

Module PG : Pédologie et potentialité des sols

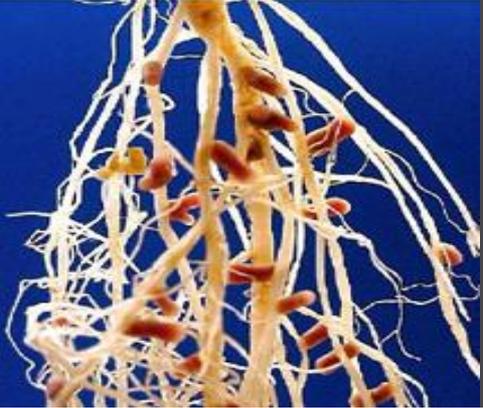
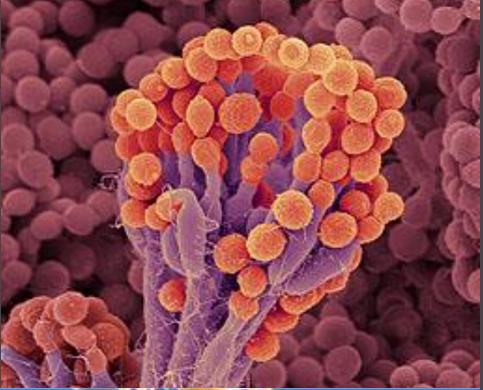
Des approches complémentaires indispensables pour comprendre les enjeux qui pèsent sur les sols (cultivés)

