



Comité Français d'Étude et de Développement
de la Fertilisation Raisonnée

Les animateurs du GT NS

David LEDUC – Chambre d'Agriculture Pays de la Loire

Marc HERVE – AngloAmérican

Laurent VARVOUX – Terrena

Contact :

Laurent VARVOUX

Expert amélioration de la fertilité des sols

7, avenue Jean Joxé - 49002 ANGERS

Tél. +33 2 41 32 44 16 | Mob. +33 6 70 79 18 91

Rejoignez-nous sur 

www.terrena.fr



Mardi 10 décembre 2024 – COMIFER –
30 Rue de Cabanis (75014 – Paris)

Intervention

Konrad Schreiber

Agronome

La Vache Heureuse

kslavacheheureuse@gmail.com

Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

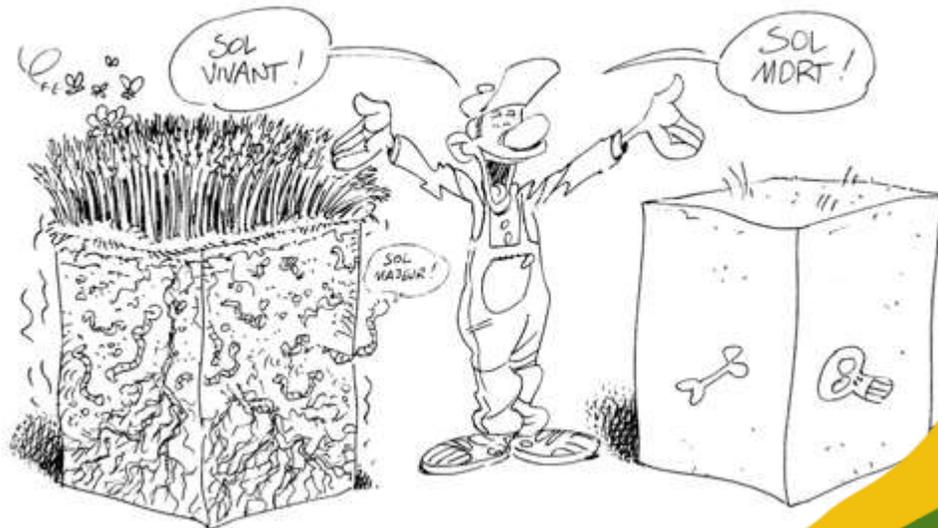
Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024



Konrad Schreiber

kslavacheheureuse@gmail.com



Association pour la Promotion d'une Agriculture Durable
 Création 1998 – Réorganisation 2007 – SCV et ACS

Biodiversité, Agriculture, Sol et Environnement
 Développement de l'ACS – 2000

Agroécologie –

Centre de l'Agroécologie

19
 génération
 on avec le

ants
 e – 2013

Pratiques Agricoles
 Techniques et Carbone - 2008

Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024



Ça pousse tout seul

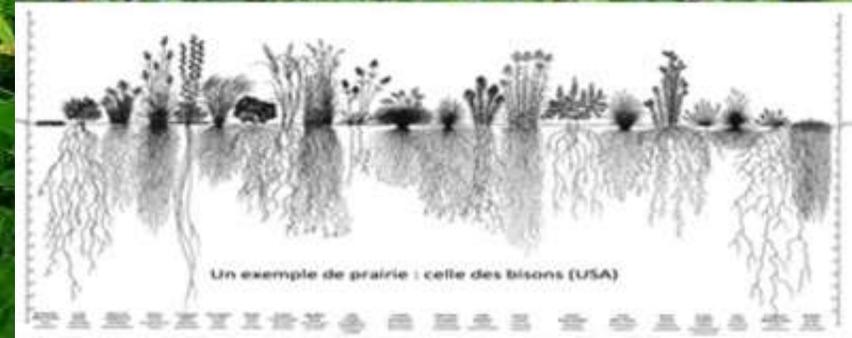
Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024



Ça pousse tout seul

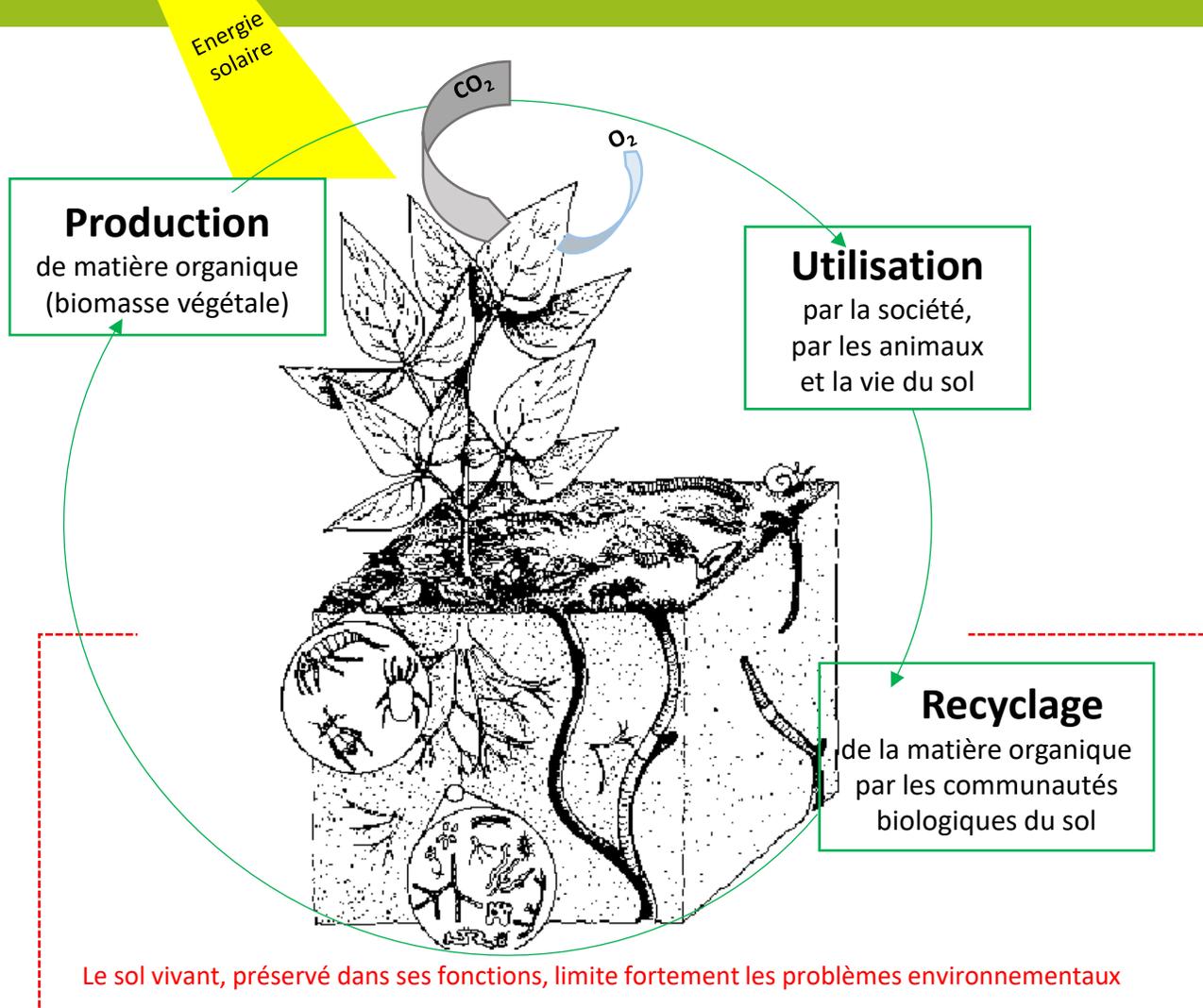


Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024





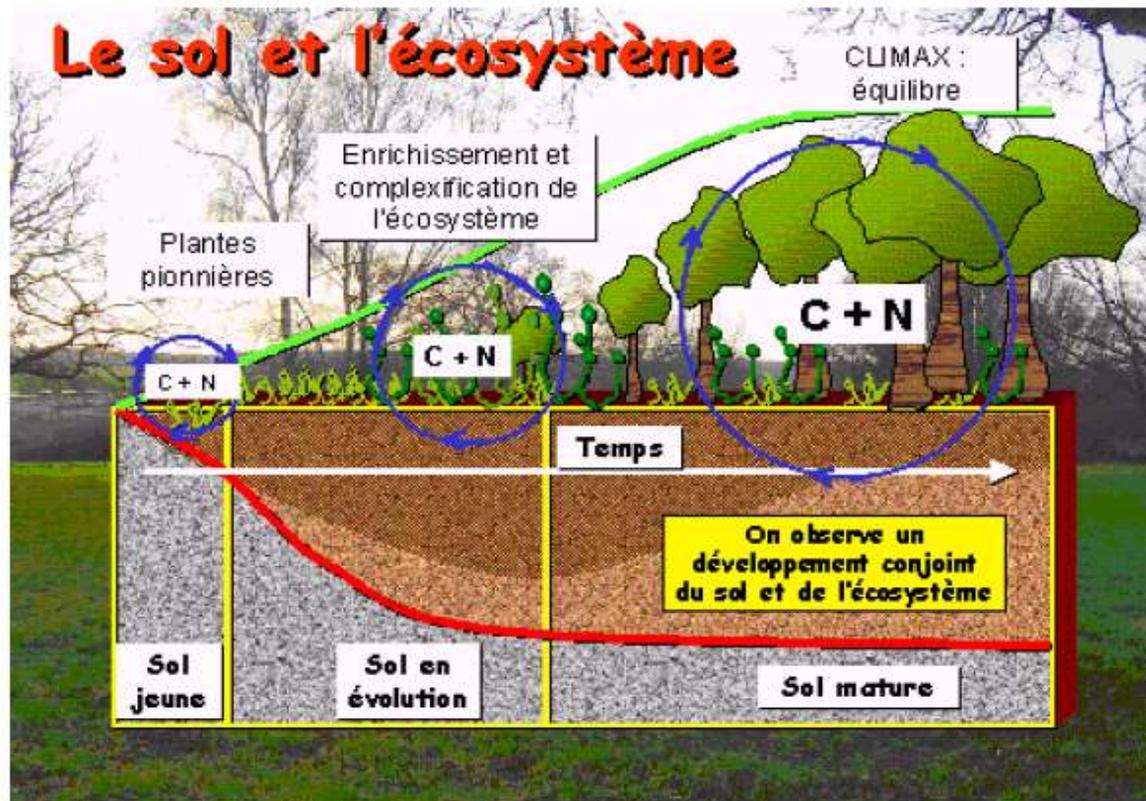
Avec rien, je sais tout faire !

0,04% CO₂ dans l'air génère toute la vie sur Terre.

Parce que je recycle tout, je ne manque de rien !

Produire / Consommer / Recycler
Les 3 fonctions fondamentales de l'écosystème,
base de toute durabilité

Copier le fonctionnement de l'écosystème : principes



Le sol vivant : ça pousse tout seul !

1) Conservation des sols

-- le sol puits de carbone --

- a) couverture permanente
- b) intervention minimum

2) Le rendement carboné

-- gain de performance du carbone --

- a) forte production de biomasse
- b) biodiversité
- c) recyclage maximum

PLANTATION DE TOMATES

Les serres de Marcel 2023



Tomates sur lombricompost
Avec enherbement permanent
Avec 100 t de pailles à l'ha
Production de 3000 uN/ha
Récolte de 600 t de fruits à l'ha



Ça pousse tout seul

Ça pousse tout seul :

Rendement conventionnel en MSV*

"Je mange du carbone et je C... de l'azote !"

LA PLANTE EST LE PRINCIPAL INTRANT !

Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

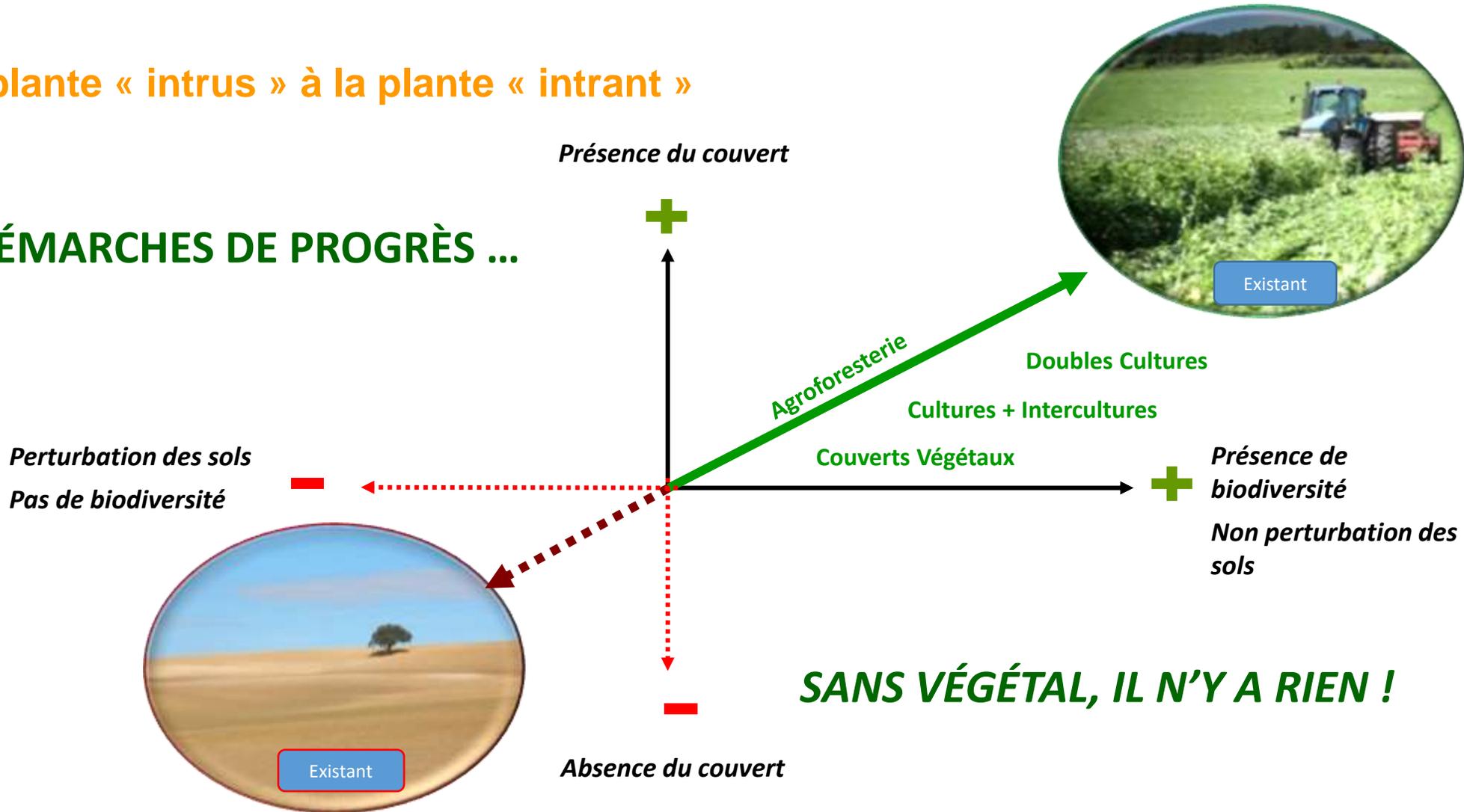
Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024



De la plante « intrus » à la plante « intrant »

LES DÉMARCHES DE PROGRÈS ...



L'Azote (N)



- Élément très abondant dans l'atmosphère ($\approx 78\%$) sous forme de diazote (N_2).
- Dans le **sol** l'azote est essentiellement sous **forme organique** : $\approx 95\%$ du pool d'**azote total** du sol (Söderlund et Svensson, 1976).
- L'azote est un constituant fondamental des végétaux :
 - **constituant de structure** : acides aminées, protéines (membrane plasmique, mitochondrie)
 - **constituant de fonction** : enzymes (Rubisco) et coenzymes, acides nucléiques (ADN et ARN), chlorophylle, métabolites secondaires (glucosinolates, alcaloïdes)
 - **constituant de réserves** protéiques dans les graines
- Représente 3 à 4 % de la matière sèche des plantes.

Les plantes ont trois sources d'azote :

- 1) **l'azote gazeux de l'air** (N_2)
- 2) **l'azote organique** (protéine, peptide et acide aminé, urée)
- 3) **l'azote minéral du sol** (NH_4^+ et NO_3^-)

Dans le sol NO_3^- et NH_4^+ sont les deux principales formes d'azote inorganique disponibles pour la plante mais elle peut aussi **absorber** et **assimiler** de **l'azote organique** comme l'**urée** et des **acides aminés** (Raven et *al.*, 1992).

En règle générale (Maathuis, 2009) :

- Dans les **sols acides, pauvres en oxygène** (réducteurs), **détrempés** et sous **climats froids** où la **nitrification** est **inhibée**, les plantes ont tendance à absorber de **l'ammonium** et/ou des **acides aminés**.
- les plantes adaptées aux **sols à pH plus élevés** et **riches en oxygène** absorbent préférentiellement du **nitrate**.

