



Cycle et dynamique des nutriments

L'AZOTE

Tovonarivo RAFOLISY
Laboratoire des Radiolabels
Université d'Antananarivo

L'importance de l'azote dans la nutrition des plantes

- L'azote est l'un des éléments nutritifs majeurs utilisés par les plantes
- C'est le quatrième constituant des plantes qui est utilisé dans l'élaboration de molécules importantes comme les protéines, les nucléotides, les acides nucléiques et la chlorophylle
- L'azote favorise l'utilisation des hydrates de carbone

Les principales sources d'azote du sol

- Une source atmosphérique.
- L'azote est un gaz qui occupe les trois quarts de notre atmosphère. Une part infime de l'azote atmosphérique arrive au sol, à la suite de la synthèse par le passage des éclairs, de nitrate d'ammoniaque entraîné par la pluie. Une part bien plus importante est fixée par les bactéries fixatrices d'azote qui vivent dans le sol soit librement, soit en symbiose avec certaines plantes

- Une source organique.

L'azote contenu dans les déjections animales, et plus généralement dans les matières organiques mortes, est progressivement libéré par l'activité de la microflore aérobie et anaérobie du sol. L'urée, les acides uriques, les protéines, les acides aminés sont d'abord transformés en ammoniacque, puis en nitrites et en nitrates (cf. cycle de l'azote).

- Une source exogène.

L'azote est aussi apporté aux sols par les engrais azotés. Ceux-ci sont synthétisés à partir de l'azote de l'air, ou issus des déchets organiques animaux et humains.

- Une forme organique.

L'azote sous forme organique constitue les réserves en azote du sol. La plus grande partie de l'azote est fixée sur les humus. Elle n'est donc pas directement utilisable par les plantes.

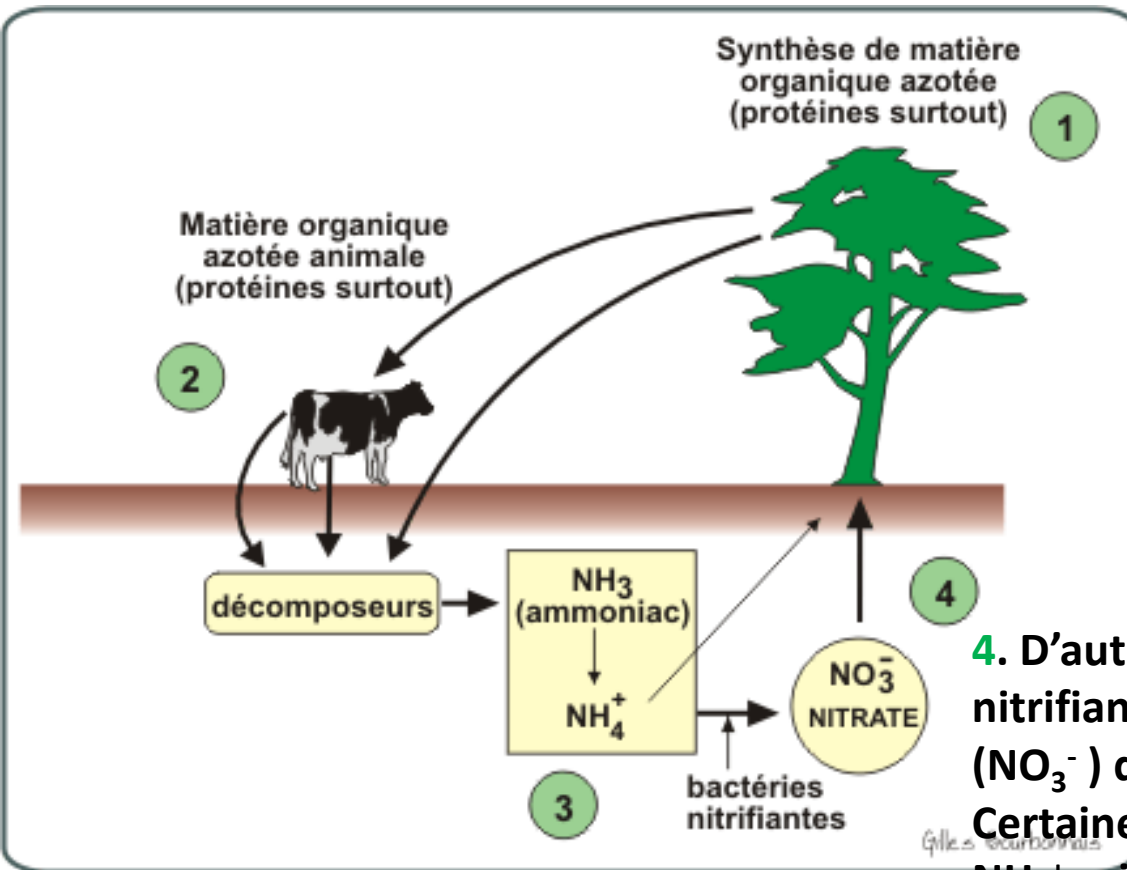
- Une forme ammoniacale.