Hydro Pédologie
Maritxu Guiresse
4 cours + 1 TD

Pédologie générale :
Maritxu Guiresse
5 cours + 1 TD

Microbiologie des sols
Maialen Barret
2 cours

Faune du sol
Benjamin Pey
3 cours + 1 TD



MICROBIOLOGIE DU SOL

Maialen BARRET, MCF INPT-ENSAT

3

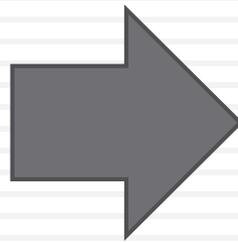
Mes coordonnées

maialen.barret@ensat.fr

Bureau 1241

Objectifs du cours

Bases de
microbiologie
et biochimie



Comprendre les
processus microbiens
dans le sol

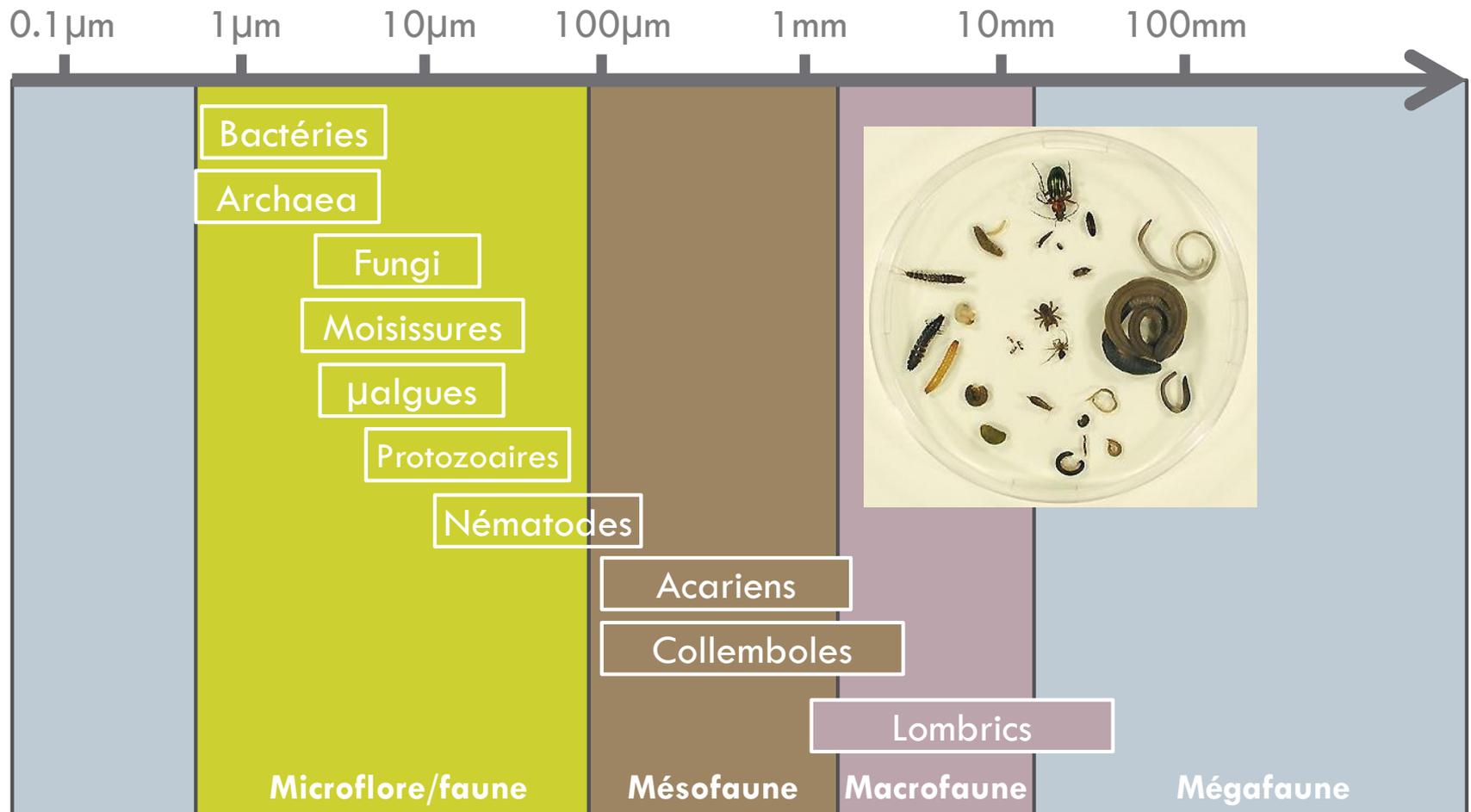
AGRONOMIE:
Analyser l'impact de
pratiques culturales