I) Absorption et devenir du nitrate dans la plante

I.1) Absorption du nitrate par les racines des plantes

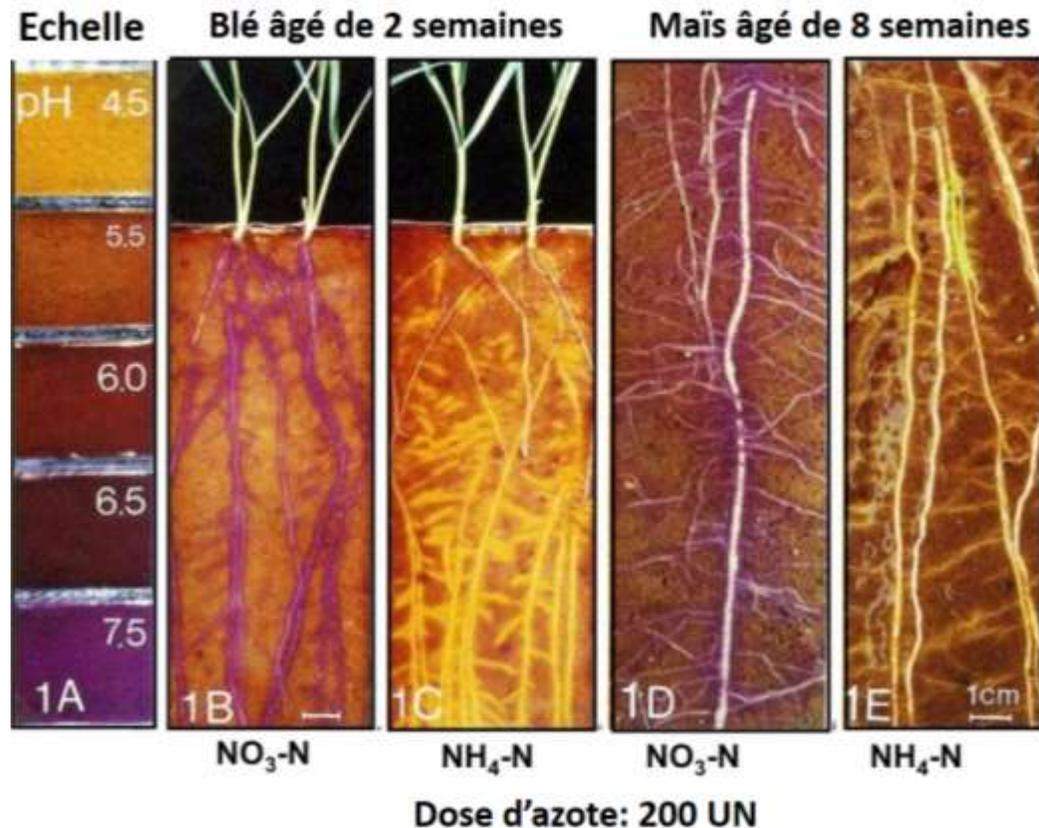


Figure 1 : effet de la nutrition azotée (nitrate ou ammonium) sur les modifications du pH de la rhizosphère du Blé et du Maïs (Marschner et al., 1986).

Supply of NO_3^-

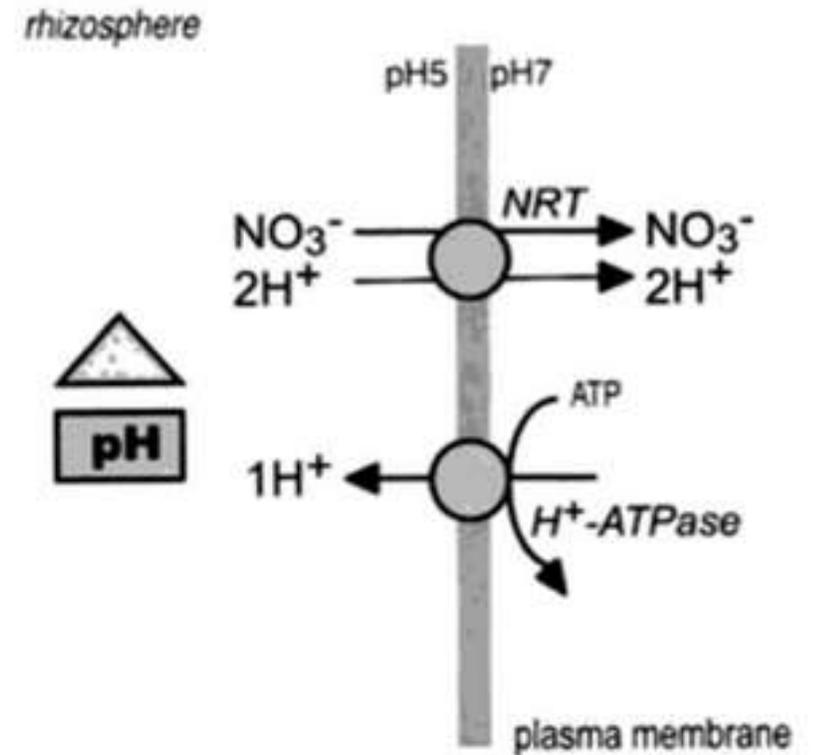


Figure 2 : réponse physiologique des racines des plantes à l'apport de nitrate comme principale source d'azote : alcalinisation de la rhizosphère (d'après von Wirén et al., 2001).

I.2) Utilisation pratique des nitrates (NO_3^-)

En sol Acide, beaucoup de proton H^+ > bonne absorption du NO_3^- .

En sol Alcalin, peu de proton H^+ > mauvaise absorption du NO_3^- .

Supply of NO_3^-

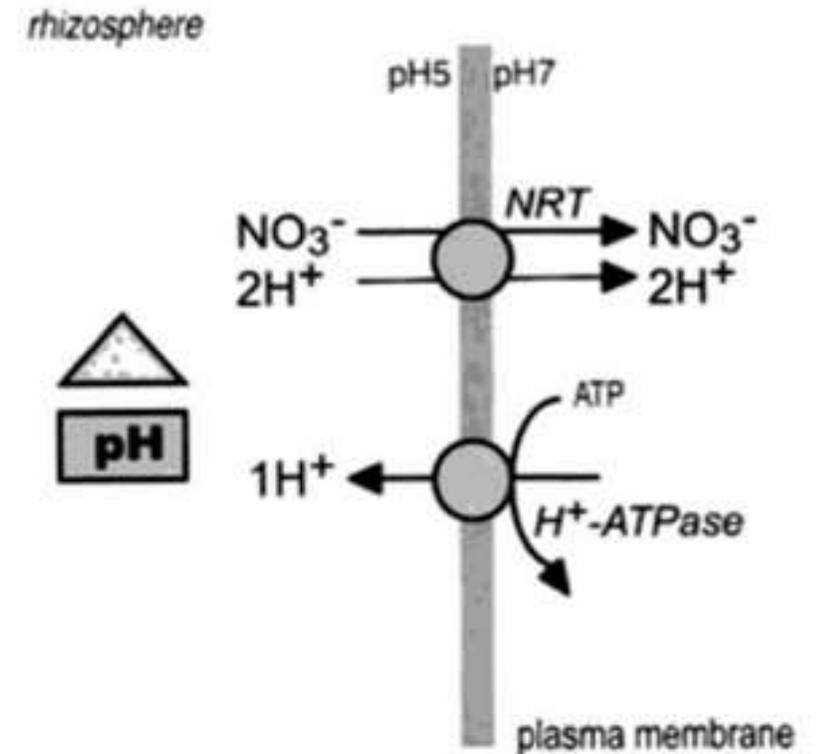


Figure 2 : réponse physiologique des racines des plantes à l'apport de nitrate comme principale source d'azote : alcalinisation de la rhizosphère (d'après von Wirén et al., 2001).

I.3) Devenir du nitrate dans la plante

Après son absorption le nitrate à **4 voies possibles** (figure 4) (Crawford et Glass, 1998) :

- **(1)** sa **réduction** et son **assimilation** sous forme d'acides aminés dans les racines ou les feuilles (principalement dans les feuilles).
- **(2)** son **efflux** (sortie) du cytosol.
 - maintient de l'homéostasie cellulaire si $[\text{NO}_3^-]_{\text{int}}$ importante (Wang et *al.*, 2012)
 - transport passif ne nécessitant pas d'énergie (Morgan et *al.*, 1973)
- **(3)** son **influx** (entrée) et **stockage** dans la **vacuole**
 - vacuole principal compartiment de stockage du nitrate chez les plantes (Granstedt et Huffraker, 1982).
 - Le nitrate stocké dans les vacuoles des feuille âgées peut être remobilisés pour les jeunes feuilles au cours de la croissance végétative de la plante et pour les graines au cours de la phase de reproduction (Fan et *al.*, 2009).
- **(4)** le nitrate peut être **transférés** (translocation) jusqu'aux **parties aériennes** par les vaisseaux du **xylème** (sève brute).
 - **K^+ accompagne NO_3^- pour maintenir l'électroneutralité lors du transport du nitrate dans la plante** (Rufy et *al.*, 1981).

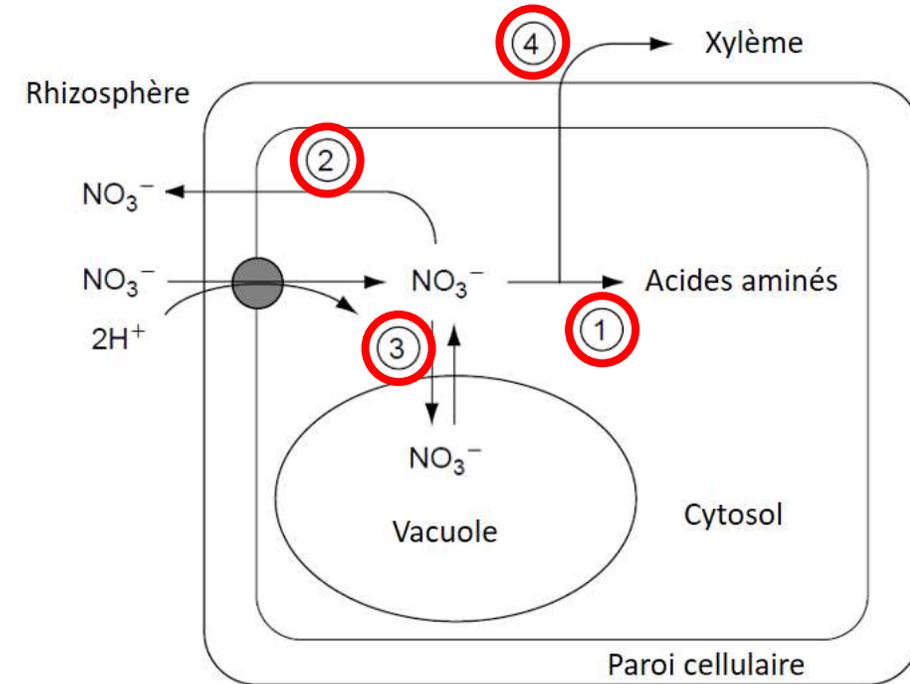
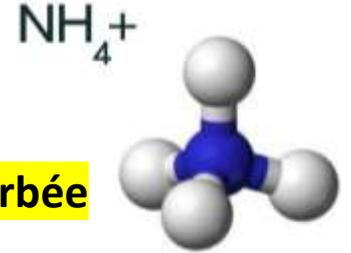


Figure 4 : absorption et devenir du nitrate dans une cellule végétale (Crawford et Glass, 1998).

II) Absorption et devenir de l'ammonium dans la plante

Dans le cas d'une nutrition mixte (NO_3^- et NH_4^+), le NH_4^+ est souvent la forme **préférentielle** d'azote **absorbée** par la plante (Gazzarrini et *al.*, 1999).



- **Coût énergétique important** pour réduire le NO_3^- en NH_4^+ avant son assimilation en acides aminés (Bloom et *al.*, 1992).

Cependant, en condition normale il y a **utilisation simultanée d' NH_4^+ et de NO_3^-** pour maintenir **l'homéostasie** du pH des cellules (Smith et Raven, 1979).

II.2) Devenir de l'ammonium dans la plante

Dans les racines (figure 6) :

Une fois absorbé par les racines, NH_4^+ peut (Howitt et Udvardi, 2000) :

- (1) être assimilé dans le cytoplasme par la glutamine synthétase (GS),
- (2) être assimilé dans les plastes par la glutamine synthétase 2 (GS 2)
- (3) être stocké temporairement dans la vacuole
- (4) sortir des cellules végétales (efflux)

Dans les feuilles (figure 6) :

NH_4^+ peut être aussi transporté vers les parties aériennes via le xylème (translocation) où il peut :

- (5) être stocké dans les vacuoles
- (6) être assimilé dans les chloroplastes
- (7) sortir des cellules (efflux)

Contrairement au NO_3^- , NH_4^+ est principalement assimilé dans les racines (Mérigout, 2006).

Cas des légumineuses :

Rhizobium transforme l'azote atmosphérique N_2 en NH_4^+ grâce à la **nitrogénase**. NH_4^+ est transféré dans le cytoplasme des cellules racinaires où il est assimilé par le GS dans les racines (Ireland et Lea, 1999).

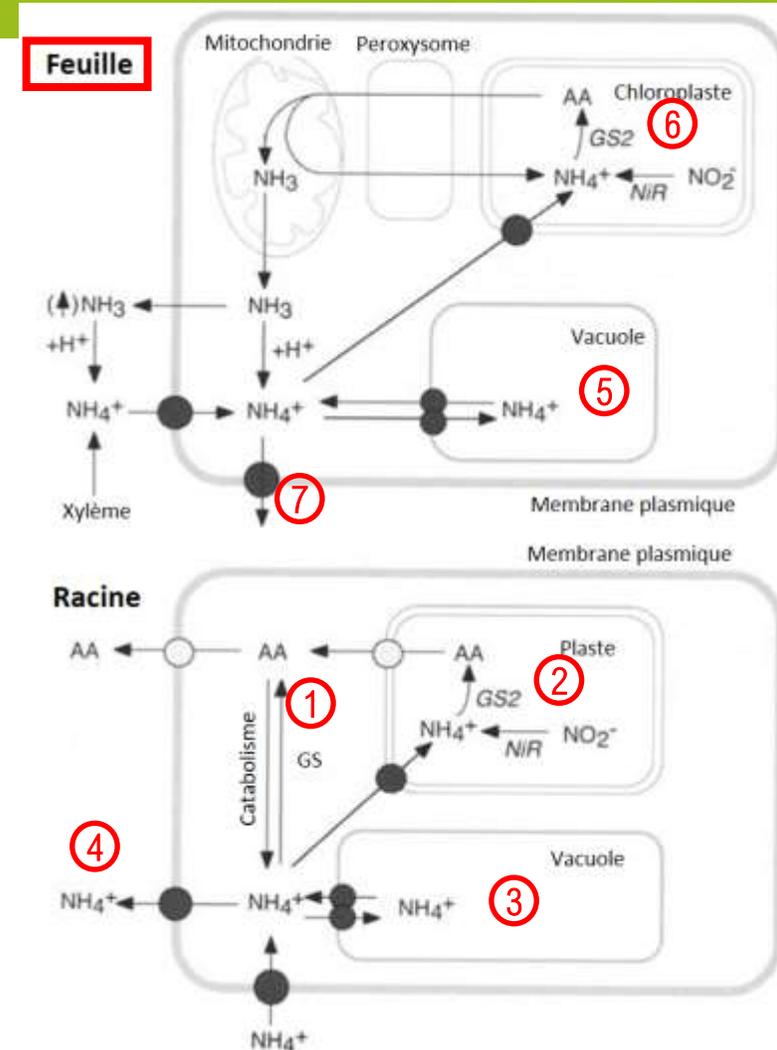


Figure 6 : devenir de l'ammonium après son absorption par les racines (d'après von Wirén et al., 2001).

II.3) Utilisation pratique de l'ammonium (NH_4^+)

En sol Acide et Alcalin pas de problématique d'absorption de NH_4^+ .

NH_4^+ favorable au RedOx en sol Acide et Alcalin (niveau d'oxydation faible > forme réduite).

Supply of NH_4^+

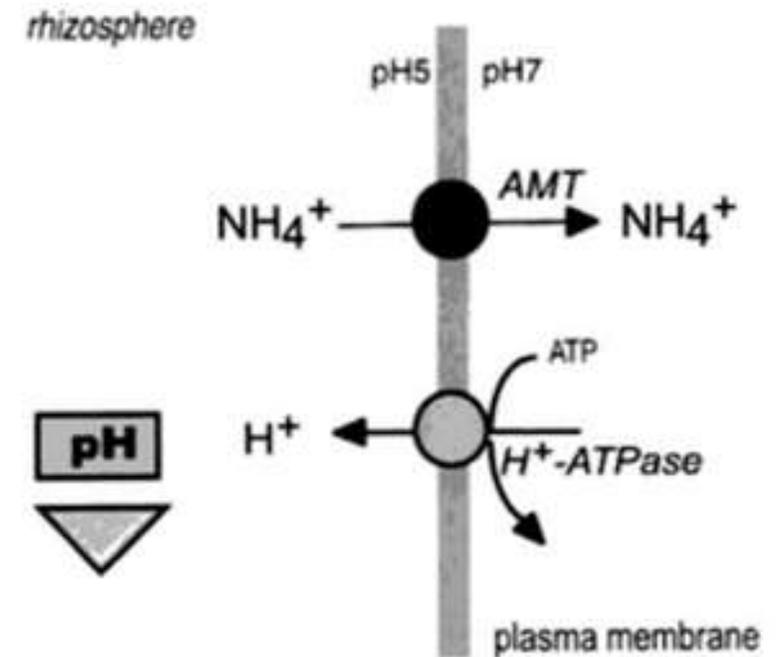


Figure 5 : réponse physiologique des racines des plantes à l'apport d'ammonium comme principale source d'azote : acidification de la rhizosphère (d'après von Wirén et al., 2001).