L'azote ammoniacal est une forme transitoire. Les ions NH_4^+ , issus de l'ammonification, sont retenus sur le complexe adsorbant. Certains de ces ions sont fixés plus ou moins durablement entre les feuillets d'argile. La plupart sont oxydés par les bactéries nitrifiantes (Nitrobacter, Nitrosomonas). Et transformés en nitrates.

- Une forme nitrique.

L'azote nitrique (nitrates) est la seule forme qui soit assimilée de façon importante par les plantes. Les ions NO_3^- ne sont pas retenus sur les colloïdes argilo-humiques. Cela revient à dire que s'ils ne sont pas absorbés par les plantes, ils sont rapidement entraînés par lessivage et définitivement perdus.

Le cycle de l'azote dans une exploitation



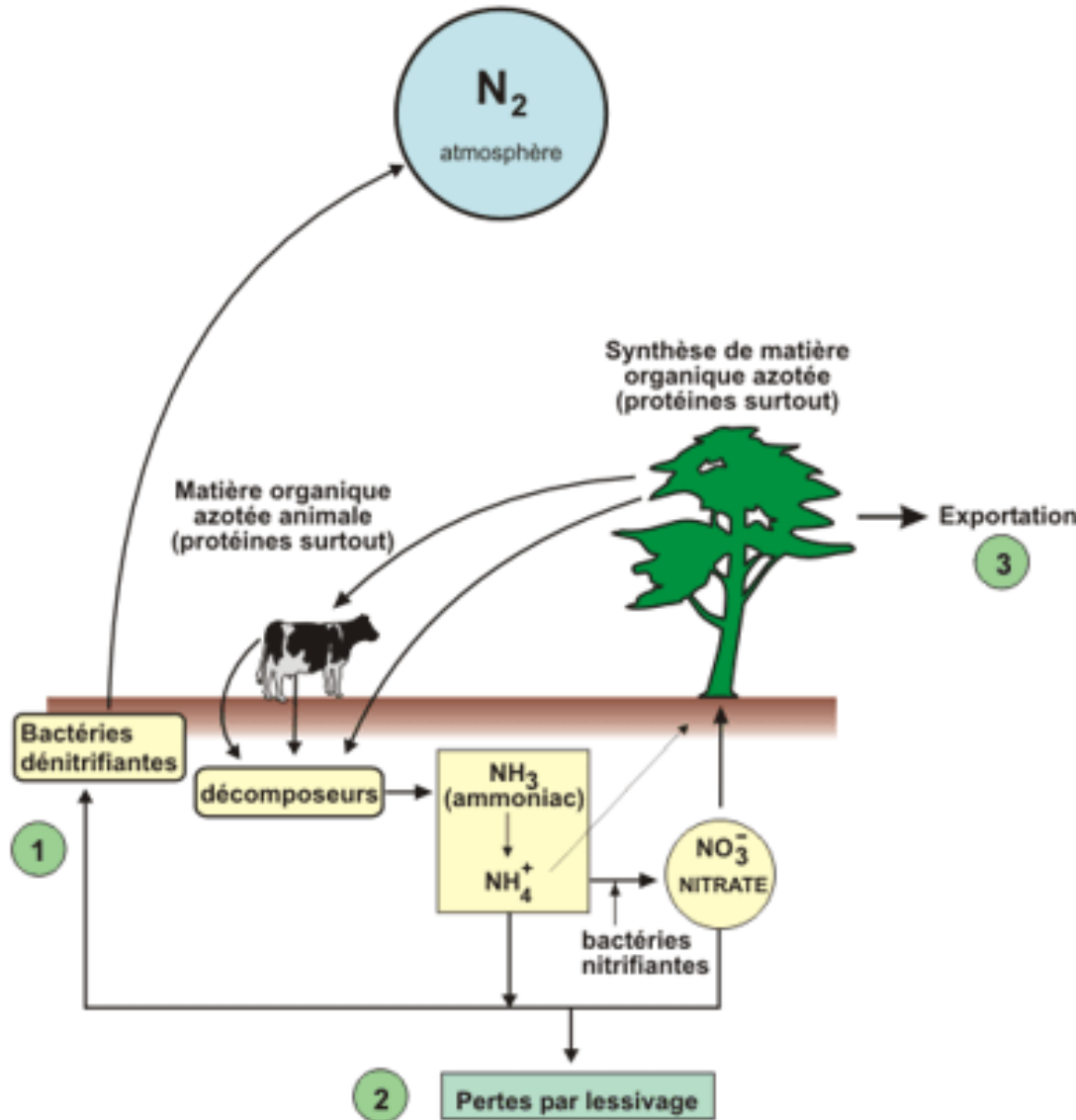
3. Les décomposeurs du sol (bactéries, mycètes) transforment la matière organique azotée provenant des plantes ou des animaux morts en CO_2 , H_2O et ammoniac (NH_3). Au contact de l'eau, l'ammoniac se transforme en ions NH_4^+

1. Les plantes produisent de la matière organique azotée (à partir des sucres fabriqués par photosynthèse et d'ions NO_3^- puisés dans le sol.

2. Les animaux utilisent la matière organique azotée des plantes pour fabriquer leur propre matière organique azotée.

4. D'autres bactéries du sol, les bactéries nitrifiantes, transforment le NH_4^+ en nitrate (NO_3^-) qui peut être assimilé par les plantes. Certaines plantes peuvent assimiler l'ion NH_4^+ qui se forme directement à partir d'ammoniac.