ENVIRONNEMENT:
Comprendre les enjeux
globaux liés au sol

Introduction: microbiologie

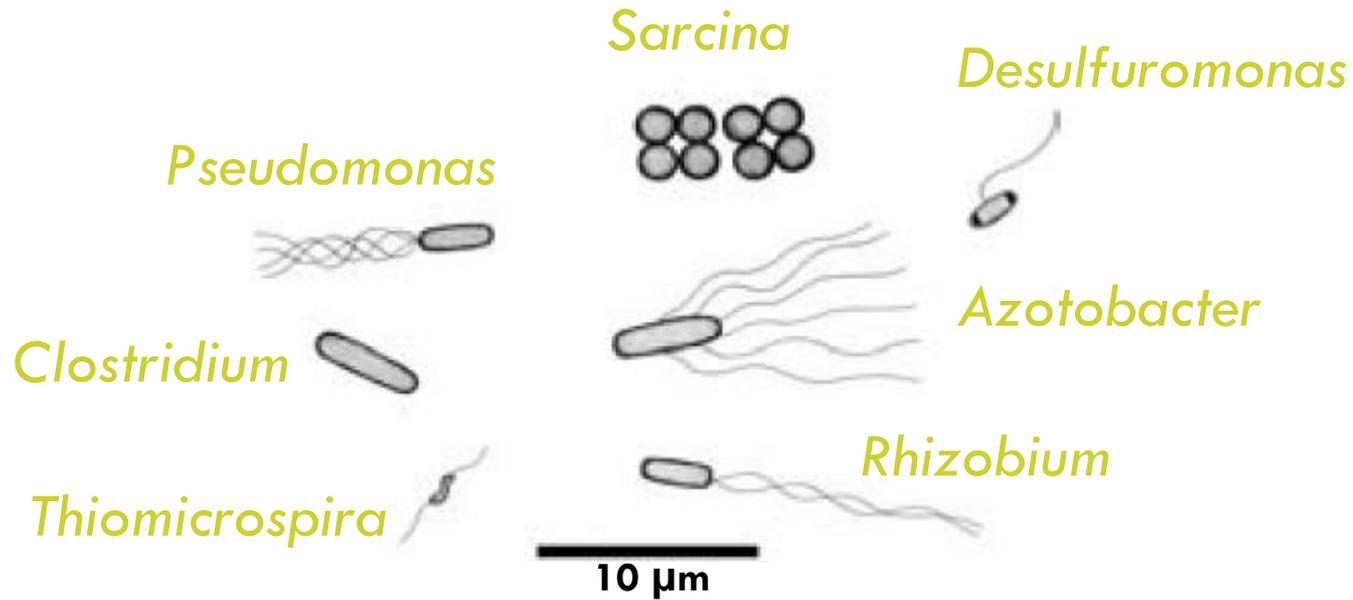
5

□ Microorganismes



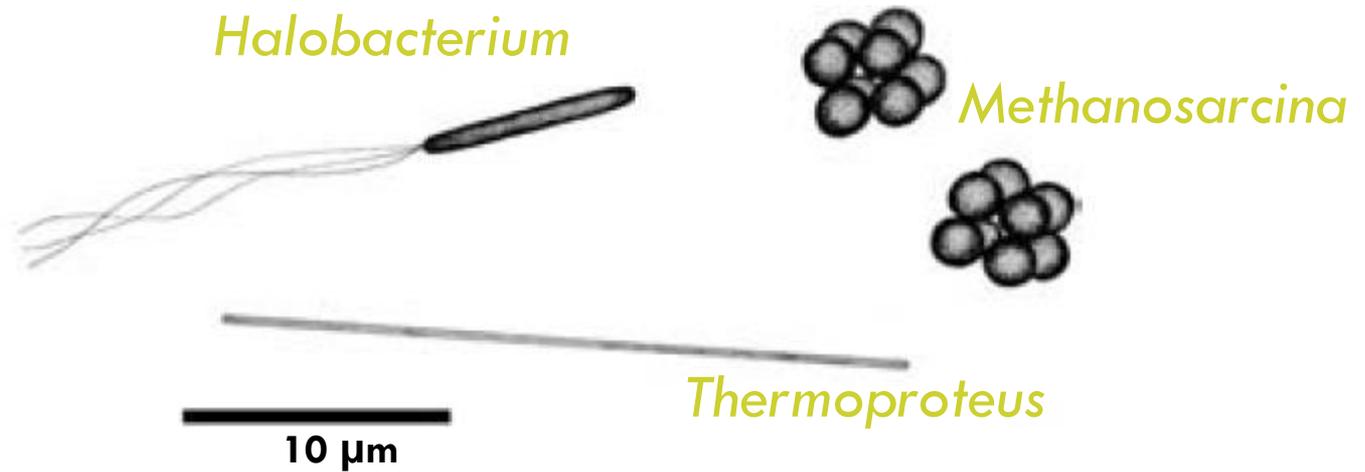
Aperçu: Bactéries (1-10 µm)

6



Aperçu: Archaea (1-10 μm)

7

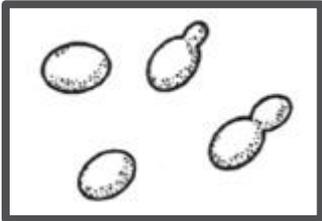


Aperçu: Champignons (diamètre: 2-10 μm)

