulfuriques.

### Sulfoxydation

**a) Oxydation de H<sub>2</sub>S Par des photoautotrophes**

Deux groupes de bactéries photosynthétiques (photoautotrophes) peuvent oxyder le sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S en soufre élémentaire S et le soufre en sulfate SO<sub>4</sub>.

Dans ces organismes photosynthétiques, le soufre S ou le sulfate SO<sub>4</sub> servent de donneurs d'électrons afin de réduire le CO<sub>2</sub> (à la place de l'eau chez les plantes) afin de synthétiser leur matériel cellulaire à partir de CO<sub>2</sub>.

$$2H_2S + CO_2 \rightarrow (CH_2O) + H_2O + 2S$$

$$2S + 3CO_2 + 5H_2O \rightarrow 3(CH_2O) + 4H_2 + 3SO_4^{2-}$$

S. pourpres sulfuriques : *Chromatiobacteriaceae* et *Chlorobium*  
 S. vertes sulfuriques : *Chlorothibacteriaceae* et *Chlorobium*

NB. on remarque l'analogie avec la réaction globale de photosynthèse chez les plantes

$$2H_2O + CO_2 \rightarrow (CH_2O) + H_2O + O_2$$

### Sulfoxydation

**b) Sulfo-xydation par des chimiolithotrophes :**

La Sulfo-xydation des formes réduites du soufre (S) en sulfates (sulfate sulfurique) SO<sub>4</sub> (processus semblable à la nitrification) est réalisée par des bactéries chimiolithotrophes.

Tous les chimiolithotrophes de la sulfo-xydation sont variés sauf *Thiobacillus thiooxydans* qui est anaérobie et qui au lieu de l'oxygène, utilise le nitrate comme accepteur final d'électrons.

Sulfoxydation par les bactéries chimiolithotrophes (chimiolithotrophes) Genre *Thiobacillus*, *Thiobacillus*, *Sulfolobus* et *Beijerinia*.

**Thiobacillus thiooxydans :**  
 Microphile, aérobie stricte, ne supporte pas des pH faibles (inférieurs à 5). Capable d'oxyder le soufre élémentaire et les sulfures les plus simples H<sub>2</sub>S, S<sub>2</sub> et FeS<sub>2</sub> de façon à produire SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

$$2S + 2O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 \text{ (acide sulfurique)}$$

$$Na_2S_2O_3 + 2O_2 + H_2O \rightarrow Na_2SO_4 + H_2SO_4$$

### Sulfoxydation

**Thiobacillus denitrificans :**

Très proche de *T. thiooxydans* car aussi neutrophile et oxyde les mêmes substrats. Elle s'en distingue par le fait qu'elle supporte des pH faibles (inférieurs à 5) et qu'elle est anaérobie facultatif car capable de dénitrification en anaérobie. Afin d'oxyder le soufre, il utilise le nitrate NO<sub>3</sub> comme accepteur d'électrons à la place de H<sub>2</sub>O.

$$5S + 8NO_3^- + 2H_2O \rightarrow 3H_2SO_4 + 2H_2SO_3 + 3N_2$$

$$OU 5Na_2S_2O_3 + 8NaNO_3 + H_2O \rightarrow 9Na_2SO_4 + H_2SO_4 + 4N_2$$

Remarque :  
 Sulfuroxydants acidophiles (pH optimum 2)  
*Thiobacillus thiooxydans* : S → SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>  
 Supporte des pH très faibles : pH 2 à 3, oxyde le soufre de la même manière que *T. thiooxydans*

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4$$

### Sulfoxydation

**Thiobacillus ferrooxidans :** S ou H<sub>2</sub>S → SO<sub>4</sub>

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 \text{ (acide sulfurique)}$$

$$H_2S + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$$

Le pH optimum 3,0, c'est une bactérie ferrugineuse qui utilise l'énergie d'oxydation du fer ferreux en même temps que l'énergie de l'oxydation des formes réduites du soufre.

$$Fe^{2+} + 1/2 O_2 \rightarrow Fe^{3+} + H_2O$$

**c) Sulfoxydation par les hétérotrophes (chimiorganotrophes)**

De nombreux microorganismes hétérotrophes effectuent également la sulfoxydation : bactéries, actinomycètes, champignons avec un rendement plus faible que les *Thiobacillus*.

### Sulfoxydation

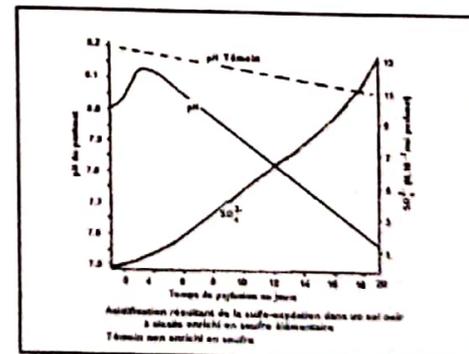
#### Conséquences de la Sulfoxydation

Généralement, la sulfoxydation ne modifie pas sensiblement le pH, car les sulfures formés sont soit assimilés par les plantes ou les vers.

Lorsque le sol reçoit des apports importants de soufre élémentaire (S) ou lorsque le sol contient une grande quantité de sulfures (H<sub>2</sub>S), l'oxydation s'accompagne d'un abaissement de pH.