L'azote ne peut pas se recycler à 100%. Il y a toujours des pertes :



Bactéries dénitrifiantes (1)

(à *anaérobie facultative*)

transforment l'azote minéral des sols (NO_3^-) en azote atmosphérique (N_2)

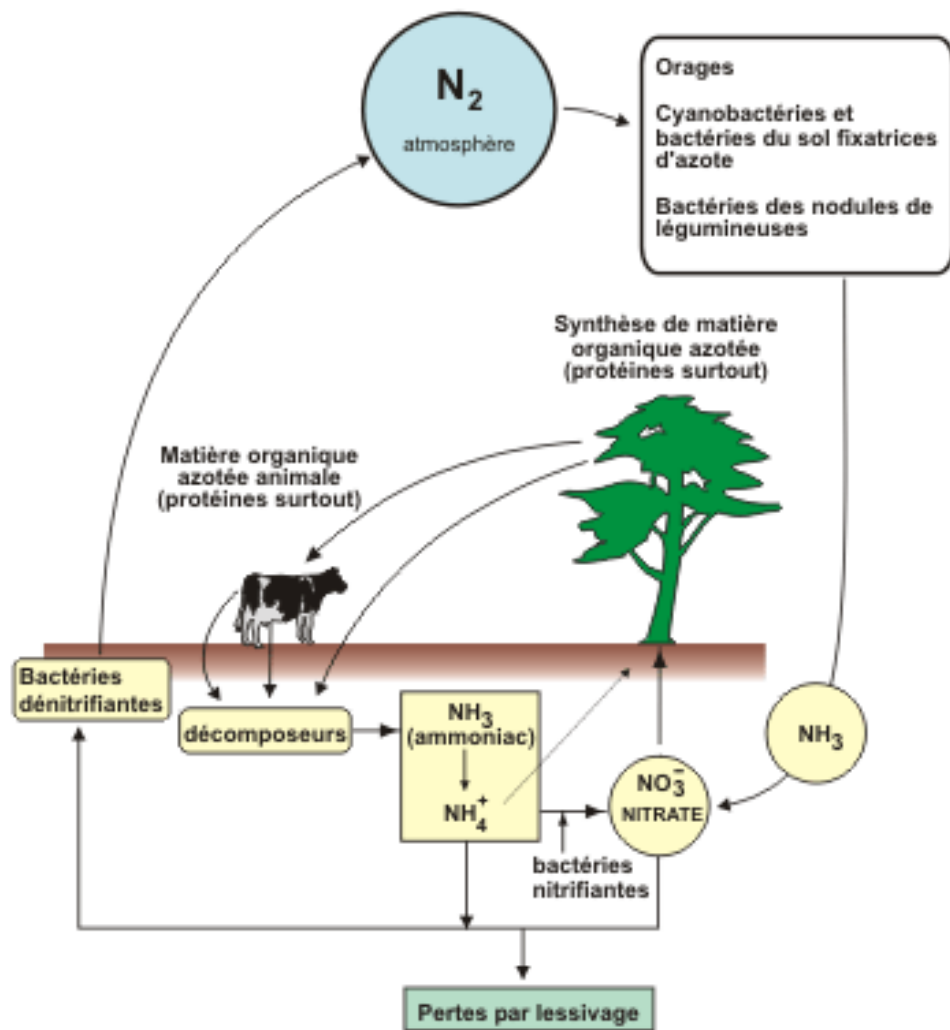
Lessivage de l'azote minéral (2)

Si le sol retient mal l'eau, l'azote minéral peut être entraîné en profondeur vers les nappes d'eau souterraines ou vers les cours d'eau avoisinants.

Matière végétale ou animale exportée (3)

Toute matière vivante qui est enlevée du milieu ne sera pas recyclée en engrais azoté. C'est le cas en agriculture ou lorsqu'on déboise une forêt.

La fixation de l'azote

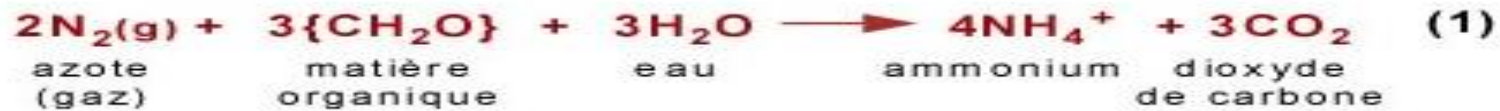


Les orages permettent la formation d'oxydes d'azote qui retombent au sol avec la pluie.

Les bactéries et cyanobactéries fixatrices d'azote du sol. pouvant transformer l'azote atmosphérique en ammoniac. L'ammoniac est rapidement transformé en nitrates par les bactéries du sol.

Les bactéries des nodules de légumineuses (Rhizobium**)** peuvent fixer l'azote grâce à une enzyme qui ne fonctionne qu'en absence d'oxygène, la **nitrogénase**.

La **fixation de l'azote** correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux.