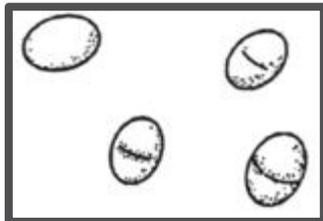
8

Levures

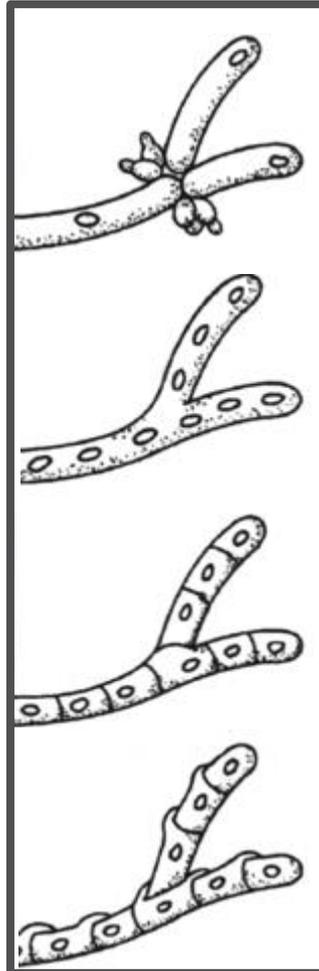
Blastoconidies



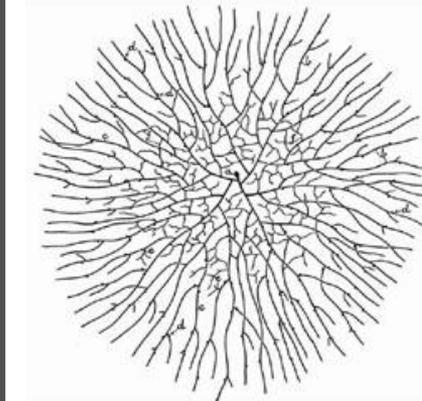
Fission



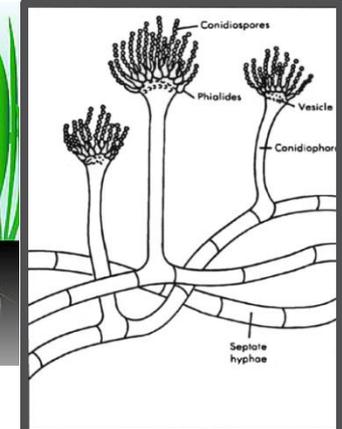
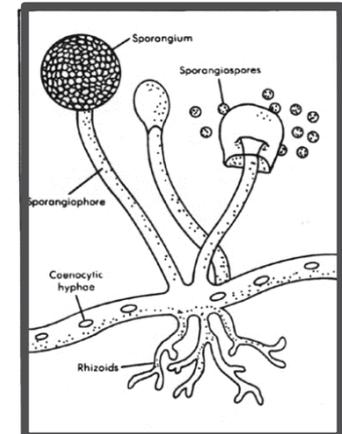
Hyphes