Dans les sols salins, l'addition de soufre peut conduire à une stimulation des *Thiobacillus*, et de ce fait à une neutralisation du pH dans ce type de sols.

Généralement, l'acidité liée à l'acide sulfurique produit lors de la sulfoxydation permet de solubiliser les phosphates tricalciques (non assimilable par les plantes) en phosphates monocalciques ou de libérer le phosphate inorganique [H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>]<sup>-</sup> assimilable par les plantes.

$$(PO_4)(12)Ca + 12SO_4 + 2H_2O \rightarrow 2PO_4(12)Ca + SO_4 + 2H_2O$$


### Sulfatoréduction

- Processus semblable à la dénitrification: réduction des nitrates
  - Réduction des sulfates à l'état de sulfures ou hydrogène sulfurique H<sub>2</sub>S, ce dernier est toxique pour les plantes.
  - C'est un phénomène qu'on observe dans les sols hydromorphes submergés et très réducteurs par les microorganismes anaérobies stricts ( respirent en absence d'O<sub>2</sub>) qui utilisent le soufre comme accepteur final d'électrons;
- Desulfovibrio, Desulfotomaculum.

### Sulfatoréduction

- Autres genres de bactéries sulfatoréductrices:  
 Desulfobacterium, Desulfobacter, Desulfococcus, Desulfosarcina, Desulfomonas, Desulfobadillus, Desulfosarcina, Desulfobulbus, Desulfotululus, Desulfomicrobium, Thermodesulfobacterium, Desulfanema.
- La réduction des sulfates peut s'effectuer de deux manières:

### Réduction assimilatrice

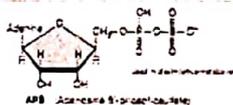
- qui produit des ions sulfure, nécessaires aux synthèses cellulaires.
- $$2CH_3COOH + SO_4^{2-} \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + S^{2-} + H_2O$$
- Acide lactique + sulfate → Acide lactique + CO<sub>2</sub> + S<sup>2-</sup> + H<sub>2</sub>O
- Acide pyruvique + sulfate → Acide pyruvique + CO<sub>2</sub> + S<sup>2-</sup> + H<sub>2</sub>O
- Acide succinique + sulfate → Acide succinique + CO<sub>2</sub> + S<sup>2-</sup> + H<sub>2</sub>O
- L'acide lactique, pyruvique, malique et formique, la choline et les alcools sont des donneurs d'électrons de nature organique.
  - Ces éléments proviennent de la dégradation anaérobie de la matière organique.
  - Leur oxydation s'arrête au stade acide acétique.

### Réduction dissimilatrice

- Dans laquelle le sulfate sert uniquement d'accepteur final d'électron.
- Les réactions de transport d'électrons s'effectuent conduisant à une force proton-motrice et à la synthèse d'ATP par une ATPase en anaérobiose (respiration sulfates) avec production du sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S comme produit terminal de la respiration.

### Biochimie et énergétique de la réduction des sulfates

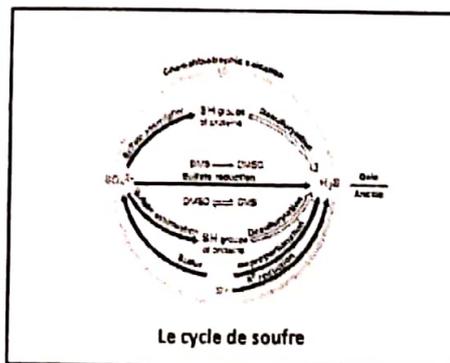
- L'ion sulfate est stable et ne peut être réduit sans avoir auparavant été activé.
- Le sulfate est activé grâce à l'ATP. L'enzyme ATP sulfurylase catalyse l'attachement de l'ion sulfate à un phosphate de l'ATP, ce qui donne l'adénosine phosphosulfate (APS).



- Dans la réduction dissimilative des sulfates, le sulfate de PAPS est réduit directement en sulfite (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) par l'APS réductase, avec libération de l'AMP.
- Dans la réduction assimilative, un autre phosphate est ajouté à l'APS pour former la phosphoadénosine phosphosulfate (PAPS) et c'est alors que le sulfate est réduit.
- Dans le deux cas, le premier produit de la réduction des sulfates est le sulfite, SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.
- Une fois SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> créé, le sulfure est formé grâce à l'intervention d'une sulfite réductase.

### Conséquences de la réduction des sulfates

- La sulfatoréduction s'accompagne généralement par une alcalinisation du sol.
  - Les ions S<sup>2-</sup> peuvent former des sels sodiques ou calciques.
  - En présence d'eau, les sulfures de sodium et de calcium donnent ensuite naissance à des bases.
- $$Na_2S + 2H_2O \rightarrow H_2S + 2NaOH$$
- $$CaS + 2H_2O \rightarrow H_2S + Ca(OH)_2$$
- L'hydrogène sulfuré est généralement toxique vis-à-vis des plantes. Cependant si les conditions sont favorables à la sulfoxydation, son taux peut être réduit.
  - Dans certains sols, l'hydrogène sulfuré réagit avec le fer donnant une forme sulfure de fer inoffensif (toxicité réduite).



مكتبة النور