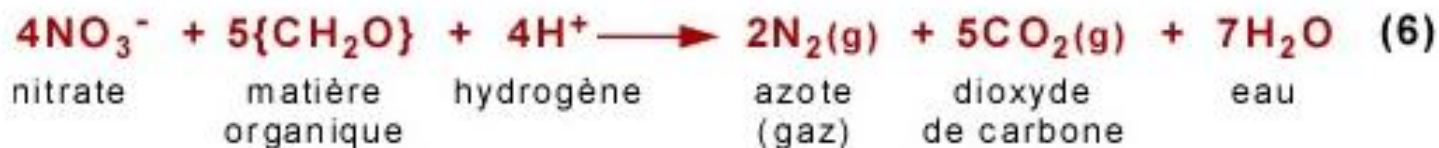
Dans les sols où le pH est élevé



La **nitrification** transforme les produits de la fixation et NOx



La **dénitrification** retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N₂



Fixation symbiotique de l'azote

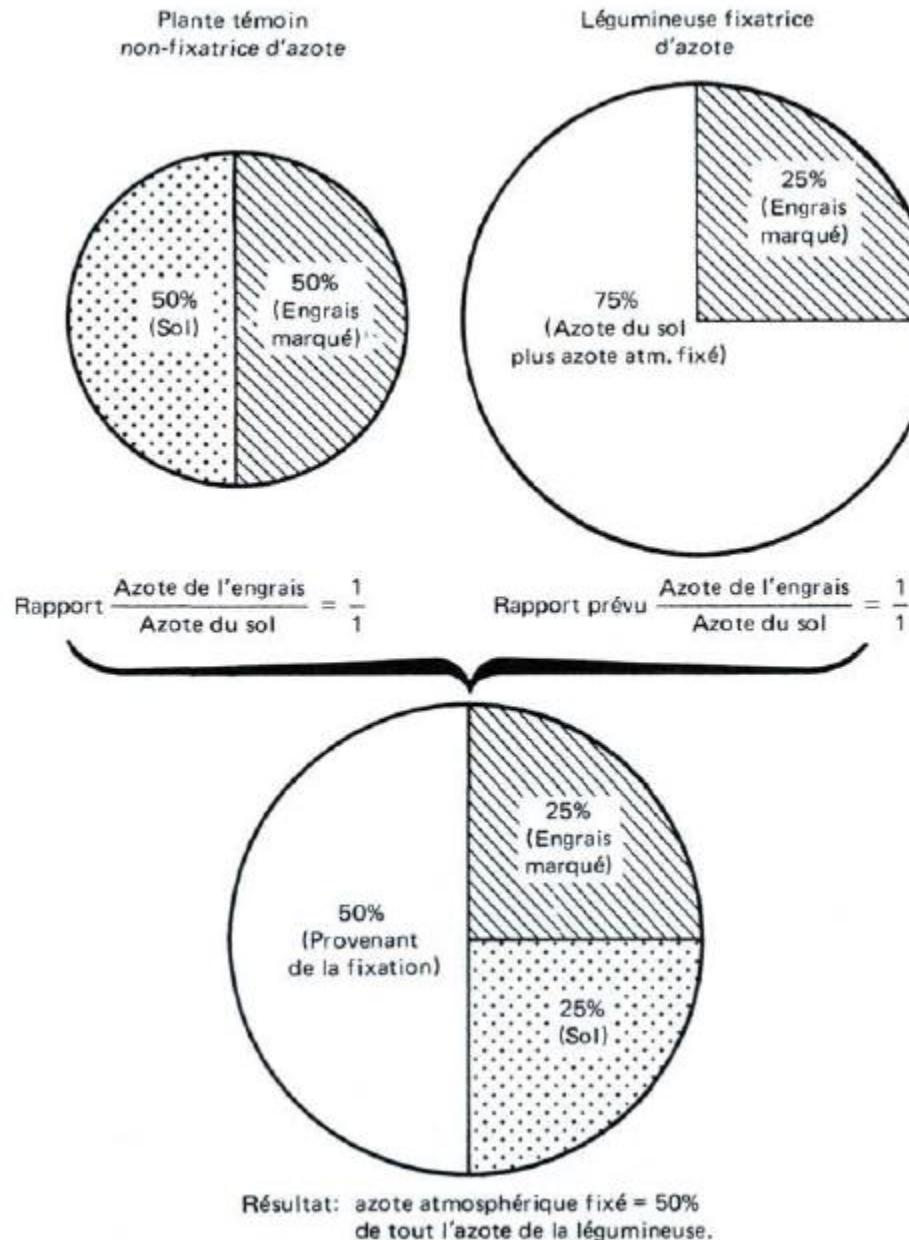


Figure 1. Exemple schématique de la façon dont on utilise l'isotope ^{15}N pour mesurer la fixation d'azote par la symbiose légumineuse-*Rhizobium*.

Les symbioses légumineuses - *Rhizobia*

Une symbiose plante / bactérie qui permet la fixation de l'azote de l'air grâce aux bactéries présentes dans les nodosités !



Un chiffre

Au niveau mondial, on estime à 100 millions de tonnes par an la masse d'azote atmosphérique fixée par les légumineuses, ce qui est comparable à la production d'azote par l'industrie chimique.