Mycelium

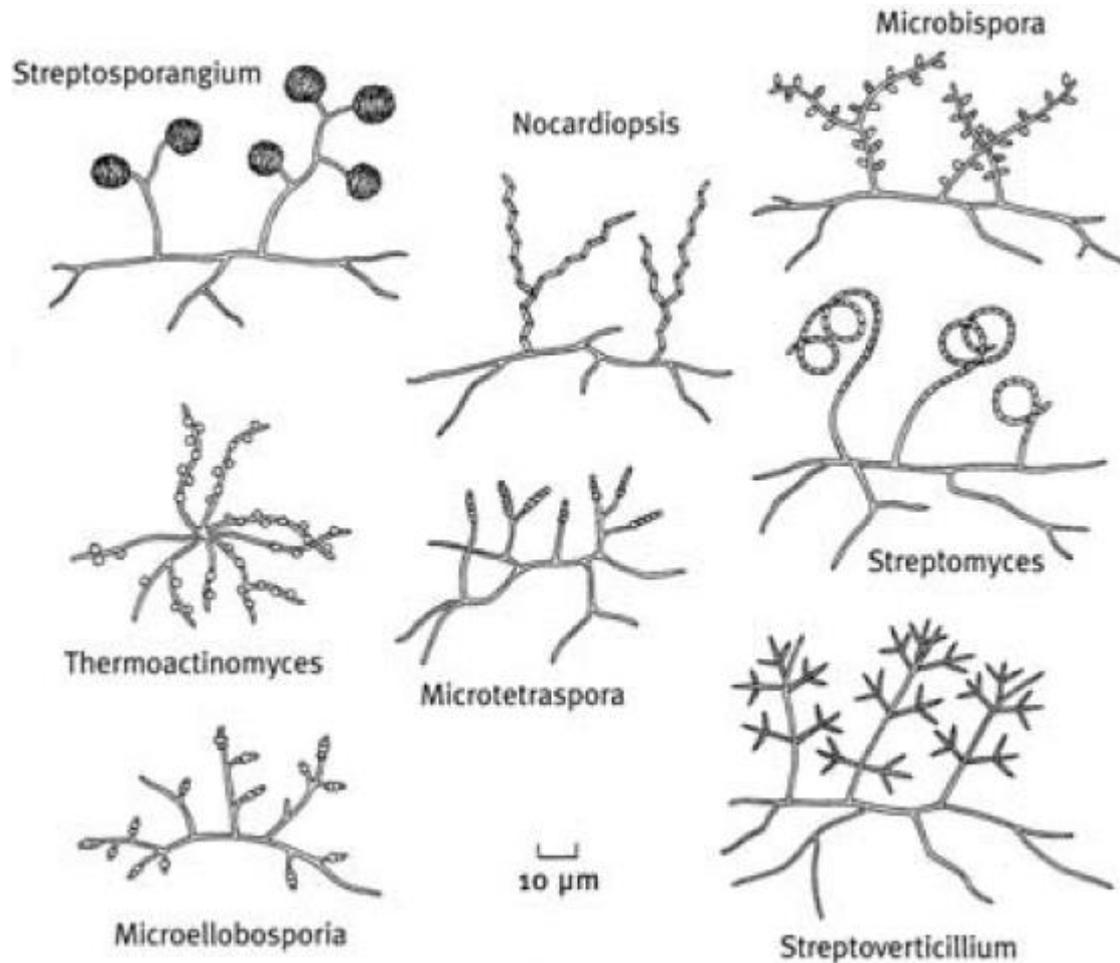


Reproduction par spores (conidies)



Les actinomycètes sont des bactéries!

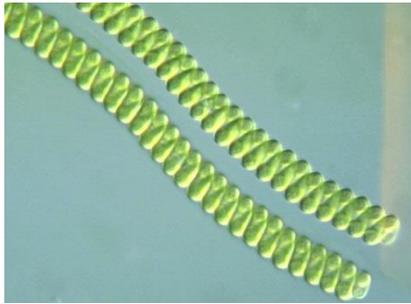
9



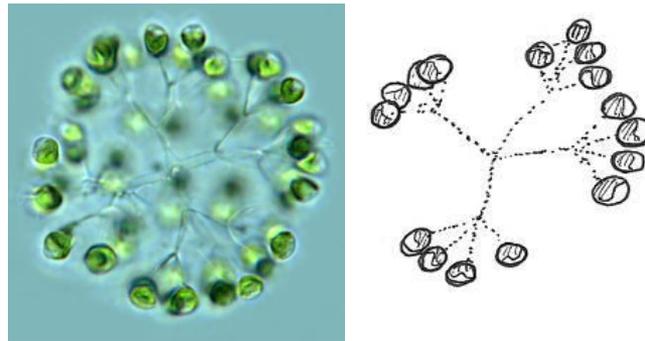
Aperçu: microalgues du sol (1-30 μm)