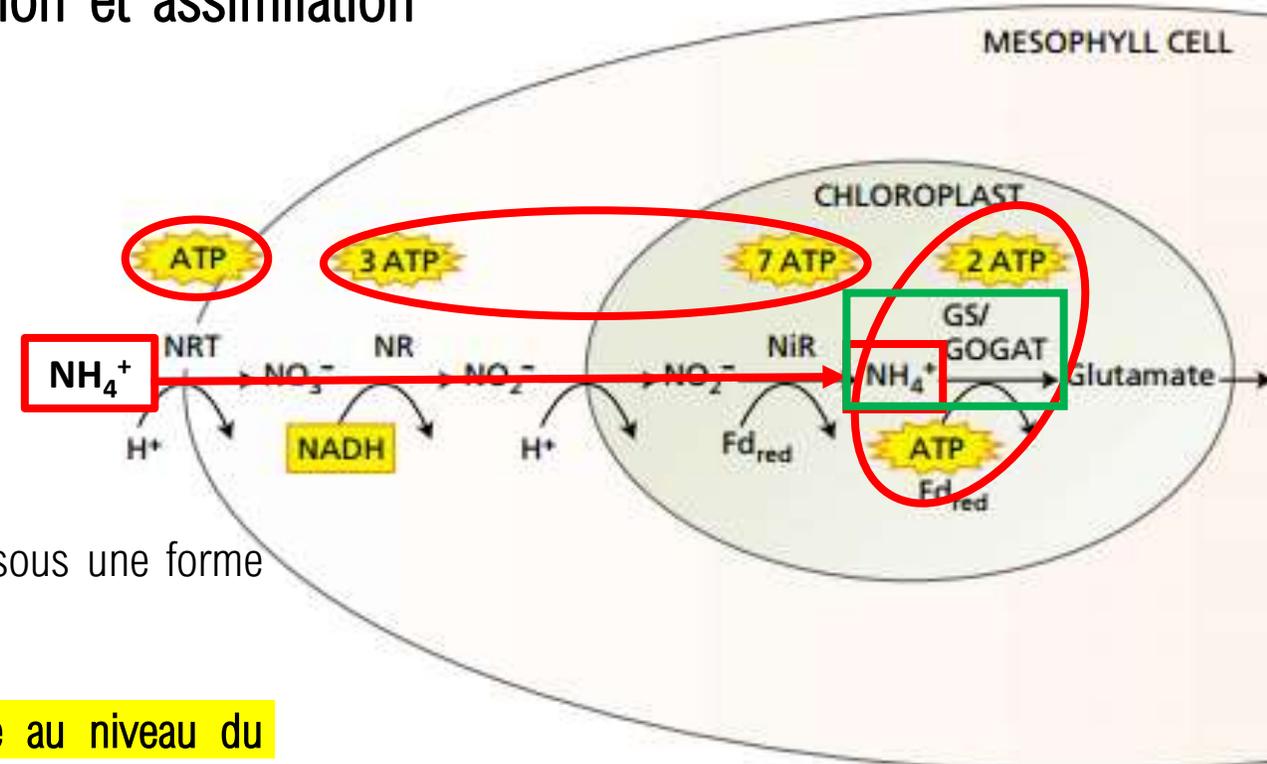
III) Comparaison du coût énergétique entre absorption et assimilation du nitrate ou de l'ammonium par les plantes

NO₃⁻ :

- Absorption > 1 ATP
- Réduction > 10 ATP
- Assimilation > 3 ATP
- >>> **14 ATP**

NH₄⁺ :

- Absorption > 1 ATP
- Réduction > 0 ATP
- Assimilation > 3 ATP
- >>> **4 ATP**



NH₄⁺ : plus simple à assimiler que NO₃⁻ parce que NH₄⁺ est déjà sous une forme réduite de N directement assimilable.

- **L'absorption de NH₄⁺ permet donc une économie d'énergie au niveau du métabolisme azoté.**

Figure 7 : coût énergétique de l'absorption et assimilation du nitrate.

Globalement à l'échelle de la plante :

l'absorption du NO₃⁻ et sa réduction en NH₄⁺ consomme environ 15 % de l'énergie totale de la plante, contre 2 à 5 % pour l'absorption de NH₄⁺ (Carbonneau et Torregrosa, 2020).

Absorption du nitrate et consommation d'eau

Equation globale de la réduction du NO_3^- en NH_4^+ :



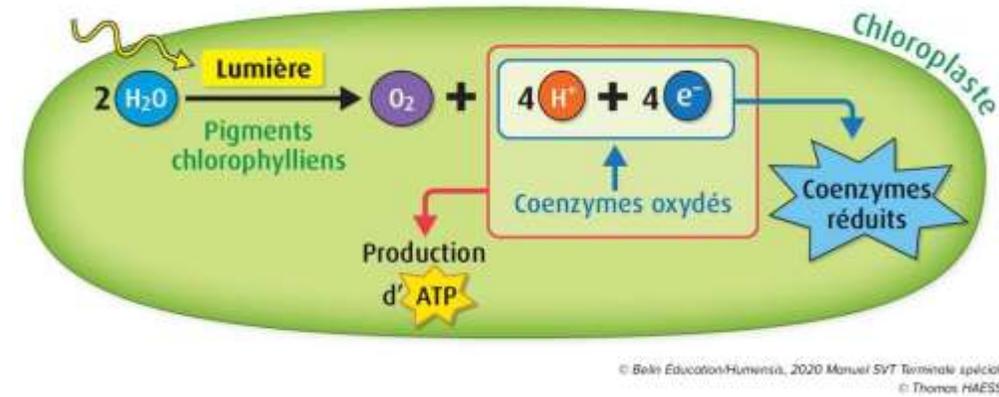
- Réduction du NO_3^- en NH_4^+ nécessite 10H^+ et 8e^- .
- Il faut finalement 5 molécules d' H_2O pour réduire les NO_3^- en NH_4^+ .
- La plante reconstruit 3 molécules d'eau « neuve » : consommation nette de 2 molécules d' H_2O .

H^+ et e^- proviennent de la **photolyse de l'eau** qui se produit lors de la photosynthèse dans les chloroplastes :



H^+ sont utilisés dans cycle de **Calvin** pour former du **glucose** et les e^- pour **recharger** la **chlorophylle** qui a perdu des e^- suite à son excitation par les photons.

- La plante devra donc dissocier plus de molécule d'eau pour ses besoins métaboliques lors de la réduction du NO_3^- .
- **La réduction et l'assimilation du NO_3^- nécessite donc plus d'eau que pour NH_4^+ .**



IV) L'urée, une source d'azote pour les plantes

Les plantes peuvent absorber l'urée par les racines via des transporteurs spécifiques (Mérigout et *al.*, 2008).

Cependant une nutrition uréique stricte conduit à une diminution de la croissance et parfois à l'apparition de symptômes de carence azotée comparativement à des plantes alimentées en NO_3^- et en NH_4^+ (figure 8) (Mérigout et *al.*, 2008).

- Nutrition uréique stricte > ↑ concentration en azote et en acides aminés > indique un statut azoté important > réduction du prélèvement de l'azote et de sa distribution au sein de la plante (Mérigout et *al.*, 2008).

La solution N 39 (50 % Urée, 25 % NH_4^+ et 25 % NO_3^-) est très adaptée pour la nutrition azotée.

L'urée est rapidement hydrolysée (uréases) >>> $[\text{urée}]_{\text{sol}}$ sont faibles (< 70 μM dans des sols agricoles) (Becker-Ritt et *al.*, 2007).

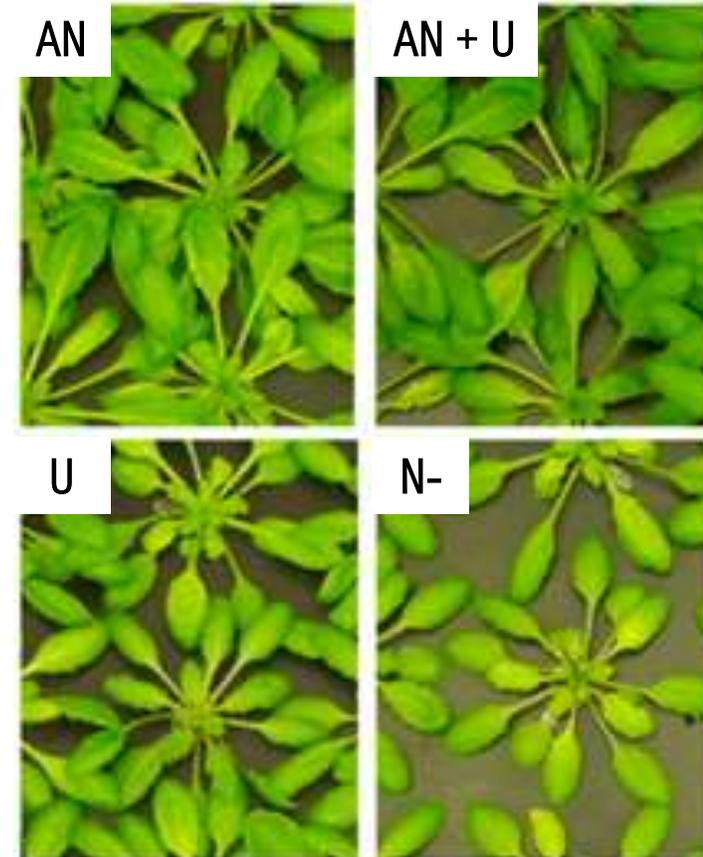


Figure 8 : plantes d'*Arabidopsis* cultivé sur (Mérigout et *al.*, 2008) :

- NH_4NO_3 (AN)
- NH_4NO_3 et $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (AN + U)
- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (U)
- pas de N (N-).

V) Les acides aminés, une source d'azote pour les plantes

Acides aminés constitués (figure 9) :

- groupe carboxyl (-COOH),
- groupe aminé (-NH₂),
- atome d'hydrogène (-H)
- groupement latéral (noté -R).

➤ C'est la nature de ce groupement latéral -R qui différencie les acides aminés entre eux.

Toutes les espèces végétales mycorhizées ou non sont capables d'absorber des acides aminés (Lipson et Näsholm, 2001) et c'est une forme d'azote réduite (non oxydante).

Les composés azotés organiques présents dans la solution du sol sont principalement (Miller et Cramer, 2005) :

- l'urée
- les acides aminés
- les peptides
- les protéines

Des protéases sont excrétées par des microorganismes, des champignons mycorhiziens et les racines des plantes (Paungfoo-Lonhienne et al., 2008) pour accéder à cette source d'azote organique sous forme d'acides aminés.

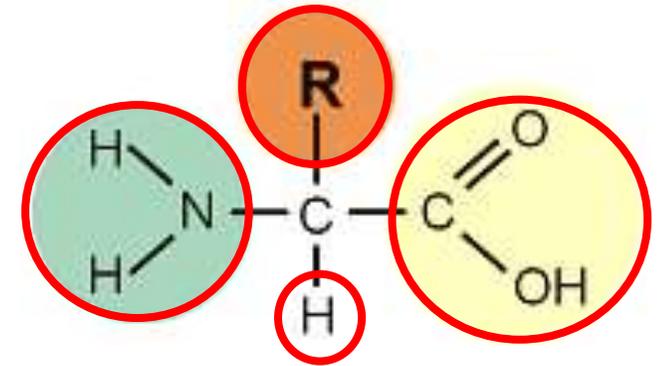


Figure 9 : formule générale des acides aminés.

V.1) Coût métabolique de l'absorption des acides aminés

L'assimilation de l'azote dans les protéines :

- multiples processus biochimiques **consommant de l'énergie** (réduction de NO_3^- et NH_4^+) et **du carbone** (synthèse des acides aminés)
- peut être exprimés en termes d'**utilisation du glucose** ou d'**équivalent glucose** (Zerihun et al., 1998).

Par exemple pour **synthétiser 1 g d'Alanine** lorsque la plante absorbe (figure 11) :

- **NO_3^-** il faut **1,6 g** de glucose
- **NH_4^+** il faut **1 g** de glucose
- **Glutamine (Gln)** il faut **0,25 g** de glucose

- Le **NO_3^-** est la **source d'azote la plus coûteuse** pour la croissance des plantes en équivalent de glucose pour synthétiser une unité d'acide aminé (Zerihun et al., 1998).
- Coût élevé qui résulte principalement des **coûts énergétique** nécessaire à la **réduction du NO_3^-** (en NH_4^+) et à la **régulation du pH** (Zerihun et al., 1998).
- Par rapport à l'azote inorganique, **l'absorption d'acides aminés économise de l'énergie et du Carbone** (Franklin et al., 2017).

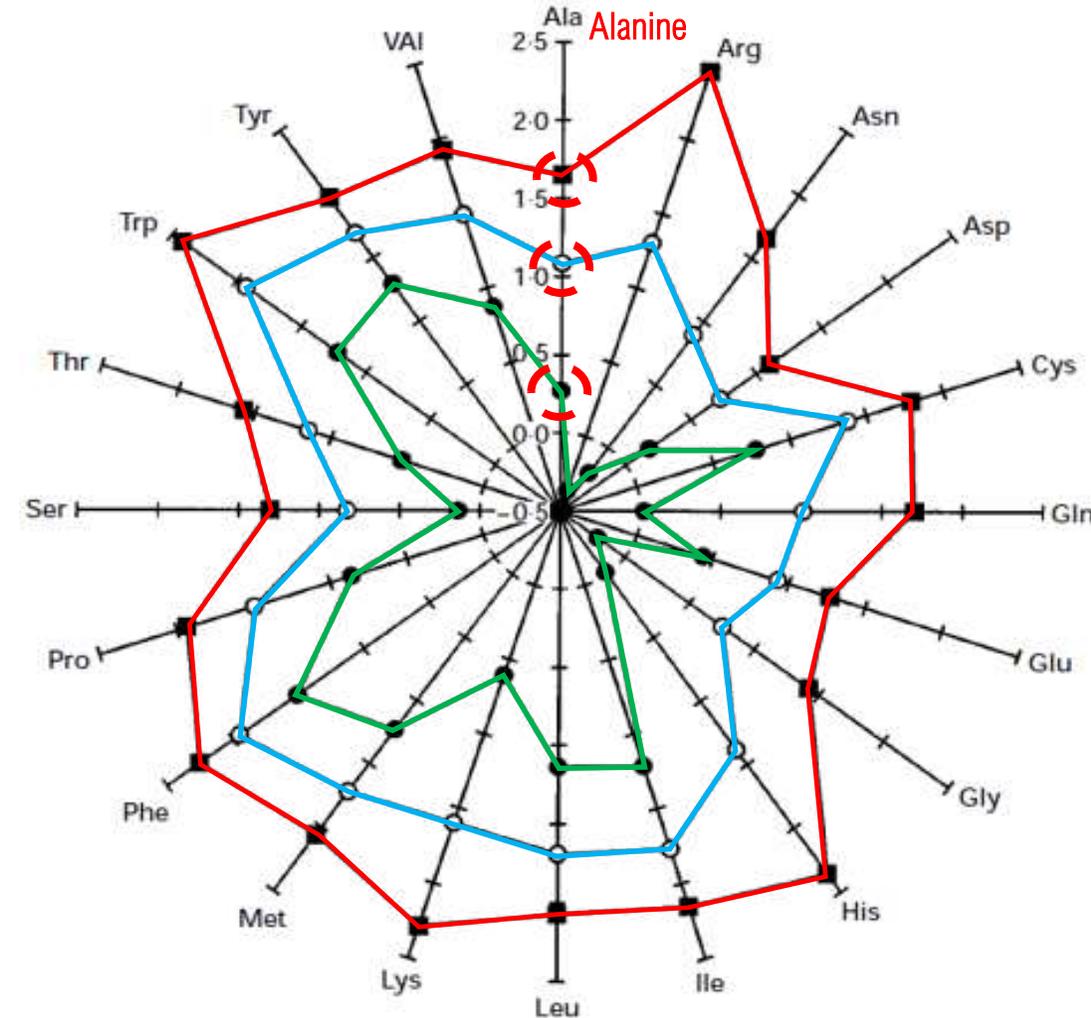


Figure 11 : coûts spécifiques de la synthèse des acides aminés à partir de différentes formes d'azote en équivalent de glucose (g.g^{-1}) (Zerihun et al., 1998). ■, NO_3^- ; ○, NH_4^+ ; ●, Gln.

V.2) Absorption d'acides aminés et croissance des plantes

Importance d'une nutrition mixte

Les plantes alimentées **uniquement** en protéines ont une croissance plus lente (figure 12) (Paungfoo-Lonhienne et *al.*, 2008).

Dans des conditions naturelles le sol contient une combinaison d'azote organique et inorganique et **l'azote inorganique augmente la capacité des plantes à utiliser les protéines comme source d'azote** (Paungfoo-Lonhienne et *al.*, 2008).

Croissance racinaire

La **biomasse racinaire** est **plus élevée** si les plantes poussent avec de **l'azote organique** plutôt qu'avec de l'azote inorganique (Franklin et *al.*, 2017)

- l'**azote organique** absorbé est **utilisé** préférentiellement pour la **croissance des racines** (Cambui et *al.*, 2011).
- plus **grande surface racinaire** nécessaire pour **absorber l'azote organique** qui est moins mobile que NO_3^- (Näsholm et *al.*, 2009).

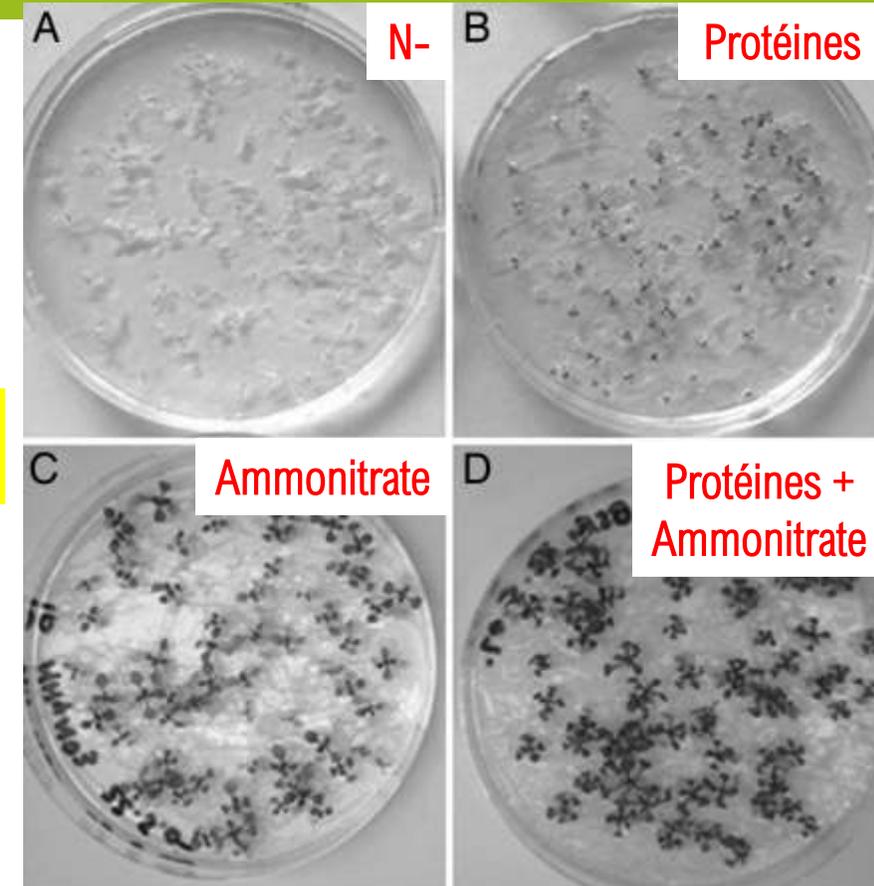


Figure 12 : la combinaison de protéines et d'azote inorganique a favorisé une meilleure croissance d'*Arabidopsis Thaliana* que la protéine ou l'azote inorganique à lui seul (Paungfoo-Lonhienne et *al.*, 2008).