Formation des nodosités

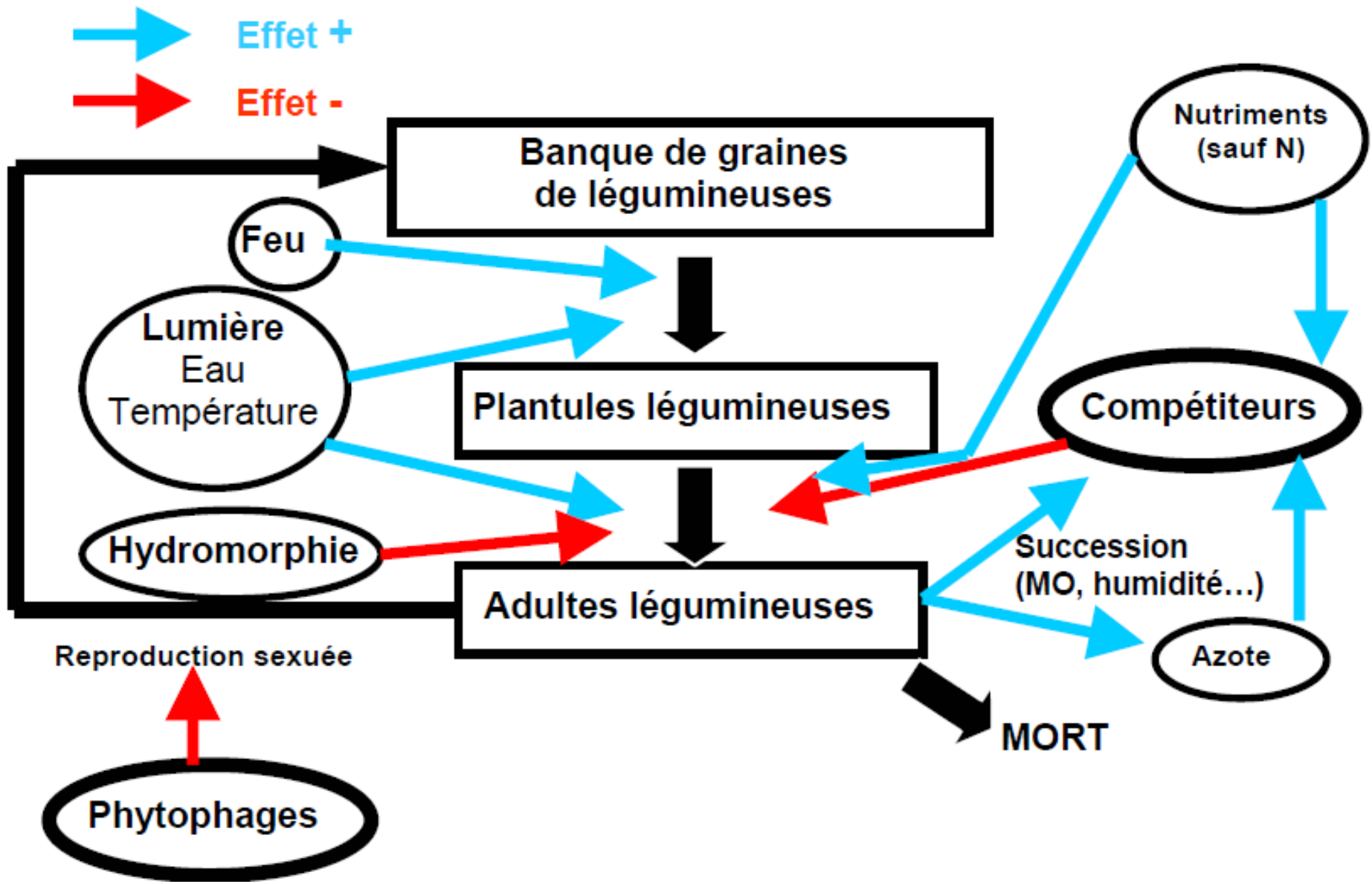
Les flavonoïdes produits par les plantes attirent et activent les bactéries fixatrices d'azote autour des racines. Les bactéries s'agglutinent sur les poils absorbants et forment un cordon infectieux qui va pénétrer dans la racine. Arrivées au niveau des vaisseaux conducteurs les bactéries provoquent le développement d'une tumeur qui formera la nodosité

La bactérie : *Rhizobium trifoli*



- **Les symbioses actinorhiziennes:** Les plantes dites actinorhiziennes établissent de la même manière une symbiose fixatrice d'azote avec des bactéries filamenteuses appartenant à un genre particulier d'actinomycètes, le genre *Frankia*
- **Les symbioses avec cyanobactéries:** Les *Azolla* sont de petites fougères aquatiques qui colonisent la surface des rizières en Asie ; grâce à leur association étroite et spécifique avec une cyanobactérie *Anabaena*, elles parviennent à fixer jusqu'à 200 kg d'azote par hectare et par an, et sont utilisées pour la fertilisation des rizières

Modèle conceptuel de prédiction du succès des légumineuses sur une parcelle (Taylor 1974 in Clements et al. 2001).