10

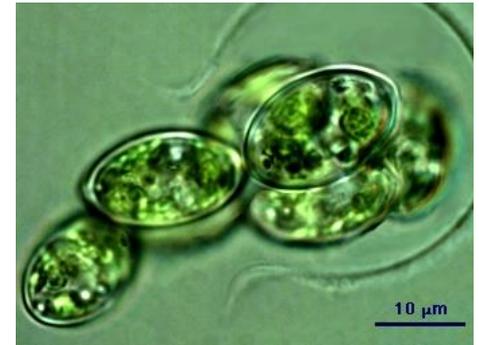
Spiruline



Dictyosphaerium



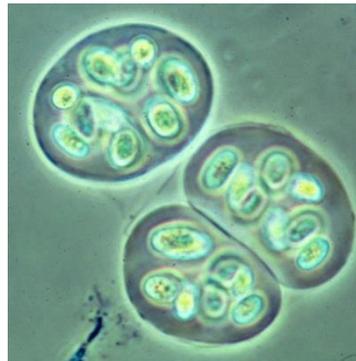
Oocystis



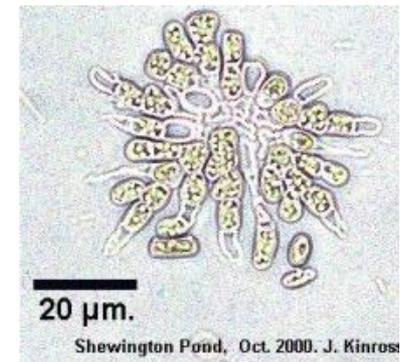
Palmella



Gleocapsa



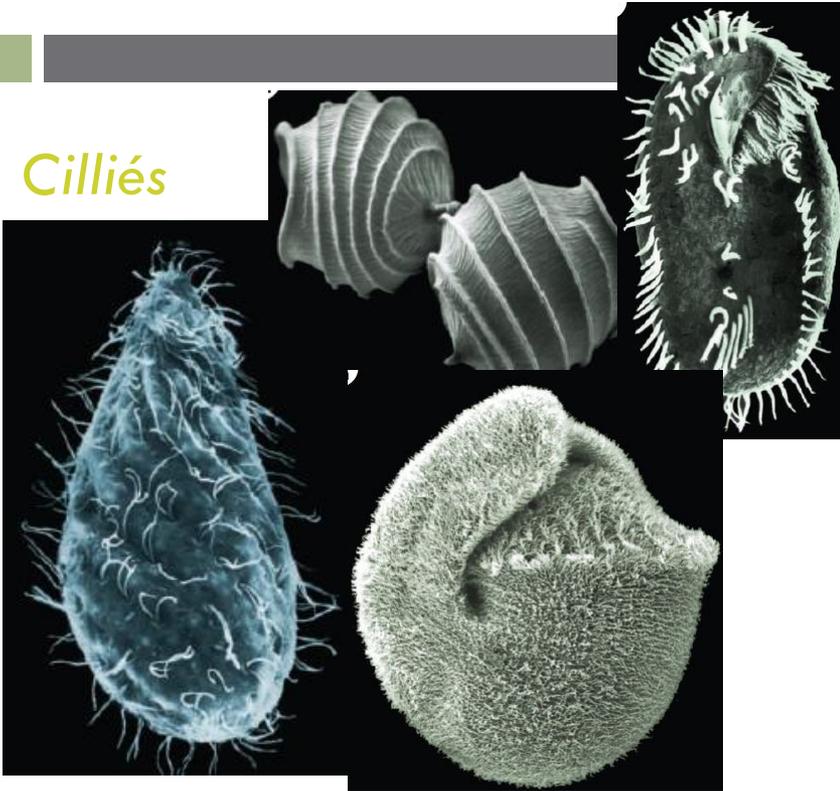