(A) Aucun azote ajouté.

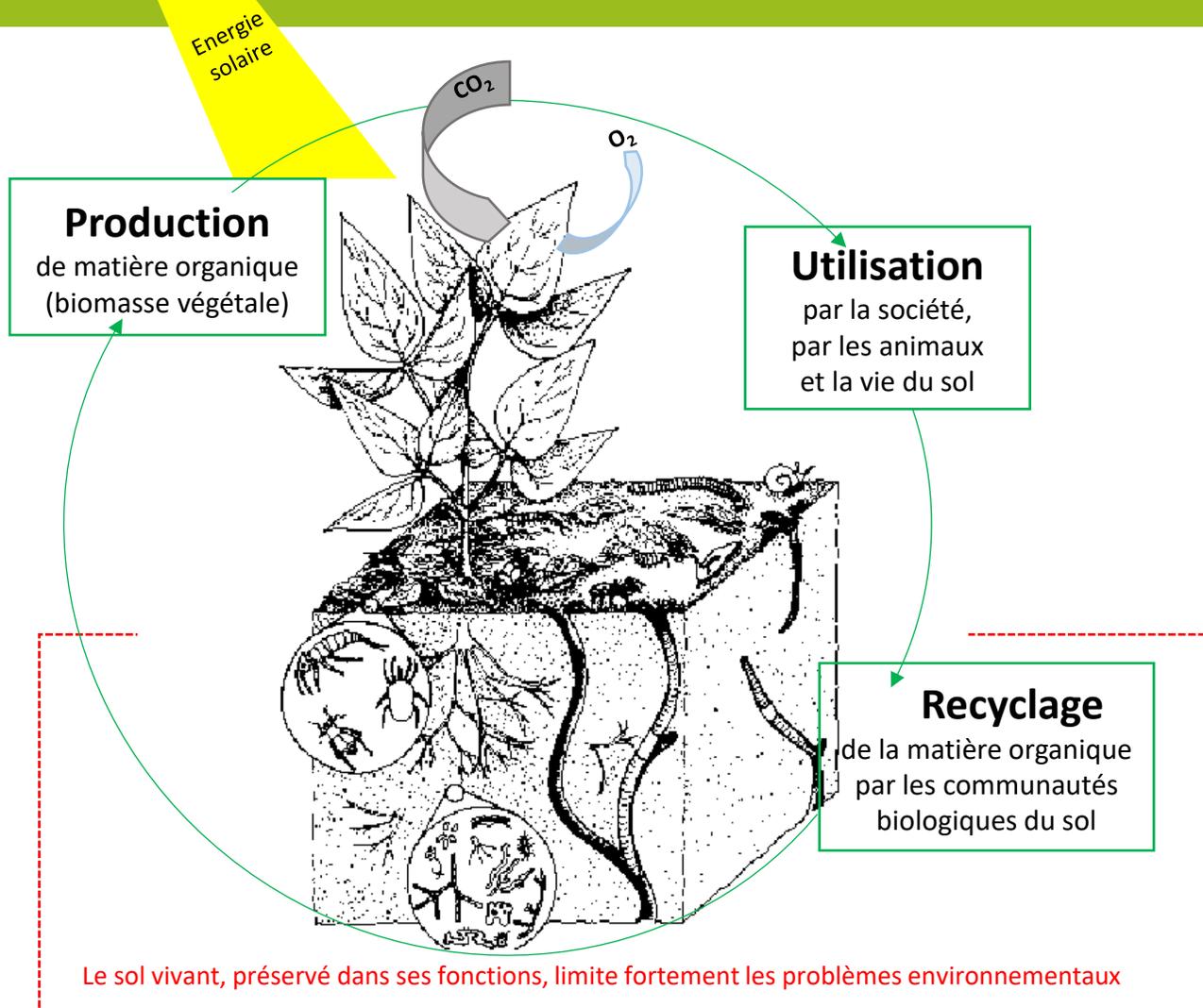
(B) Protéines seulement (6 mg de protéine par ml).

(C) Azote inorganique seulement (0,04 mg NH_4NO_3 par ml).

(D) Protéines et azote inorganique (5,4 mg de protéine par ml et 0,04 mg de NH_4NO_3 par ml).

	Coût énergétique en ATP (absorption, réduction et assimilation)	pH Rhizosphère	Niveau d'oxydation	Consommation eau
NO_3^-	14	↑	+ 5	5 H_2O (3 H_2O restituées)
NH_4^+	4	↓	- 3	1 H_2O (référence)
Urée	4	→	- 3	Idem
Acides aminés	1	Légère ↑	- 3	1 H_2O (à valider)

L'absorption d'acides aminés par les plantes est plus avantageuse énergétiquement par rapport à l'absorption de NO_3^- et de NH_4^+ car la plante n'a pas besoin d'énergie pour assimiler l'azote absorbé et l'incorporer ensuite dans les acides aminés (Teixeira et al., 2018).



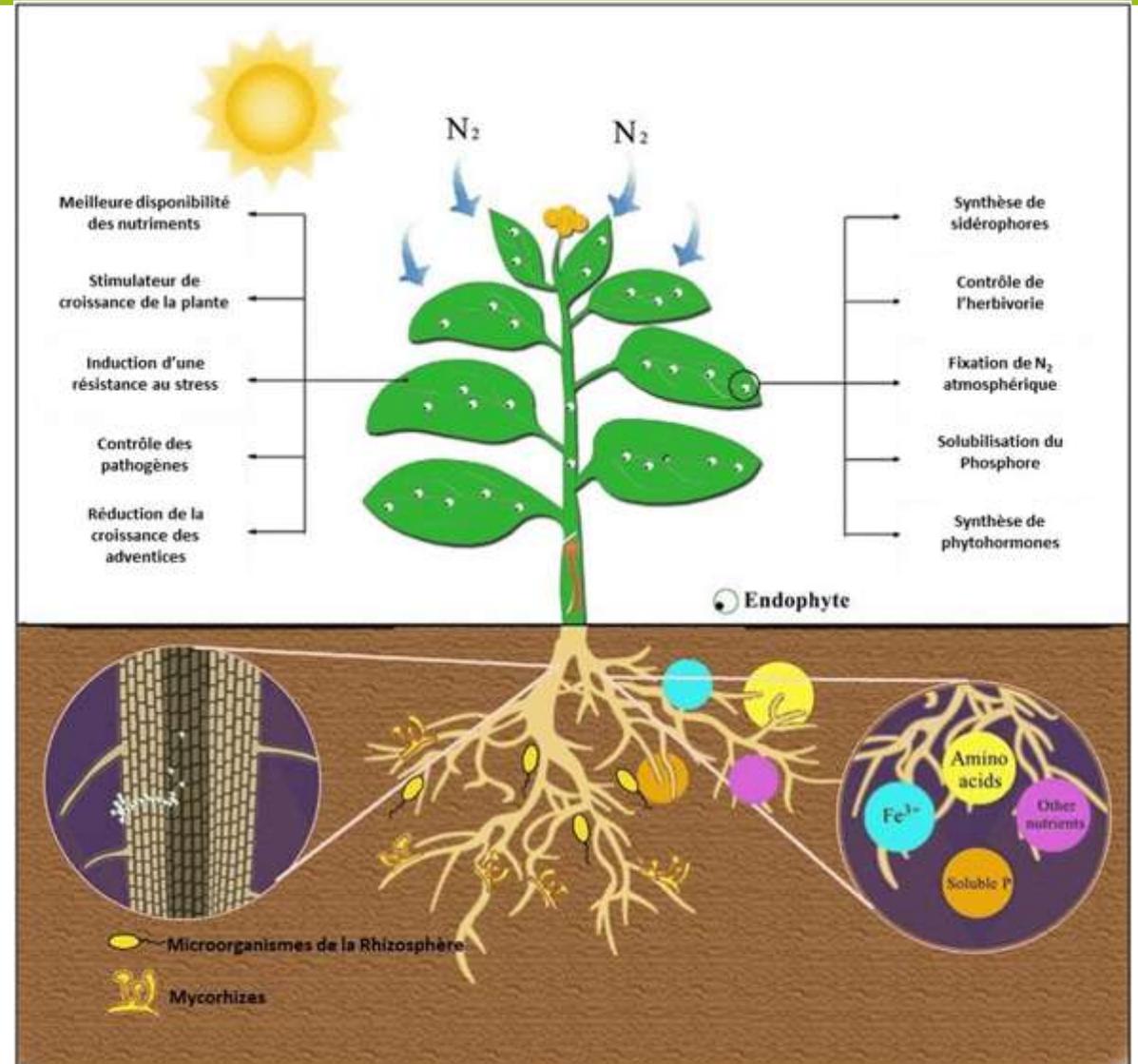
Avec rien, je sais tout faire !

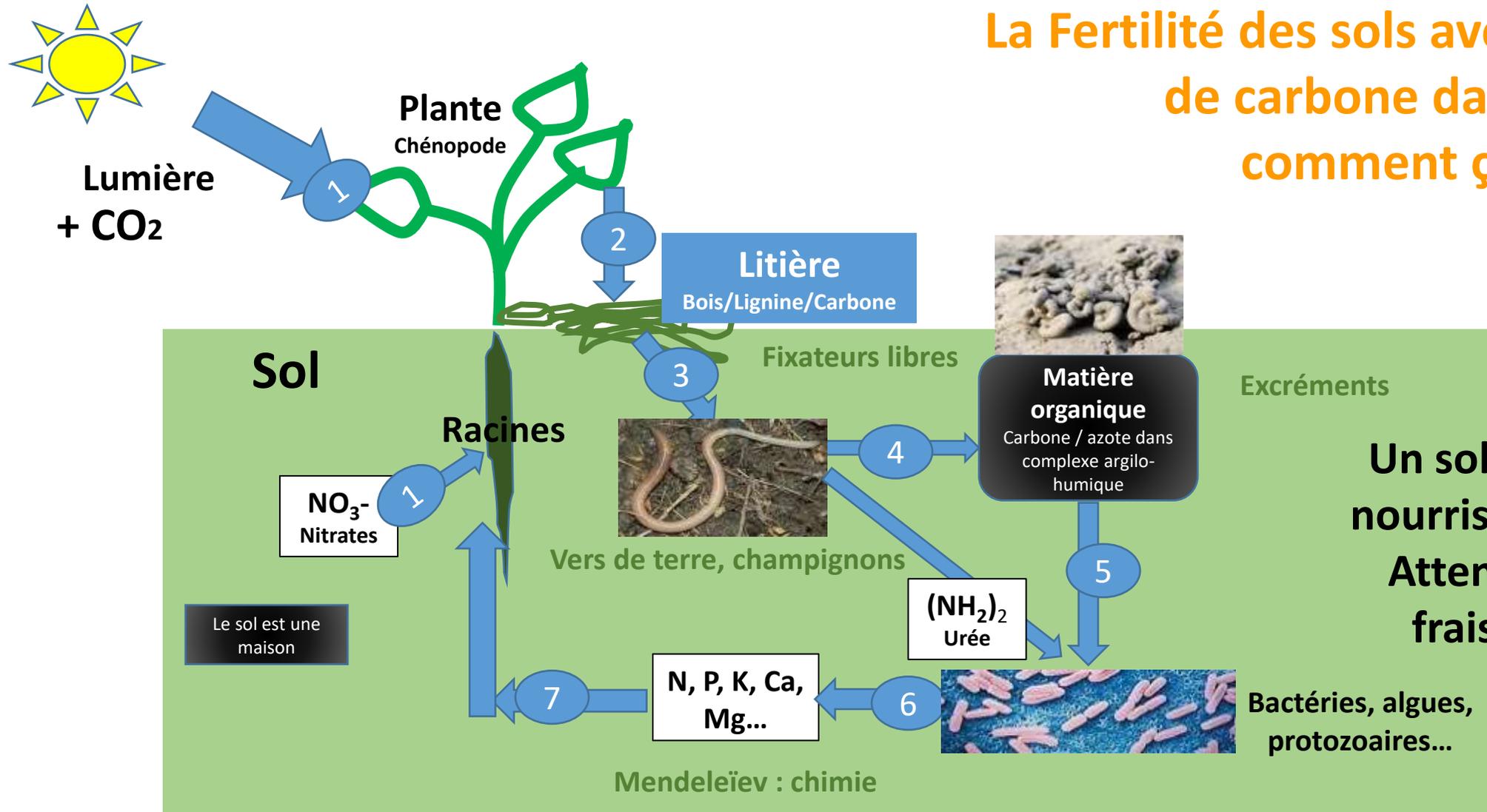
0,04% CO₂ dans l'air génère toute la vie sur Terre.

Parce que je recycle tout, je ne manque de rien !

Produire / Consommer / Recycler
Les 3 fonctions fondamentales de l'écosystème,
base de toute durabilité

Les endophytes sont des bactéries qui vivent autour des racines.
 Les fixatrices libres d'azote se trouvent principalement sur le sol et sous les litières.





La Fertilité des sols avec stockage de carbone dans les sols : comment ça marche ?

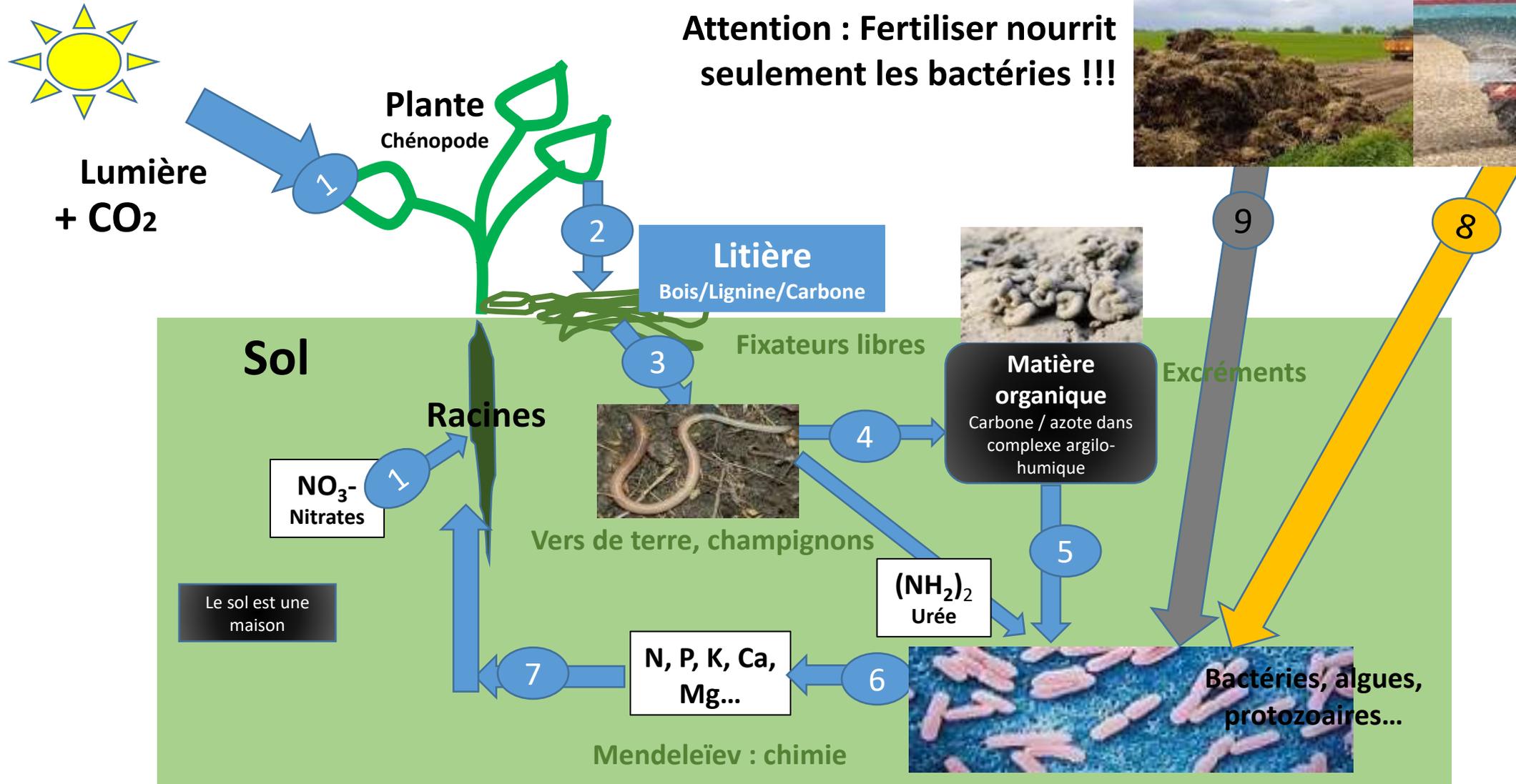
**Un sol fertile : plus je nourris, plus je produis
Attention, produits frais obligatoires**

Bactéries, algues, protozoaires...

Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

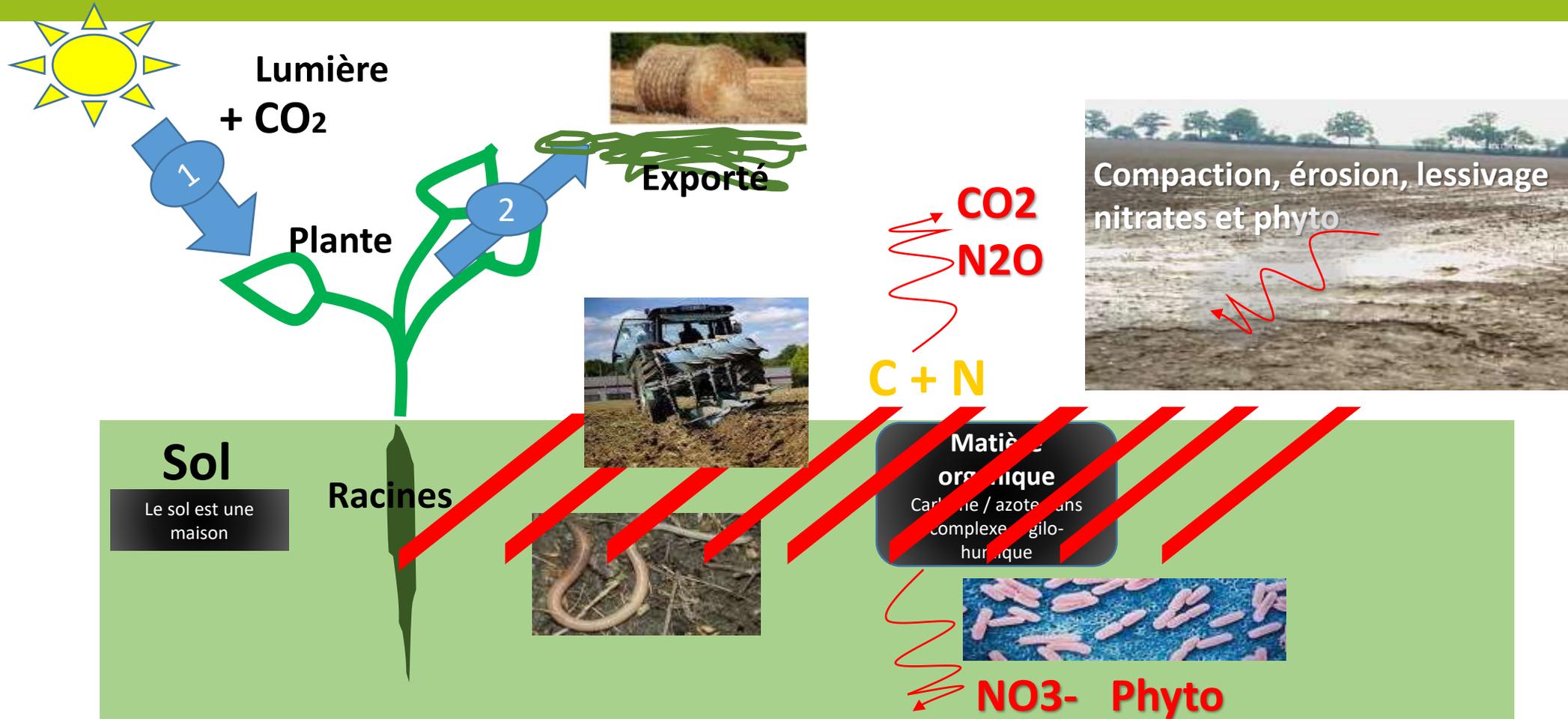
10 décembre 2024
13 Janvier 2023



Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024



**Détruire la maison, affamer et tuer les habitants
Le travail du sol est responsable de toutes les pollutions agricoles**

Les azotobacters

Importance de positionner la MO en surface.

Fixation biologique d'Azote depuis l'air (N_2)

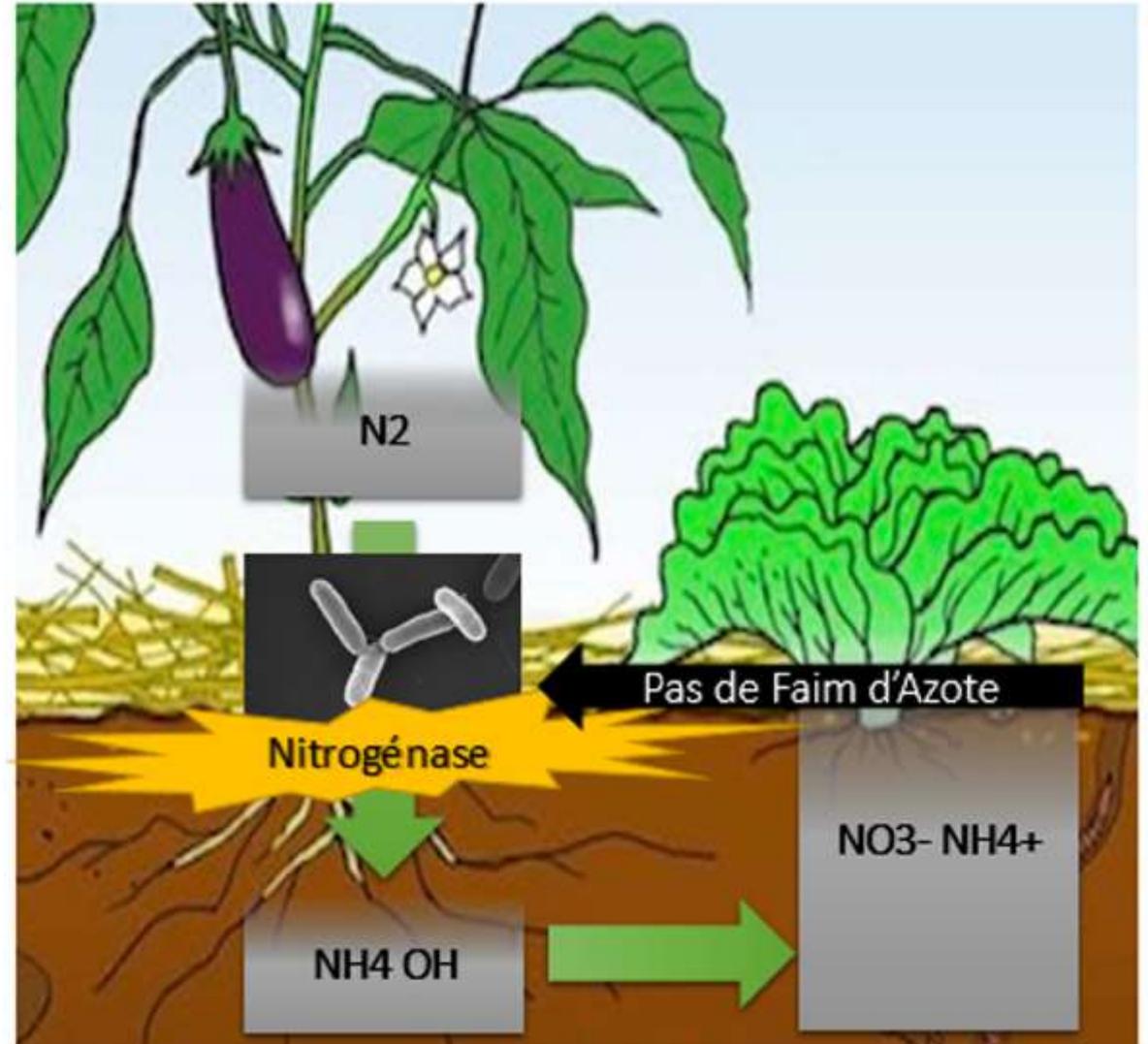
Pas de Faim d'Azote en surface

Il y a assez d'azote dans l'air !

Minéralisation de l'humus

Succion d'azote dans la rhizosphère

Le sol digère de la paille (feuilles mortes, bois, racines,...)



1 tonne de paille à C/N de 150 contient :

- ≈ 3 unités d'azote
- ≈ 400 unités de carbone

L'équivalence d'1t de paille :

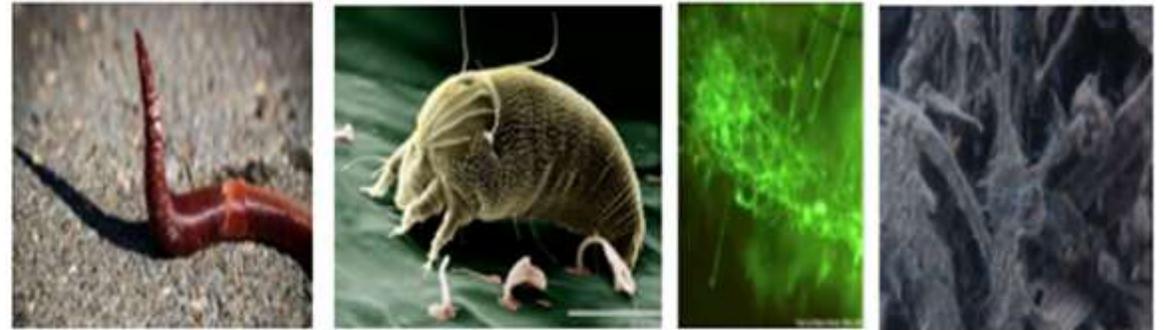


Dans l'air, le carbone est digéré par des fixateurs libres d'azote

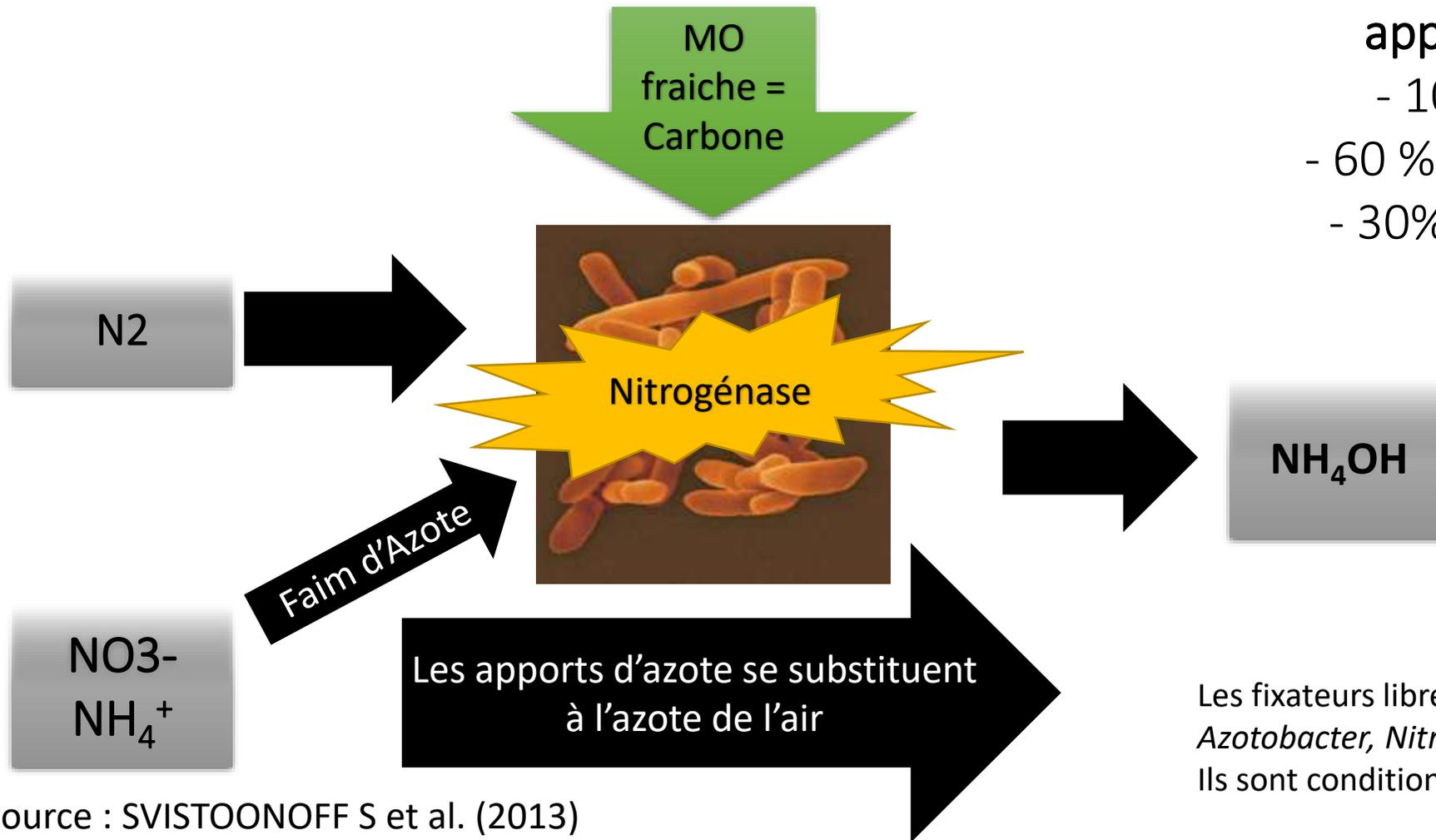
1 tonne de bouillie de paille à C/N de 24 contient

- ≈ 16 unités d'azote
- ≈ 400 unités de carbone

Cette bouillie végétale nourrit l'activité biologique dans le sol



Restitution de biomasse et azotobacter



Dans un écosystème naturel, les apports d'azote viennent :

- 10% des précipitations.
- 60 % de la fixation biologique.
- 30% du recyclage de la MO.

Les fixateurs libres comprennent des genres très divers : *Azotobacter*, *Nitrobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter*, ... Ils sont conditionné à la nutrition carbonée.

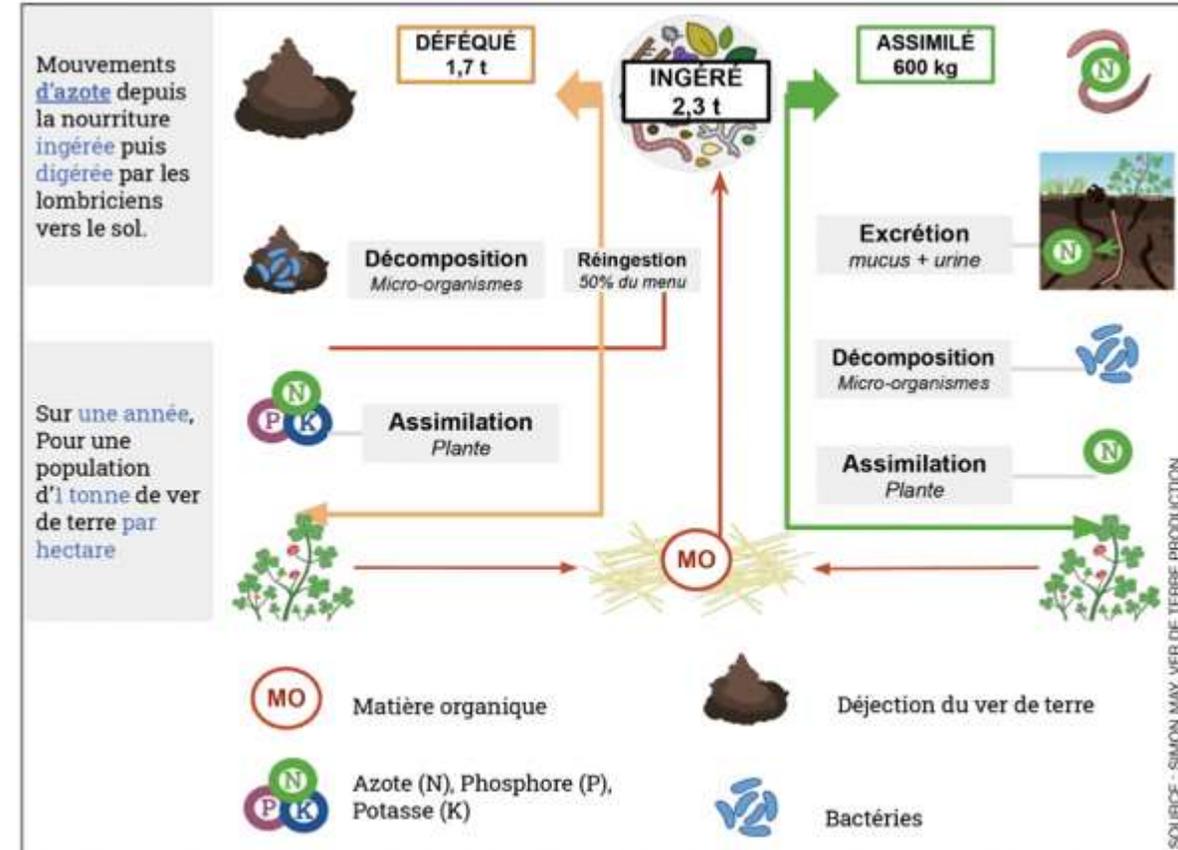
Bilans des transits intestinaux et métaboliques lombriciens

Azote :

- Ingéré : 2 300 kg/ha
- Assimilé par les plantes : 583 kg/ha soit 16,5% d'ingéré
- Déféqué : 1 767 kg/ha soit 85,3% d'ingéré

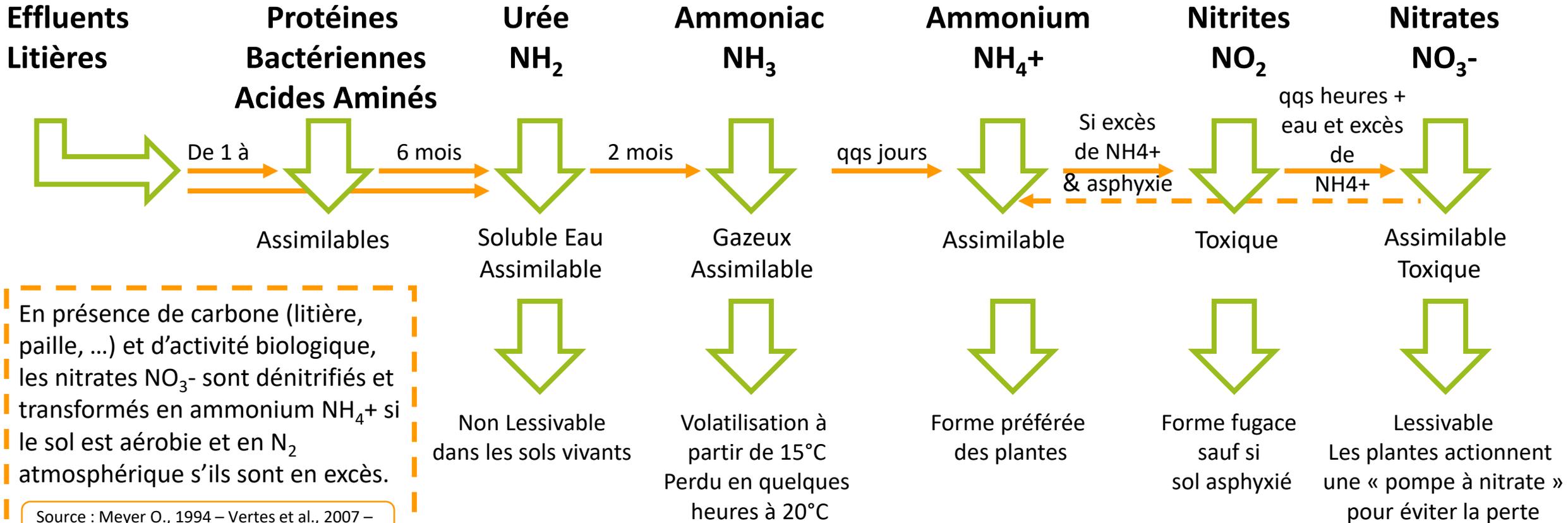
Carbone organique :

- Ingéré : 10 t/ha/an
 - Assimilé : 2 750 kg/ha/an soit 27,5% d'ingéré
 - Digéré : ~2 250 kg/ha/an soit 22,5% d'ingéré
 - Déféqué : ~5 000 kg/ha/an
- la moitié sera réingérée sous forme de lombrimix



Dans les sols vivants, les vers de terre participent à un flux d'azote de près de 600 kg/ha/an.