FACTEURS RELIÉS AU POTENTIEL DE MINÉRALISATION D'AZOTE

- **La matière organique**

La nature de la matière organique influence le rythme de croissance des microorganismes. Il est connu que les matières organiques facilement minéralisables augmentent et diversifient la microflore du sol, et par conséquent les taux de décomposition de la MO et de celui de la minéralisation d'azote.

- **Humidité et température du sol**

Les taux de minéralisation d'azote dépendent aussi de l'humidité et de la température du sol. L'activité des microorganismes est faible dans les conditions de sol sec.

Ex: les sols sablonneux bien drainés ayant une grande porosité perdent rapidement leur contenu en eau. Par contre, les sols contenant de l'argile ou du limon présentent des pores plus petits et peuvent contenir suffisamment d'eau, même en période de sécheresse. Jusqu'à une certaine limite, les activités biologiques et les taux de minéralisation d'azote augmentent ainsi avec les augmentations de température et d'humidité dans les sols.

- **Texture du sol et porosité**
- La texture d'un sol détermine souvent les dimensions des pores et les quantités d'air et d'eau qui y circulent. On distingue les macropores avec de plus larges diamètres ($> 75 \mu\text{m}$), les mésopores de dimensions intermédiaires ($30\text{-}75 \mu\text{m}$), et enfin les micropores ($5\text{-}30 \mu\text{m}$) ayant les plus petits diamètres.

- **Structure et compaction**
- La structure du sol est définie comme étant un assemblage de particules primaires en agrégats de diverses dimensions. Les gros agrégats ont des dimensions variant de 0,25 mm à 5 mm de diamètre, tandis que les micro-agrégats ont un diamètre inférieur à 0,25 mm. Généralement, un sol bien structuré doit présenter dans sa couche arable une proportion de macro-agrégats supérieure à 70 %, ce qui assure une meilleure porosité entre les agrégats pour une meilleure circulation d'air et d'eau. De même, les macropores et mésopores formés entre ces agrégats constituent des niches pour la flore du sol.

- **Les modes de travail du sol**
- Le travail du sol joue aussi un rôle important sur les taux de minéralisation d'azote. Il augmente temporairement la répartition et le volume des macropores, assurant ainsi un meilleur régime d'air et d'eau dans les sols. Le travail du sol assure aussi une meilleure propagation de la température dans le sol, ceci étant propice aux processus microbiens de minéralisation. Le travail du sol agit aussi sur la taille et la localisation des matières organiques contenues à l'intérieur des agrégats, l'exposant ainsi à la minéralisation
- Au contraire, le travail réduit (par exemple, le semis direct) permet de conserver la matière organique du sol, car celle-ci ainsi que les résidus organiques se minéralisent plus lentement.

- **Les cultures de rotation**
- Les bonnes cultures de rotation enrichissent les sols en matière organique et en azote, et elles améliorent également la structure du sol. Elles augmentent ainsi le nombre et les activités des microorganismes dans les sols, et par conséquent les taux de minéralisation d'azote. L'utilisation de l'azote minéralisable du sol dépend aussi des espèces cultivées.

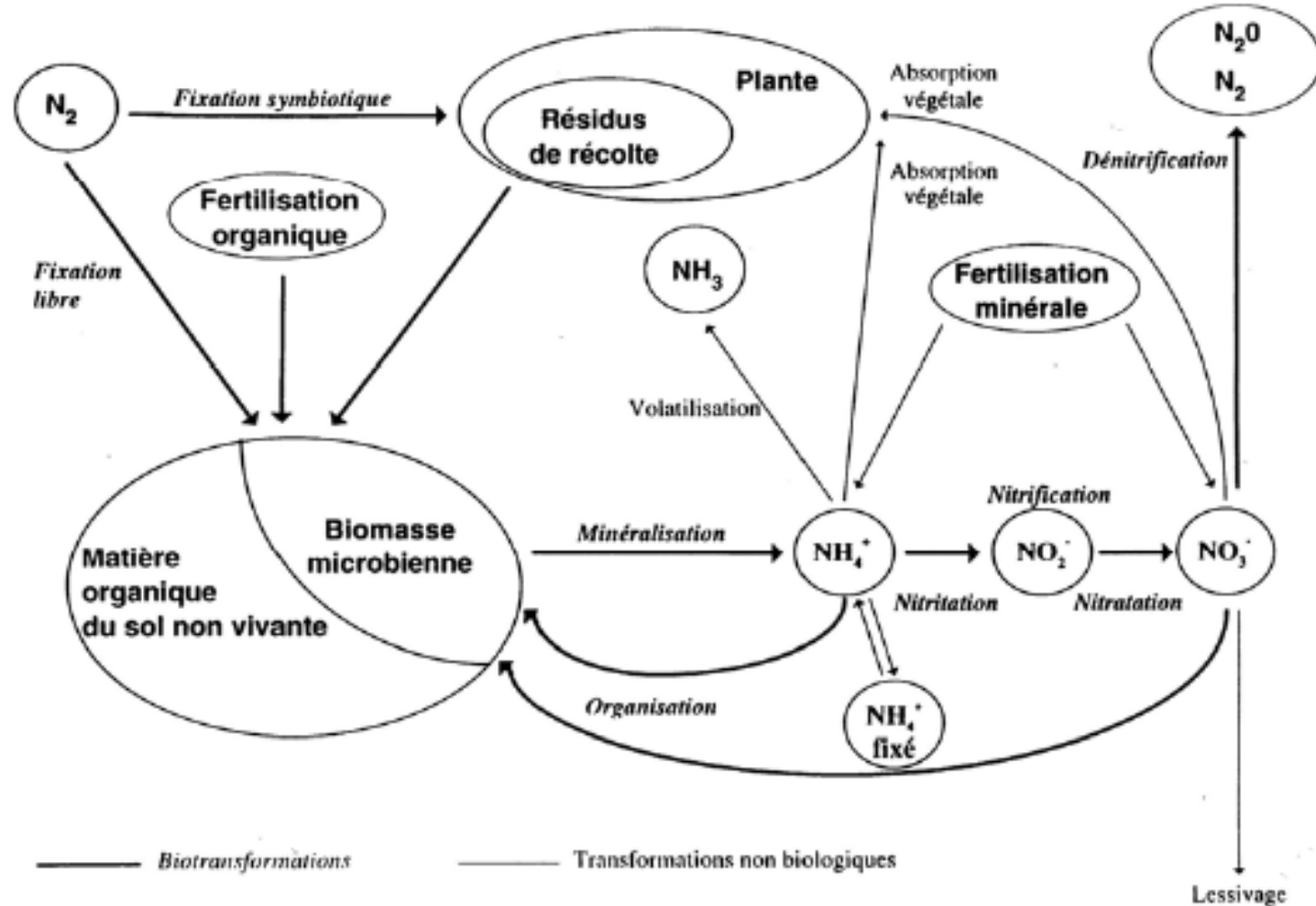
exemple de calcul de l'azote minéralisable de la MOS