Protoderma



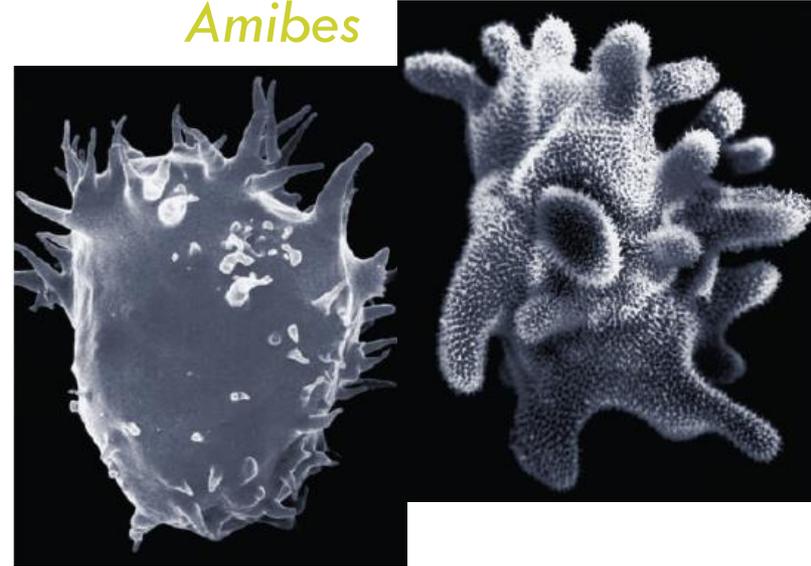
Aperçu: protozoaires (10-50 μm)

11

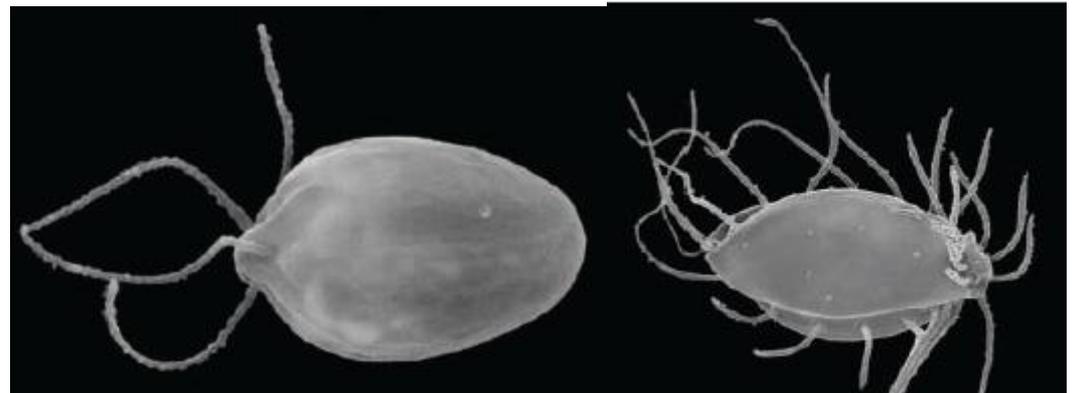
Cilliés



Amibes



Flagellés



Aperçu: nématodes (long.=80µm-8m!)