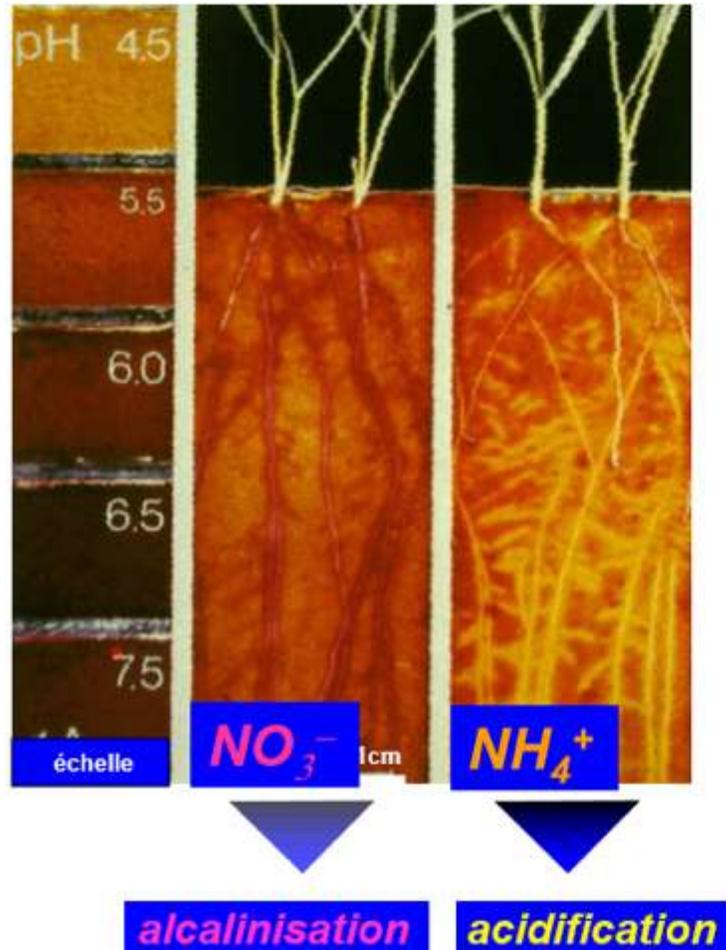
L'Azote dans les élevages et dans la nature



En présence de carbone (litière, paille, ...) et d'activité biologique, les nitrates NO₃⁻ sont dénitrifiés et transformés en ammonium NH₄⁺ si le sol est aérobie et en N₂ atmosphérique s'ils sont en excès.

Source : Meyer O., 1994 – Vertes et al., 2007 – Chabbi A. et Lemaire G., 2007

La racine acidifie le sol là où elle pousse L'acidification du sol dépend de la forme d'azote



Effet de la nutrition azotée sur
les modifications du pH
de la rhizosphère du blé

Mesure à l'aide
d'indicateur coloré à pH

(Römheld, 1986)

Lorsque les racines croient, le pH de la solution diminue jusqu'à une unité. L'absorption d'ammonium NH_4^+ par les plantes permet l'acidification, soit l'agressivité des racines face au minéral !!! Les Nitrates NO_3^- rendent le sol basique.

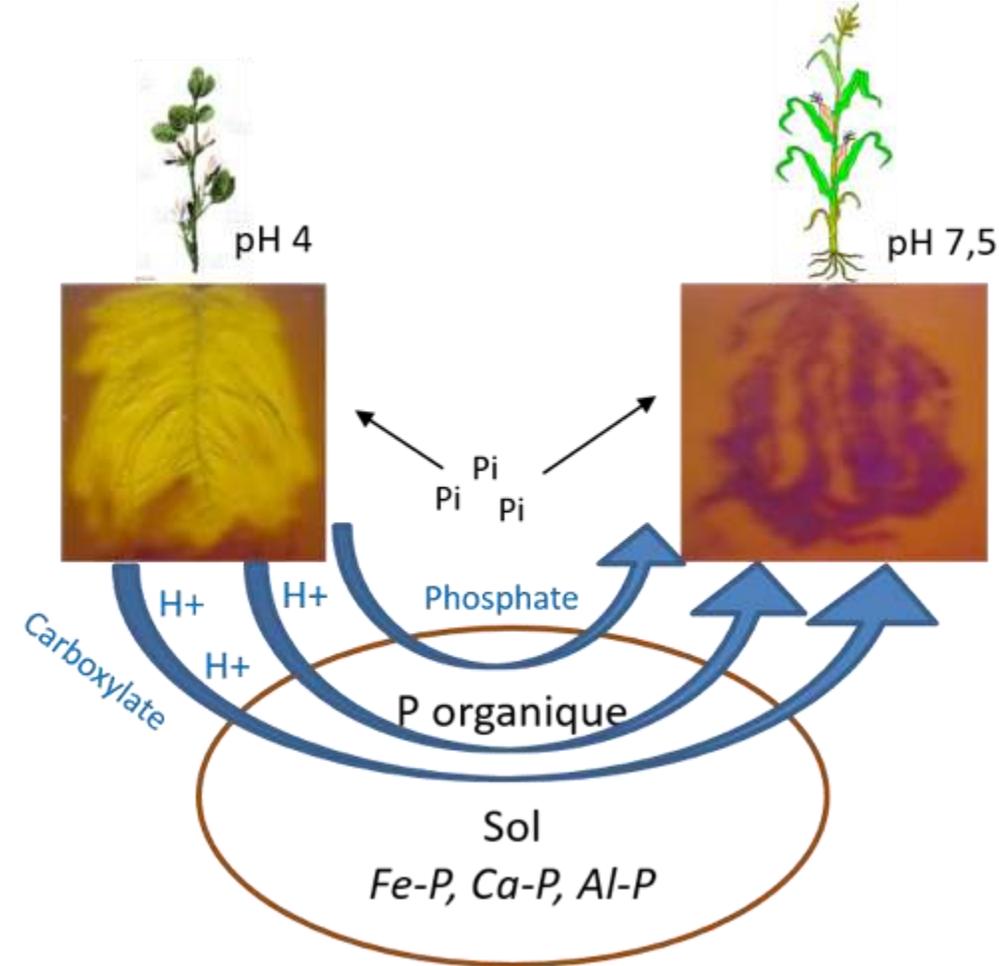
Source : JAILLARD B (2004)

Interaction féverole-Maïs sur le phosphore

Les interactions racinaires interspécifiques entre les deux plantes améliorent l'absorption de P par le maïs, sans influencer l'absorption de P par la féverole.

Pour casser une double ou triple liaison, il faut un acide organique, ou minéral.

Les légumineuses injectent de l'hydrogène dans les sols, hydrogène (H^+) qui leur vient de la biotransformation de l'ammoniac NH_3 .





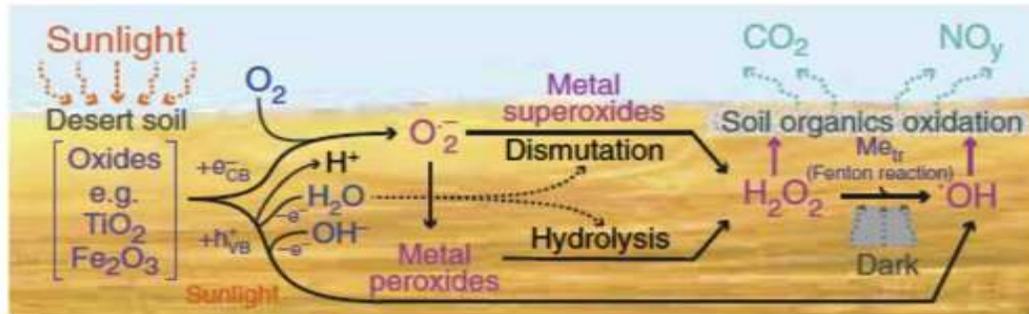
Vers un pilotage redox des systèmes ...

Depuis 2015, le soleil + les sols nus + l'oxygène ...

Sol nu: réaction de Fenton

Fer x rayons UV: O_2^- = hyper oxydant

Attaque chimiquement la matière organique (abiotique)



Georgiou et al. 2015. Evidence for photochemical production of reactive oxygen species in desert soil. Nature communications. DOI: 10,1038/ncomms8100



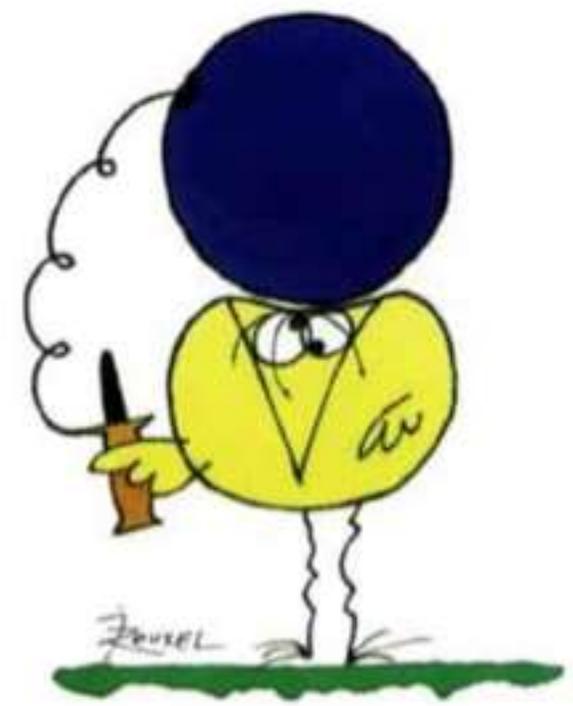


Toute la vie sur terre dépend d'un faible courant électrique alimenté par le soleil (et l'eau)

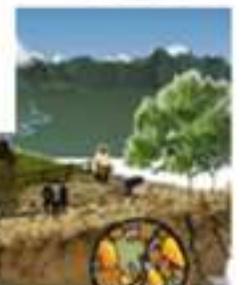
“What drives life is a little electric current, kept up by the sunshine”

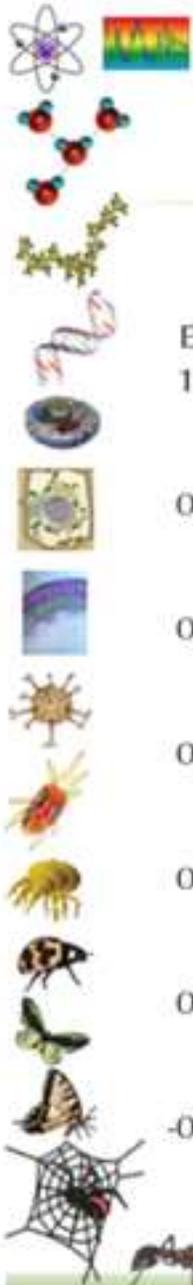
Albert Szent-Gyorgyi
1893-1986
Prix Nobel de Médecine-
Physiologie 1937

Les devises Shadok



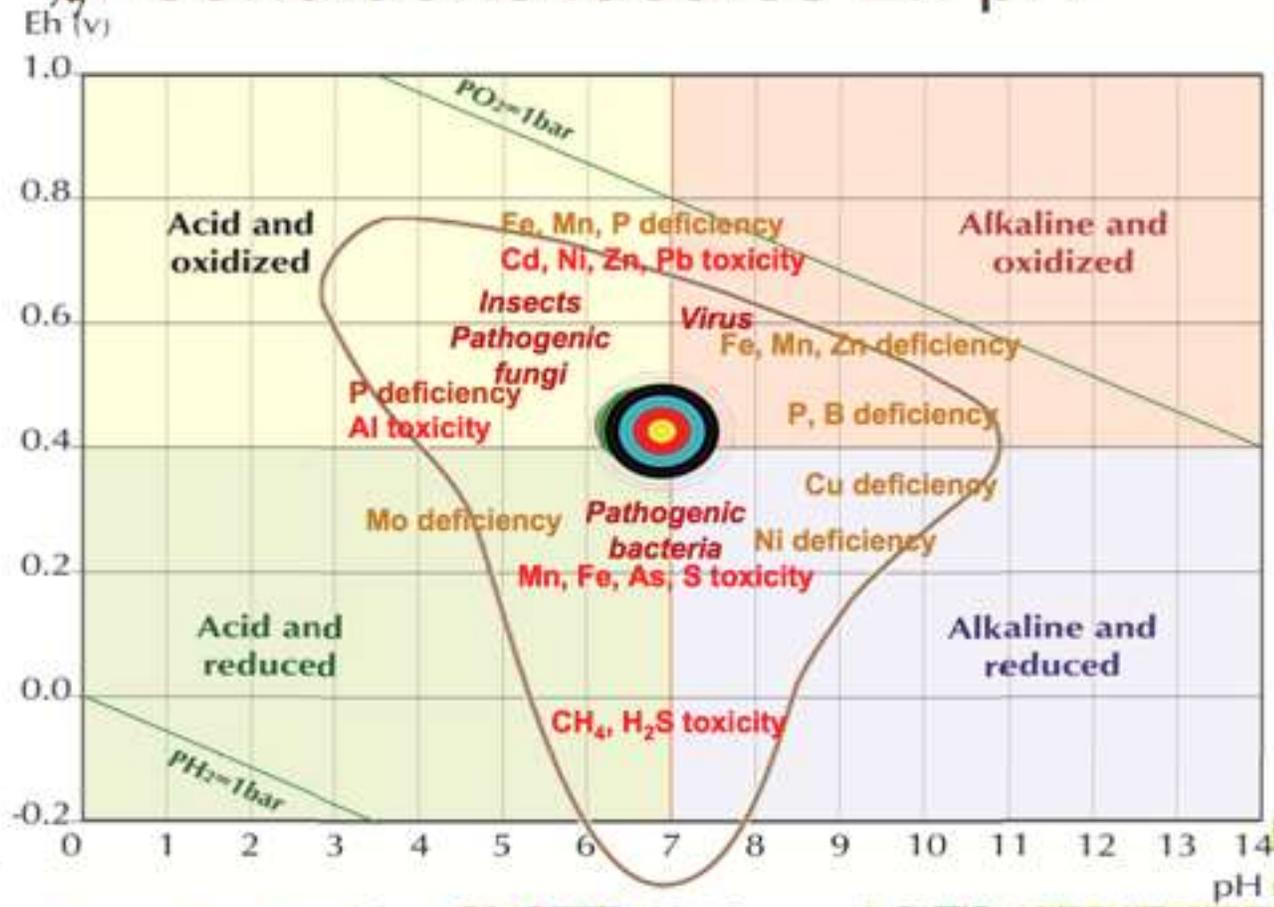
EN ESSAYANT CONTINUUELLEMENT
ON FINIT PAR RÉUSSIR. DONC:
PLUS GA RATE, PLUS ON A
DE CHANCES QUE GA MARCHE.





Un modèle conceptuel

Conditions idéales Eh-pH



Les devises Shadok

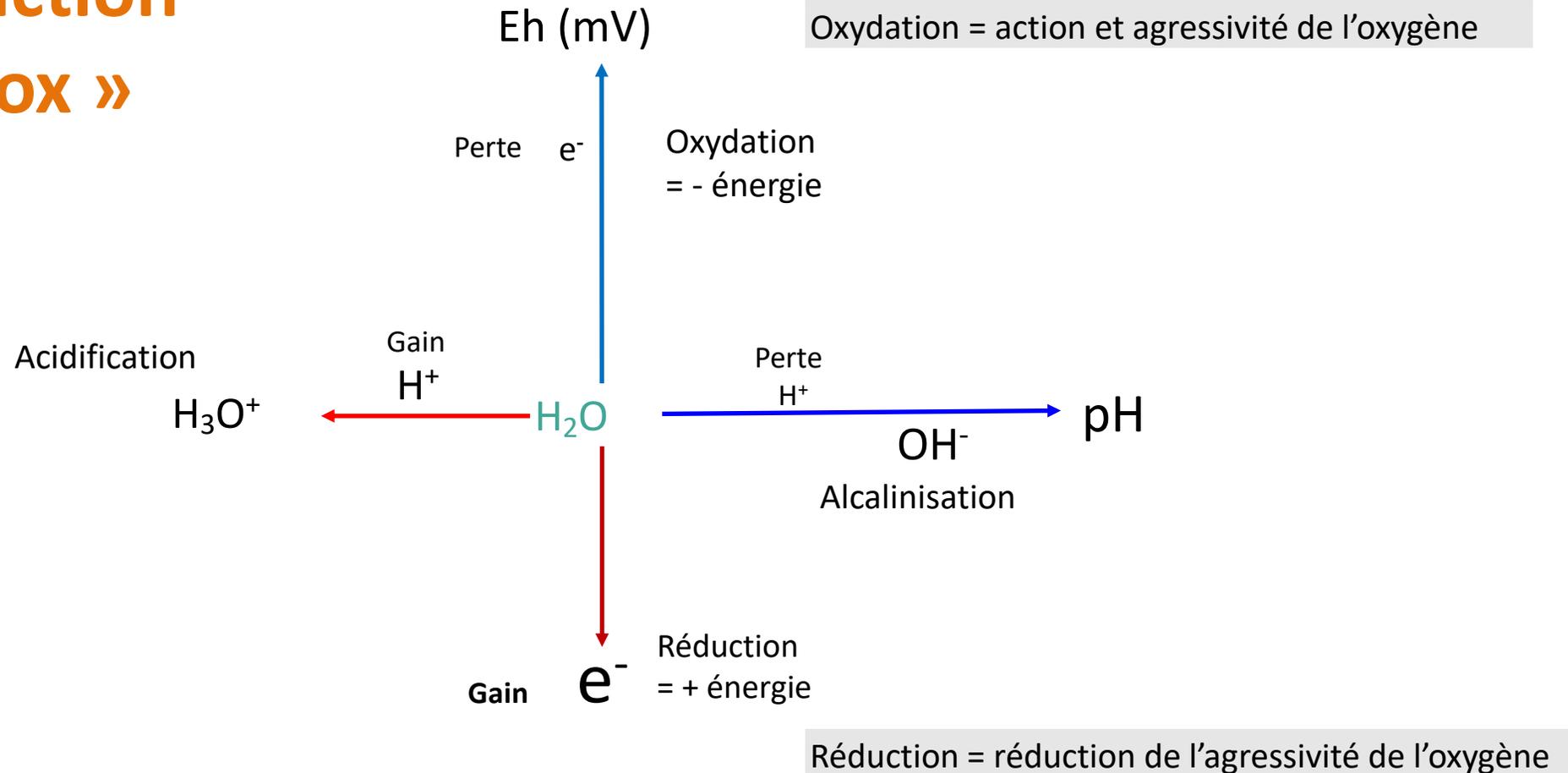


JE CRAINS
 LE CHAUD,
 LE SEC ET
 LE FROID,
 L'HUMIDITE.