- Prenons un sol avec:
 - Un horizon de surface de 20 cm de profondeur
 - Une densité apparente de 1,4 t (tonne)/m³ ou g/cm³
 - Un taux de 4 % de matière organique et 0,15 % de N total
 - Un coefficient de minéralisation qui varie de 0,02 à 0,05
- La masse du sol : $1,4 \text{ t/m}^3 \times 10\,000 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ m} = 2\,800 \text{ t/ha}$
- La quantité de MOS : $2\,800 \text{ t/ha} \times 0,04 = 112 \text{ t de M.O./ha}$
- La quantité de N: $2\,800 \text{ t/ha} \times 0,0015 = 4,2 \text{ t N/ha}$
- La quantité de Nmin : $4\,200 \text{ kg N/ha} \times 0,02 = 84 \text{ kg N/ha}$
- à $4\,200 \text{ kg N/ha} \times 0,05 = 210 \text{ kg N/ha}$

Nutrition azotée des plantes

- La nutrition azotée des plantes ne dépend pas uniquement de la fertilisation minérale.
- L'autre source d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) provient de la dégradation, principalement biologique, des différentes matières organiques (MO) du sol : MO endogène humifiée), résidus de récolte, résidus de cultures intermédiaires, produits organiques exogènes. Il est donc nécessaire de connaître assez précisément la dynamique saisonnière de la minéralisation des MO du sol pour évaluer la fourniture en azote par le sol et ajuster en conséquence la fertilisation azotée.

Minéralisation de l'azote par le sol



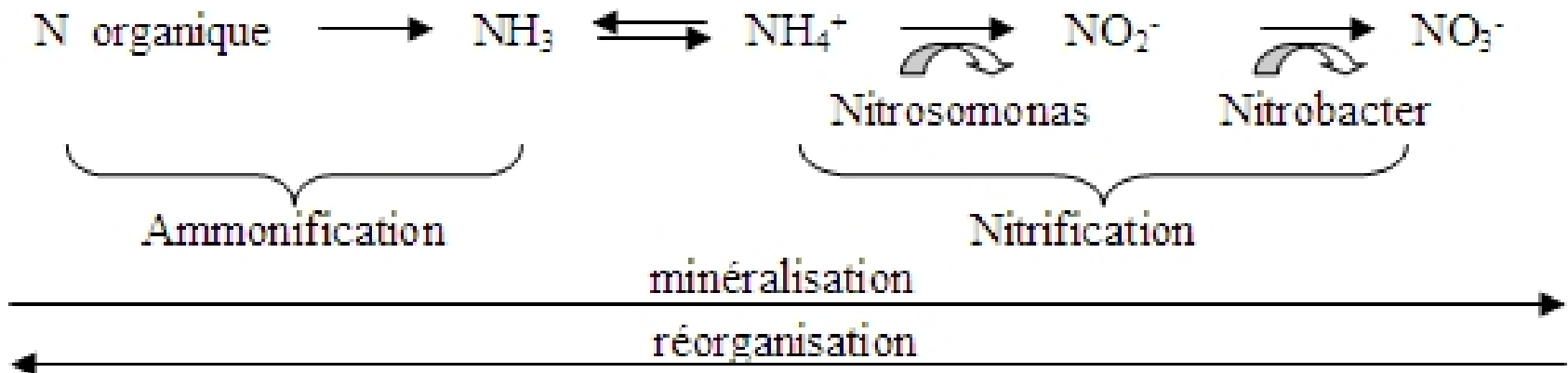
Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans les sol (d'après Nicolardot et al., 1997)

La minéralisation brute de l'azote:

C'est le passage de la forme organique à la forme minérale.