Ajouter une dimension: pH et potentiel redox (Eh)

Oxydo – Réduction La « croix redox »



Vos cultures dans la Croix REDOX : TP

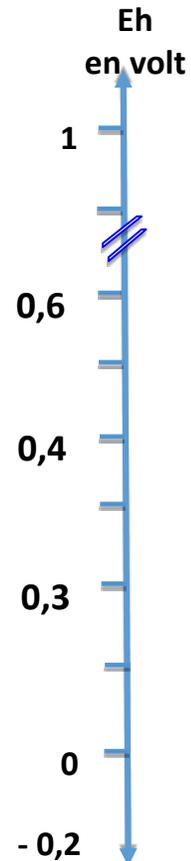
Oxydation = action de l'oxygène = perte d'électrons

- Action du travail du sol
- Actions du soleil
- Action de la pluie
- Toutes les fertilisations avec oxygène
- Tous les produits phytosanitaires

- Action de la photosynthèse
- Actions des résidus
- Action des effluents
- Action de l'absence d'oxygène
- Toutes les fertilisations sans oxygène
- Tous les acides organiques
- Tous oligos sans oxygène

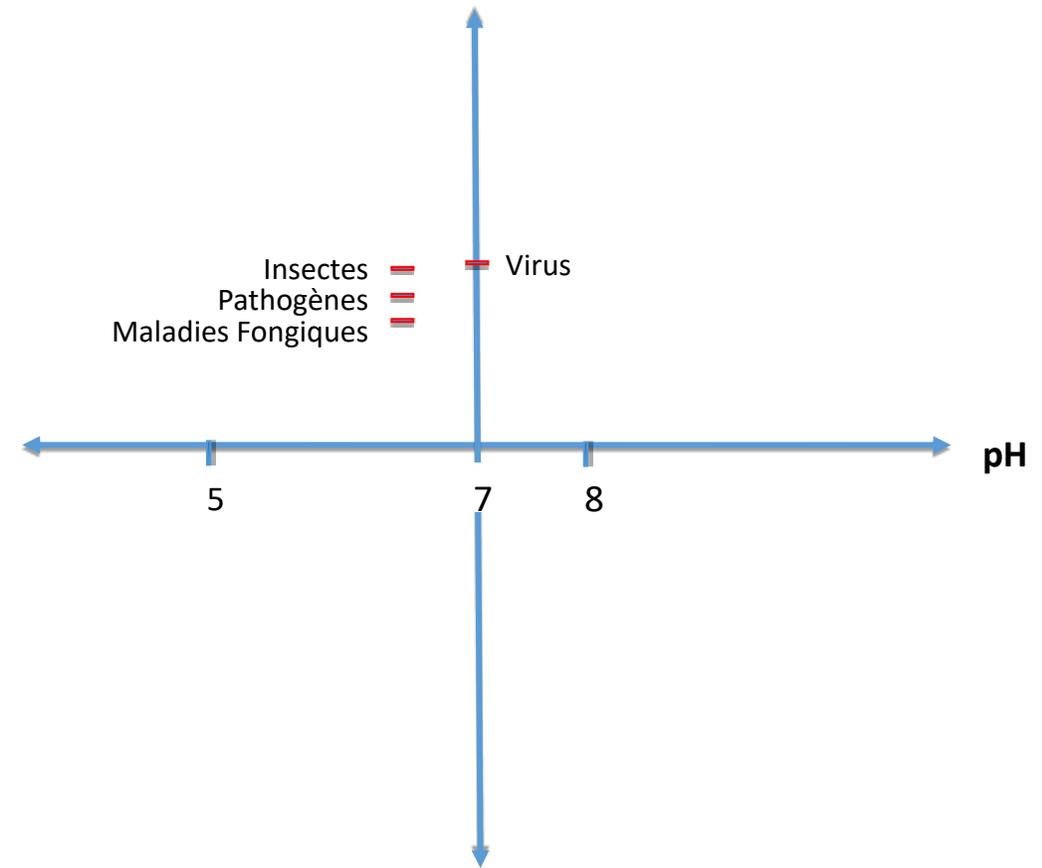
Réduction = Action des plantes = Gain d'électrons

Source : HUSSON O



Ce schéma n'est pas à l'échelle

Oxydation = Perte d'énergie = perte d'électron



Réduction = Gain d'énergie = Gain d'électron

Oxydation = action de l'oxygène = perte d'électrons

Action du travail du sol

- Injection d'oxygène, oxydation de la MO

Actions du soleil

- Sec // Chaud, oxydation de la MO

Action de la pluie

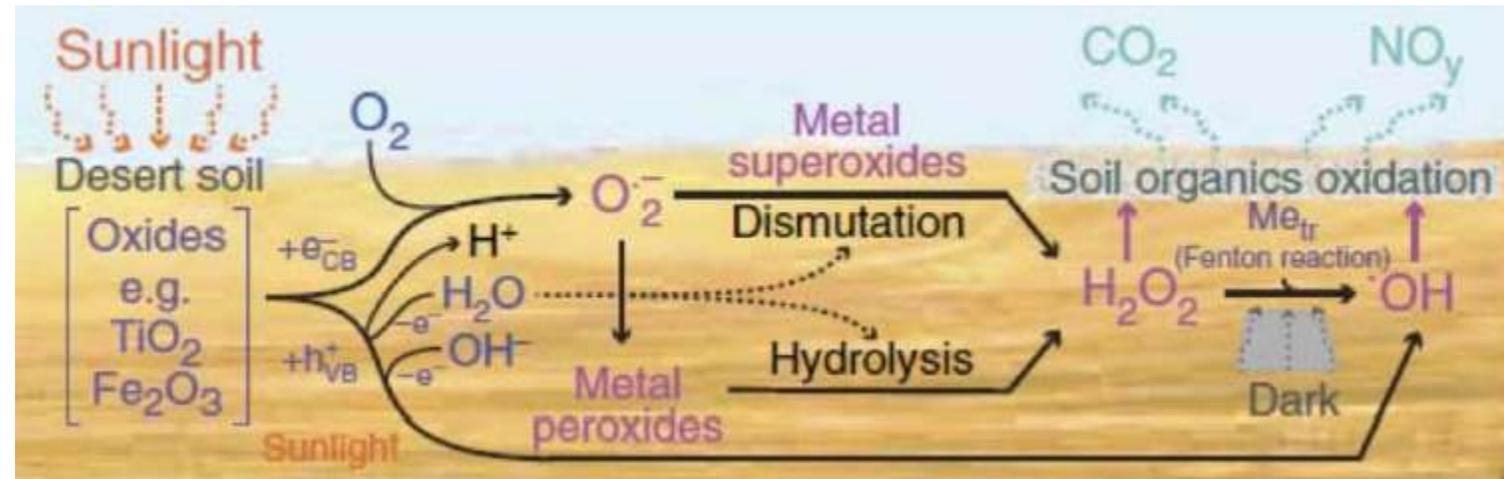
- Contient de l'oxygène dissous

Toutes les fertilisations avec oxygène

- NO₃, NO₂, SO₃, SO₄, P₂O₅, K₂O, CaO, MgO, ...
- Compost hygiénisé

Tous les produits phytosanitaires

- CuSO₄, herbicides, fongicides, insecticides



Equation de Fenton : Oxydation de la matière organique

Action de la photosynthèse

- Récupération d'électrons par le cycle de Calvin

Actions des résidus

- Paille // bois // feuilles // racines // résidus // Humus // MO Sol

Action des effluents

- Fumiers // compost Bokashi // lisiers // digestat...

Action de l'absence d'oxygène

- Hydromorphie, compaction, type de sols

Toutes les fertilisations sans oxygène

- NH₄⁺, NH₂, NH₃, oligos, ...

Tous les acides organiques

- Acide ascorbique // Lactique // Humique // fulvique
- Citrique ? Acétique ? Aspirine ?

Vitamines

Réduction

=

Action des plantes : couverture des sols

=

Gain d'électrons



Oxydation = action de l'oxygène = perte d'électrons

Action du travail du sol

- Injection d'oxygène, oxydation de la MO

Actions du soleil

- Sec // Chaud

Action de la pluie

- Contient de l'oxygène dissous

Toutes les fertilisations avec oxygène

- NO₃⁻, SO₃, SO₄, P₂O₅, K₂O, CaO, MgO, ...
- composts hygiénisés (70°C)

Tous les produits phytosanitaires

- CuSO₄, herbicides, fongicides, insecticides

Action de la photosynthèse

- Récupération d'électrons par le cycle de Calvin

Actions des résidus

- Paille // bois // feuilles // racines // résidus // Humus // MO Sol

Action des effluents

- Fumiers // compost bokashi // lisiers // digestat...

Action de l'absence d'oxygène

- Hydromorphie, compaction, type de sols

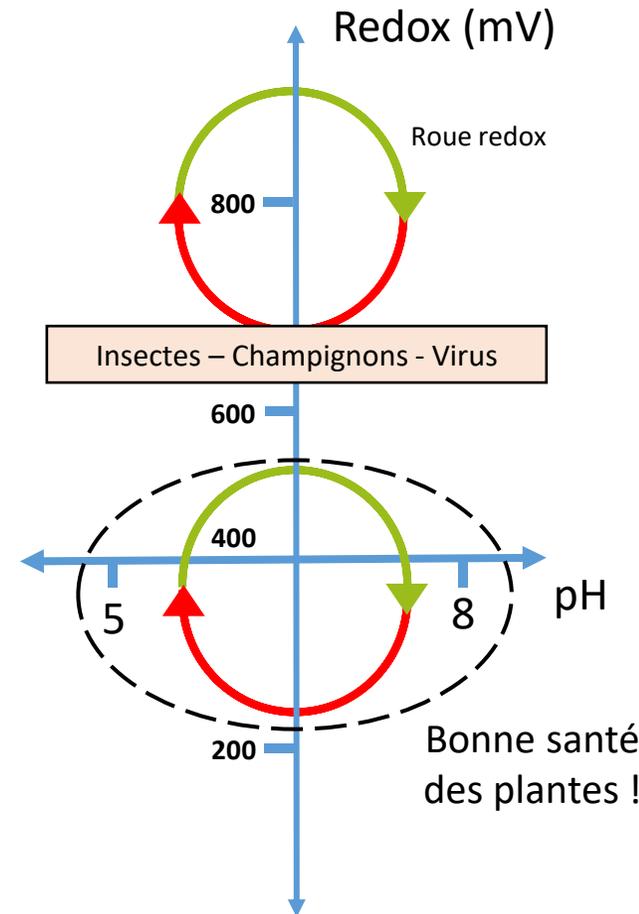
Toutes les fertilisations sans oxygène

- NH₄⁺, NH₂, NH₃, oligos, ...

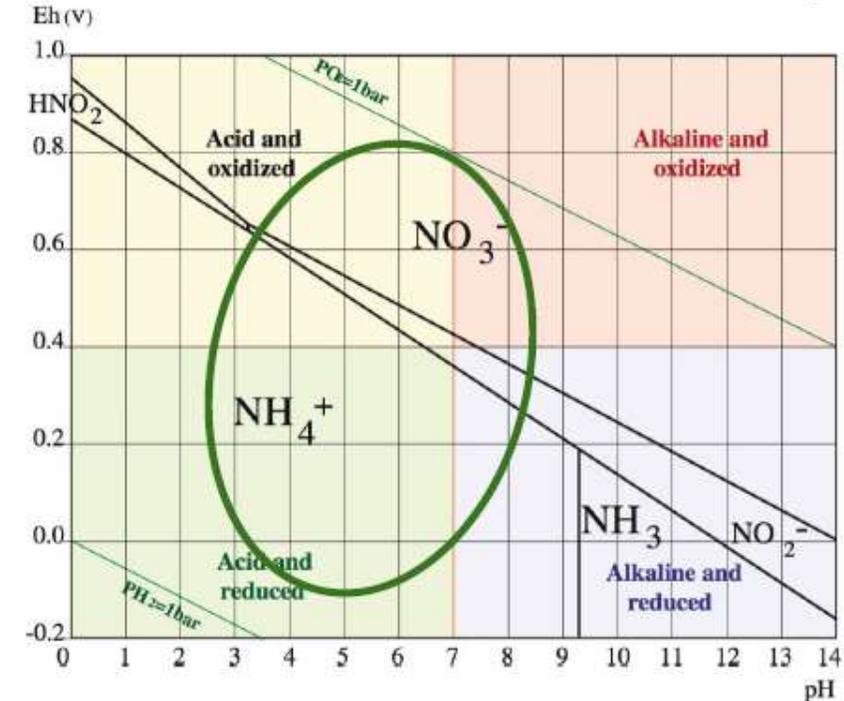
Tous les acides organiques

- Acide ascorbique // Lactique // Humique // Fulvique
- Citrique ? Acétique ? Aspirine ?

Vitamines



Réduction = Action des plantes = Gain d'électrons

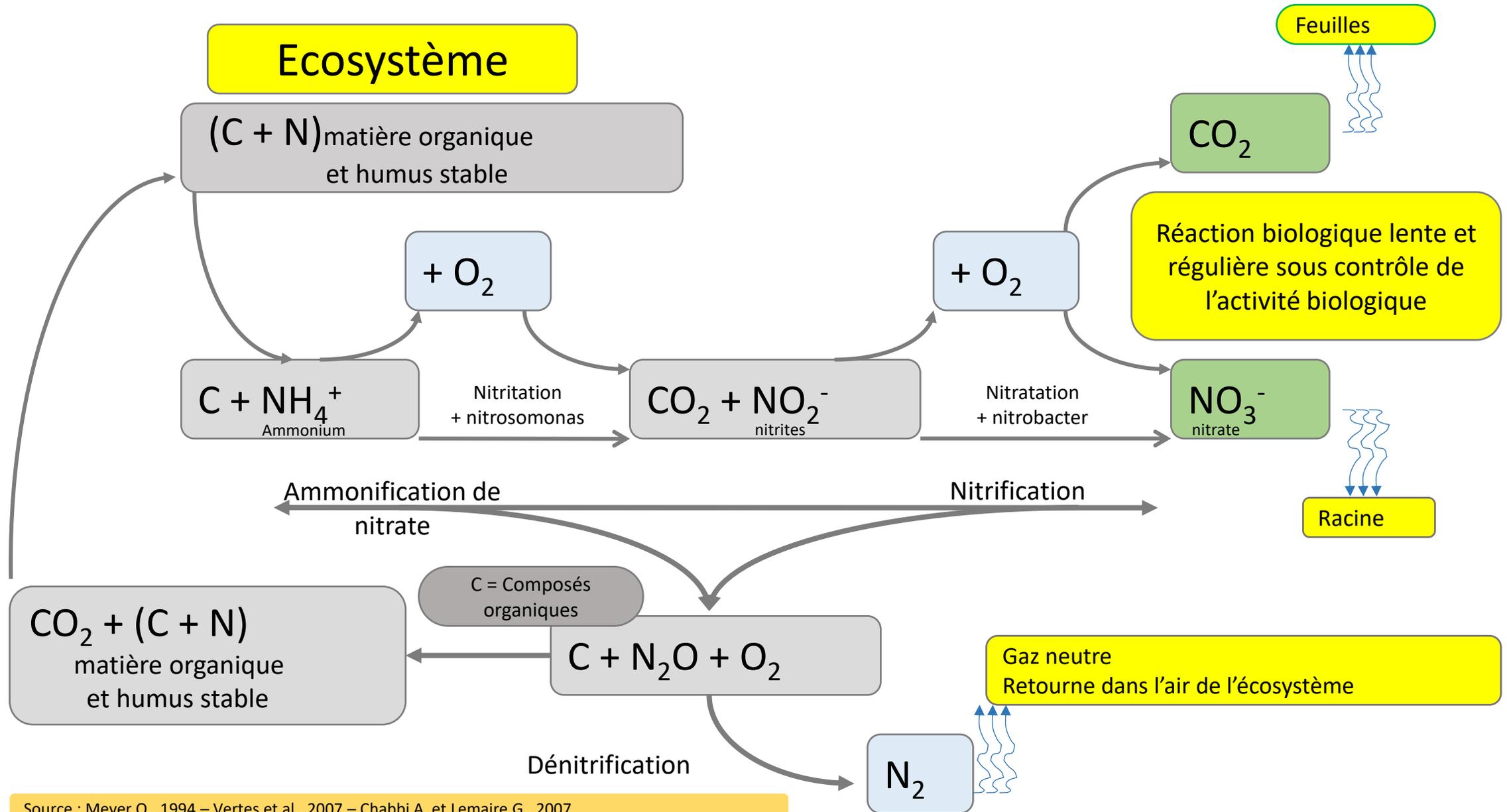


Source : HUSSON O (2021)

	Composé	Niveau d'oxydation		
Composé très réduit	N organique (R-NH ₂)	-3	Composé peu oxydé	
	Ammonium (NH ₄ ⁺)	-3		
Composé peu réduit	Azote gazeux (N ₂)	0		Composé très oxydé
	Oxyde nitreux (N ₂ O)	+1 (moyenne par N)		
	Oxyde d'azote (NO)	+2		
	Nitrite (NO ₂ ⁻)	+3		
	Dioxyde d'azote (NO ₂)	+4		
	Nitrate (NO ₃ ⁻)	+5		

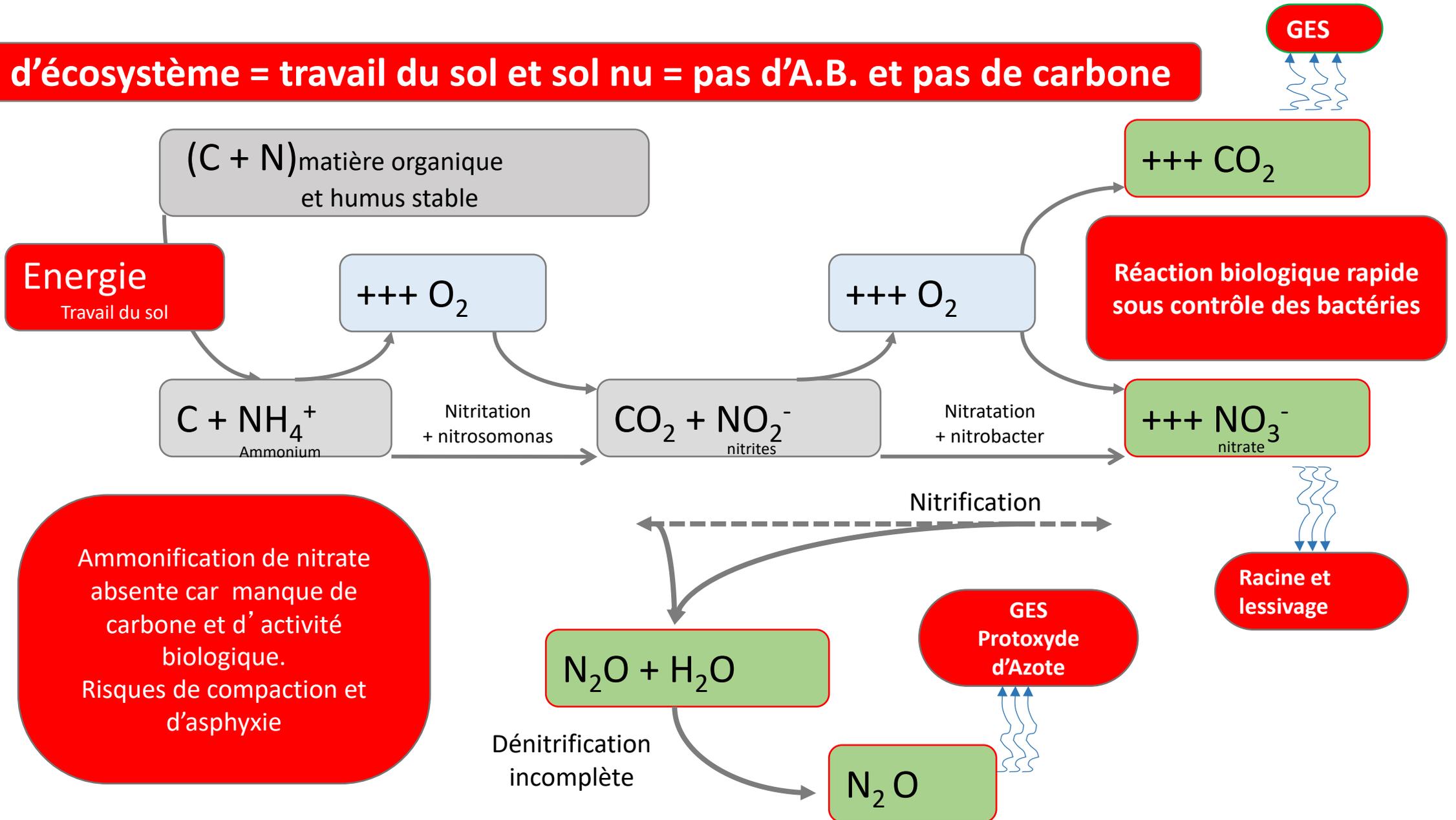
Figure 13 : niveau d'oxydation de divers composés azotés (Madigan et Martinko, 2007).

RELIQUATS D'AZOTE : ÉVITER LE LESSIVAGE



RELIQUATS D'AZOTE : FAVORISER LE LESSIVAGE et LA POLLUTION

Pas d'écosystème = travail du sol et sol nu = pas d'A.B. et pas de carbone



Qu'est-ce que l'agroécologie ?

- **Agro** : Du grec ancien "ἀγρός", agros (champs)
- **Eco** : Du grec "oikos" (maison)
- **Logie** : Du grec "logos" (science)



L'agro-éco-logie :

C'est une agriculture qui étudie et utilise le sol agricole comme une maison hébergeant une grande quantité d'êtres vivants capable de faire pousser les plantes toutes seules



**Nécessité de plantes géantes, de diversité, d'intensité !
Produire, Protéger, Valoriser le surplus ...
Les plantes sont l'énergie de la terre !**





Questions ???

Contact : Konrad Schreiber – 06.77.96.05.26 - kslavacheheureuse@gmail.com



Références bibliographiques

Ali, A. (2020). Nitrate assimilation pathway in higher plants: critical role in nitrogen signalling and utilization. *Plant Science Today*, 7(2), 182-192.

Becker-Ritt A-B., Martinelli A-H-S., Mitidieri S., Feder V., Wassermann G-E., Santi L., et al. (2007). Antifungal activity of plant and bacterial ureases. *Toxicon*, 50, 971-983.

Bloom, A. J., Sukrapanna, S. S., & Warner, R. L. (1992). Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*, 99(4), 1294-1301.

Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2005). Nitrogen acquisition, PEP carboxylase, and cellular pH homeostasis: new views on old paradigms. *Plant, Cell & Environment*, 28(11), 1396-1409.

Bush, D. R. (1993). Proton-coupled sugar and amino acid transporters in plants. *Annual review of plant biology*, 44(1), 513-542.

Cambui, C. A., Svennerstam, H., Gruffman, L., Nordin, A., Ganeteg, U., & Näsholm, T. (2011). Patterns of plant biomass partitioning depend on nitrogen source. *PLoS One*, 6(4), e19211.

Carbonneau, A., & Torregrosa, L. (2020). *Traité de la vigne-3e éd.: Physiologie, terroir, culture*. Dunod.

Causin, H. F., & Barneix, A. J. (1993). Regulation of NH_4^+ uptake in wheat plants : effect of root ammonium concentration and amino acids. *Plant and Soil*, 151(2), 211-218.

Crawford, N. M. (1995). Nitrate: nutrient and signal for plant growth. *The plant cell*, 7(7), 859.

Crawford, N. M., & Glass, A. D. (1998). Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends in plant science*, 3(10), 389-395.

Delaire, M. (2005). *Variations de la capacité d'absorption minérale par les racines du jeune Acer pseudoplatanus, L.(Acéracées) consécutives à l'histoire nutritionnelle récente et ancienne de la plante. Application à la culture hors sol des végétaux ligneux* (Doctoral dissertation).

Erikson, O., Hertzberg, M., & Näsholm, T. (2004). A conditional marker gene allowing both positive and negative selection in plants. *Nature biotechnology*, 22(4), 455-458.

Erikson, O., Hertzberg, M., & Näsholm, T. (2005). The *dsdA* gene from *Escherichia coli* provides a novel selectable marker for plant transformation. *Plant molecular biology*, 57(3), 425-433.

Escobar, M. A., Geisler, D. A., & Rasmusson, A. G. (2006). Reorganization of the alternative pathways of the Arabidopsis respiratory chain by nitrogen supply: opposing effects of ammonium and nitrate. *The Plant Journal*, 45(5), 775-788.

Falkengren-Grerup, U., Månsson, K. F., & Olsson, M. O. (2000). Uptake capacity of amino acids by ten grasses and forbs in relation to soil acidity and nitrogen availability. *Environmental and Experimental Botany*, 44(3), 207-219.

Fan, S. C., Lin, C. S., Hsu, P. K., Lin, S. H., & Tsay, Y. F. (2009). The *Arabidopsis* nitrate transporter NRT1. 7, expressed in phloem, is responsible for source-to-sink remobilization of nitrate. *The Plant Cell*, 21(9), 2750-2761.

Finzi, A. C., & Berthrong, S. T. (2005). The uptake of amino acids by microbes and trees in three cold-temperate forests. *Ecology*, 86(12), 3345-3353.

Forsum, O., Svennerstam, H., Ganeteg, U., & Näsholm, T. (2008). Capacities and constraints of amino acid utilization in *Arabidopsis*. *New Phytologist*, 179(4), 1058-1069.

Franklin, O., Cambui, C. A., Gruffman, L., Palmroth, S., Oren, R., & Näsholm, T. (2017). The carbon bonus of organic nitrogen enhances nitrogen use efficiency of plants. *Plant, cell & environment*, 40(1), 25-35.

Gazzarrini, S., Lejay, L., Gojon, A., Ninnemann, O., Frommer, W. B., & von Wirén, N. (1999). Three functional transporters for constitutive, diurnally regulated, and starvation-induced uptake of ammonium into *Arabidopsis* roots. *The Plant Cell*, 11(5), 937-947.

Glass, A. D. M., & Siddiqi, M. Y. (1995). Nitrogen absorption in higher plants. *Nitrogen nutrition in higher plants.*, 21-55.

Granstedt, R. C., & Huffaker, R. C. (1982). Identification of the leaf vacuole as a major nitrate storage pool. *Plant Physiology*, 70(2), 410-413.

Hayashi, H., & Chino, M. (1990). Chemical composition of phloem sap from the uppermost internode of the rice plant. *Plant and Cell Physiology*, 31(2), 247-251.

Hill, E. J. (2019). *Hotspots and Hot Moments of Amino Acid Nitrogen: Real-Time Insights Using Continuous Microdialysis Sampling* (Doctoral dissertation, Bangor University (United Kingdom)).

Howitt, S. M., & Udvardi, M. K. (2000). Structure, function and regulation of ammonium transporters in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1465(1-2), 152-170.

Ireland, R. J., & Lea, P. J. (1999). The enzymes of glutamine, glutamate, asparagine and aspartate metabolism. *Plant Amino Acids : Biochemistry and Biotechnology*, 49-110.

Jones, D. L., & Darrah, P. R. (1994). Amino-acid influx at the soil-root interface of *Zea mays* L. and its implications in the rhizosphere. *Plant and soil*, 163(1), 1-12.

Jones, D. L., Owen, A. G., & Farrar, J. F. (2002). Simple method to enable the high resolution determination of total free amino acids in soil solutions and soil extracts. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(12), 1893-1902.

Knoblauch, M., Knoblauch, J., Mullendore, D. L., Savage, J. A., Babst, B. A., Beecher, S. D., ... & Holbrook, N. M. (2016). Testing the Münch hypothesis of long distance phloem transport in plants. *Elife*, 5, e15341.

Kojima S., Bohner A., Gasser B., Yuan L., Von Wirén N. (2007). AtDUR3 represents the major transporter for high-affinity urea transport across the plasma membrane of nitrogen-deficient *Arabidopsis* roots. *The Plant Journal*, 52, 30-40.

Ku, Y. S., Cheng, S. S., Ng, M. S., Chung, G., & Lam, H. M. (2022). The Tiny Companion Matters: The Important Role of Protons in Active Transports in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), 2824.

Lang, C. P., Bárdos, G., Merkt, N., & Zörb, C. (2020). Expression of key enzymes for nitrogen assimilation in grapevine rootstock in response to N-form and timing. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(1), 91-98.

Lea, P. J., & Mifflin, B. J. (1980). Transport and metabolism of asparagine and other nitrogen compounds within the plant. In *Amino Acids and Derivatives* (pp. 569-607). Academic Press.

Li, S. X., Wang, Z. H., & Stewart, B. A. (2013). Responses of crop plants to ammonium and nitrate N. In *Advances in agronomy* (Vol. 118, pp. 205-397). Academic Press

Lipson, D., & Näsholm, T. (2001). The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems. *Oecologia*, 128(3), 305-316.

Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 250-258.

Madigan, M., & Martinko, J. (2007). Brock-Biologie des Micoorganismes (11 ème édition). *Ed Tech*

Marschner, H., Römheld, V., Horst, W. J., & Martin, P. (1986). Root-induced changes in the rhizosphere : importance for the mineral nutrition of plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149(4), 441-456.

Masclaux-Daubresse C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., & Suzuki, A. (2010). Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants : challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of botany*, 105(7), 1141-1157.

Maurel, C., & Chrispeels, M. J. (2001). Aquaporins. A molecular entry into plant water relations. *Plant physiology*, 125(1), 135-138.

McNeill, A., & Unkovich, M. (2007). The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. In *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems* (pp. 37-64). Springer, Berlin, Heidelberg.

Mérigout P., Lelandais M., Bitton F., Renou J-P., Briand X., Meyer C., Daniel Vedele F. (2008). Physiological and transcriptomic aspects of urea uptake and assimilation in *Arabidopsis* plants. *Plant Physiology*, 147, 1225-1238.

Mérigout, P. (2006). *Étude du métabolisme de la plante en réponse à l'apport de différents fertilisants et adjuvants culturaux. Influence des phytohormones sur le métabolisme azoté* (Doctoral dissertation).

Miller, A. J., & Cramer, M. D. (2005). Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant and soil*, 274(1), 1-36.

Miller, A. J., Shen, Q., & Xu, G. (2009). Freeways in the plant: transporters for N, P and S and their regulation. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 284-290.

Morgan, M. A., Volk, R. J., & Jackson, W. A. (1973). Simultaneous influx and efflux of nitrate during uptake by perennial ryegrass. *Plant Physiology*, 51(2), 267-272.

Morot-Gaudry, J. F., Orsel, M., Diaz, C., Daniel-Vedele, F., & Masclaux-Daubresse, C. (2006). Absorption et assimilation du nitrate et recyclage de l'azote organique chez les plantes : intérêt pour le colza. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 13(6), 393-402.

Näsholm, T., Kielland, K., & Ganeteg, U. (2009). Uptake of organic nitrogen by plants. *New phytologist*, 182(1), 31-48.

Öhlund, J., & Näsholm, T. (2001). Growth of conifer seedlings on organic and inorganic nitrogen sources. *Tree Physiology*, 21(18), 1319-1326.

Ourry, A., Gordon, A. J., & Macduff, J. H. (1997). *Nitrogen uptake and assimilation in roots and root nodules* (pp. 237-254). London: Taylor and Francis.

Paungfoo-Lonhienne, C., Lonhienne, T. G., Rentsch, D., Robinson, N., Christie, M., Webb, R. I., ... & Schmidt, S. (2008). Plants can use protein as a nitrogen source without assistance from other organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(11), 4524-4529.

Raven, J. A., Wollenweber, B., & Handley, L. L. (1992). A comparison of ammonium and nitrate as nitrogen sources for photolithotrophs. *New Phytologist*, 121(1), 19-32.

Rufty, T. W., Jackson, W. A., & Raper, C. D. (1981). Nitrate reduction in roots as affected by the presence of potassium and by flux of nitrate through the roots. *Plant Physiology*, 68(3), 605-609.

Seyoshi, K., Ishikawa, S., & Abdel-latif, H. I. S. (2010). 5. Nitrate transport in barley. *Nitrogen Assimilation in Plants*.

Smith, F. A., & Raven, J. A. (1979). Intracellular pH and its regulation. *Annual Review of Plant Physiology*, 30(1), 289-311.

Söderlund, R., & Svensson, B. H. (1976). The global nitrogen cycle. *Ecological Bulletins*, 23-73.

Tegeder, M., & Hammes, U. Z. (2018). The way out and in : phloem loading and unloading of amino acids. *Current Opinion in Plant Biology*, 43, 16-21.

Teixeira, W. F., Fagan, E. B., Soares, L. H., Soares, J. N., Reichardt, K., & Neto, D. D. (2018). Seed and foliar application of amino acids improve variables of nitrogen metabolism and productivity in soybean crop. *Frontiers in Plant Science*, 9, 396.

Thornton, B. (2001). Uptake of glycine by non-mycorrhizal *Lolium perenne*. *Journal of Experimental Botany*, 52(359), 1315-1322.

Thornton, B., & Robinson, D. (2005). Uptake and assimilation of nitrogen from solutions containing multiple N sources. *Plant, Cell & Environment*, 28(6), 813-821.

Tsay, Y. F., Chiu, C. C., Tsai, C. B., Ho, C. H., & Hsu, P. K. (2007). Nitrate transporters and peptide transporters. *FEBS letters*, 581(12), 2290-2300.

von Wirén, N., Gojon, A., Chaillou, S., & Raper, D. (2001). Mechanisms and regulation of ammonium uptake in higher plants. In *Plant nitrogen* (pp. 61-77). Springer, Berlin, Heidelberg.

Wang YY, Hsu PK, Tsay YF. (2012). Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends Plant Science*, 17, 458-67.

Wang, M. Y., Siddiqi, M. Y., Ruth, T. J., & Glass, A. D. (1993a). Ammonium uptake by rice roots (I. Fluxes and subcellular distribution of $^{13}\text{NH}_4^+$). *Plant Physiology*, 103(4), 1249-1258.

Comprendre le cycle de l'azote dans la nature

Pour copier le fonctionnement de la nature pour faire l'agriculture

10 décembre 2024

Witte C-P., Isidore E., Tiller S-A., davies H-V., Taylor M-A. (2001). Functional characterization of urease accessory protein G (ureG) from potato. *Plant Molecular Biology*, 45, 169-179.

Witte, C. P. (2011). Urea metabolism in plants. *Plant Science*, 180(3), 431-438.

Zerihun, A., McKenzie, B. A., & Morton, J. D. (1998). Photosynthate costs associated with the utilization of different nitrogen-forms : influence on the carbon balance of plants and shoot-root biomass partitioning. *The New Phytologist*, 138(1), 1-11.