- Cette transformation peut être d'origine: physico-chimique dans des conditions extrêmes (pH très faible et fortes températures).

biologique (par les macro et microorganismes) de la matière organique du sol



La minéralisation nette d'azote

- la différence entre la minéralisation brute et l'organisation
- seul le flux net d'azote est accessible aux plantes.
- La minéralisation nette d'azote correspond donc à la fourniture azotée du sol disponible pour la culture
- La minéralisation nette doit donc être calculée ou estimée à l'aide de différentes méthodes:

La méthode du bilan azoté: calculer la minéralisation de l'azote en condition de champ

$$N_{MIN} = N_{FTN} - N_{INT} + N_{FGX} + N_{LIX} (+N_{DENIT})$$

Les incubations de sol en conditions contrôlées

L'incubation en conditions de champ

Utilisation de l'isotope ^{15}N

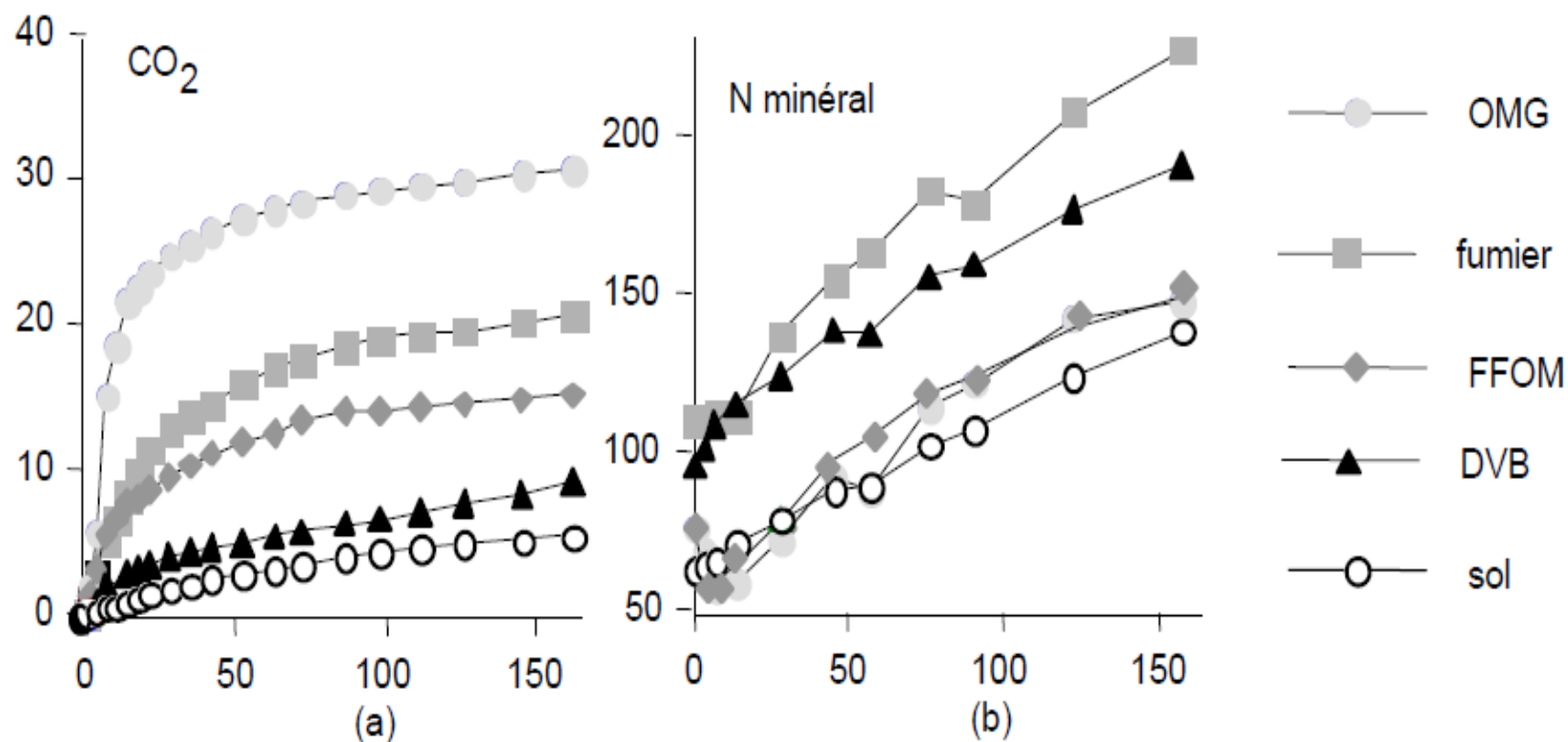


Figure 2. Cinétique de minéralisation du C et de N des composts épandus au champ en 1998
 (OMG : ordures ménagères résiduelles, FFOM : compost de fraction fermentescible des ordures ménagères, DVB : compost de déchets verts + boue d'épuration).
 En abscisse : temps (j) ; en ordonnée : (a) % de C organique total, (b) N minéral (mg/kg de sol).