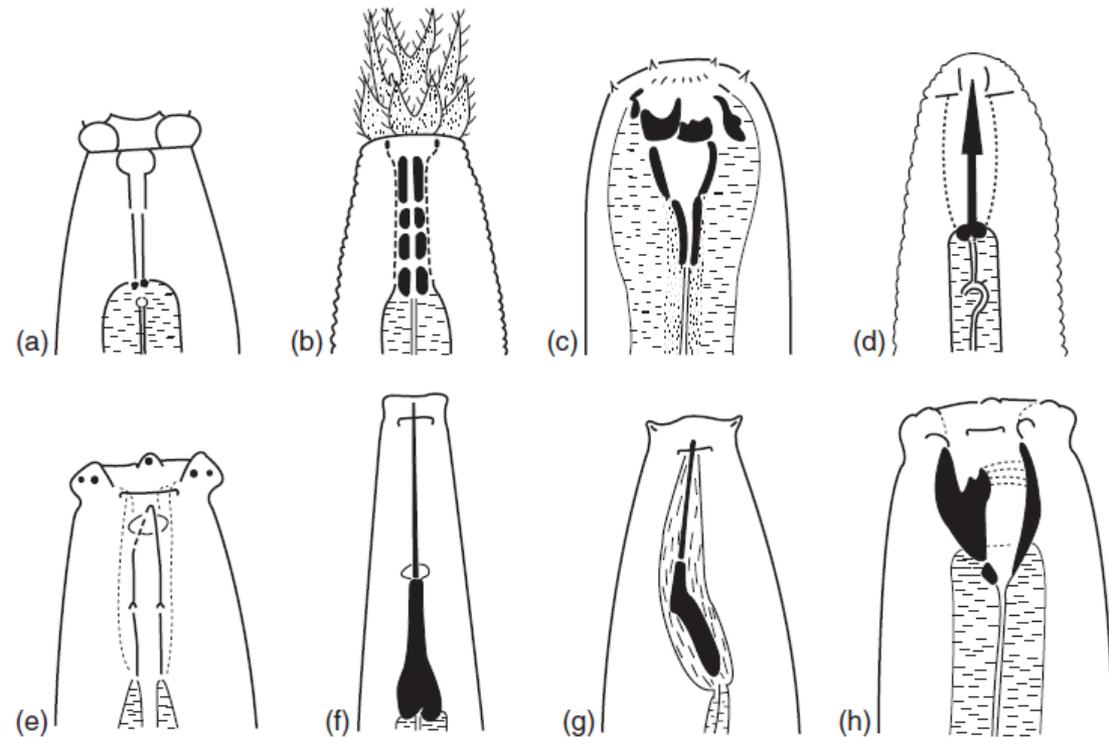
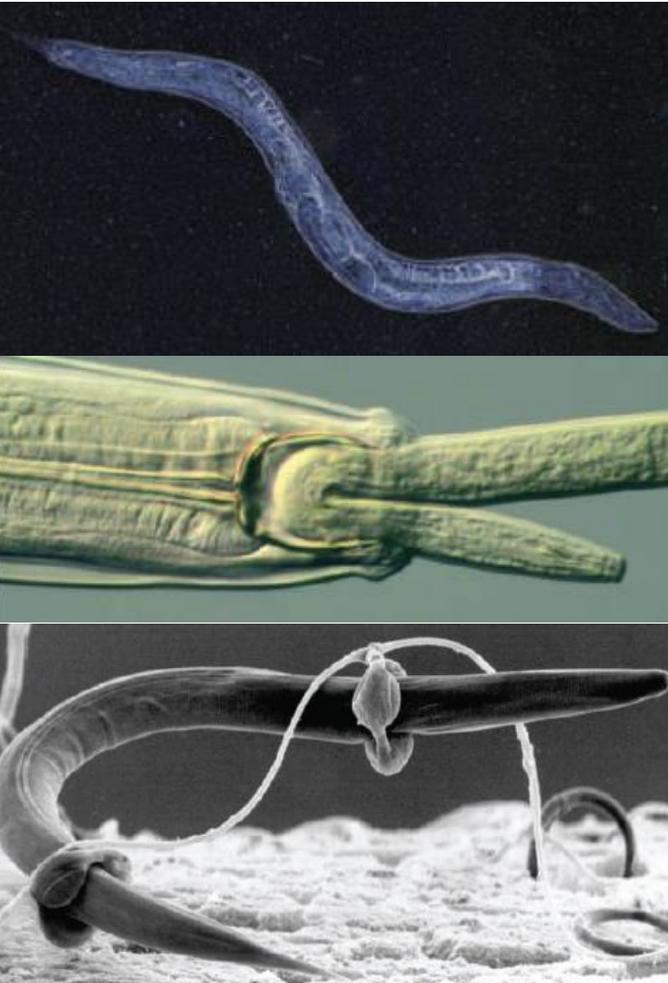


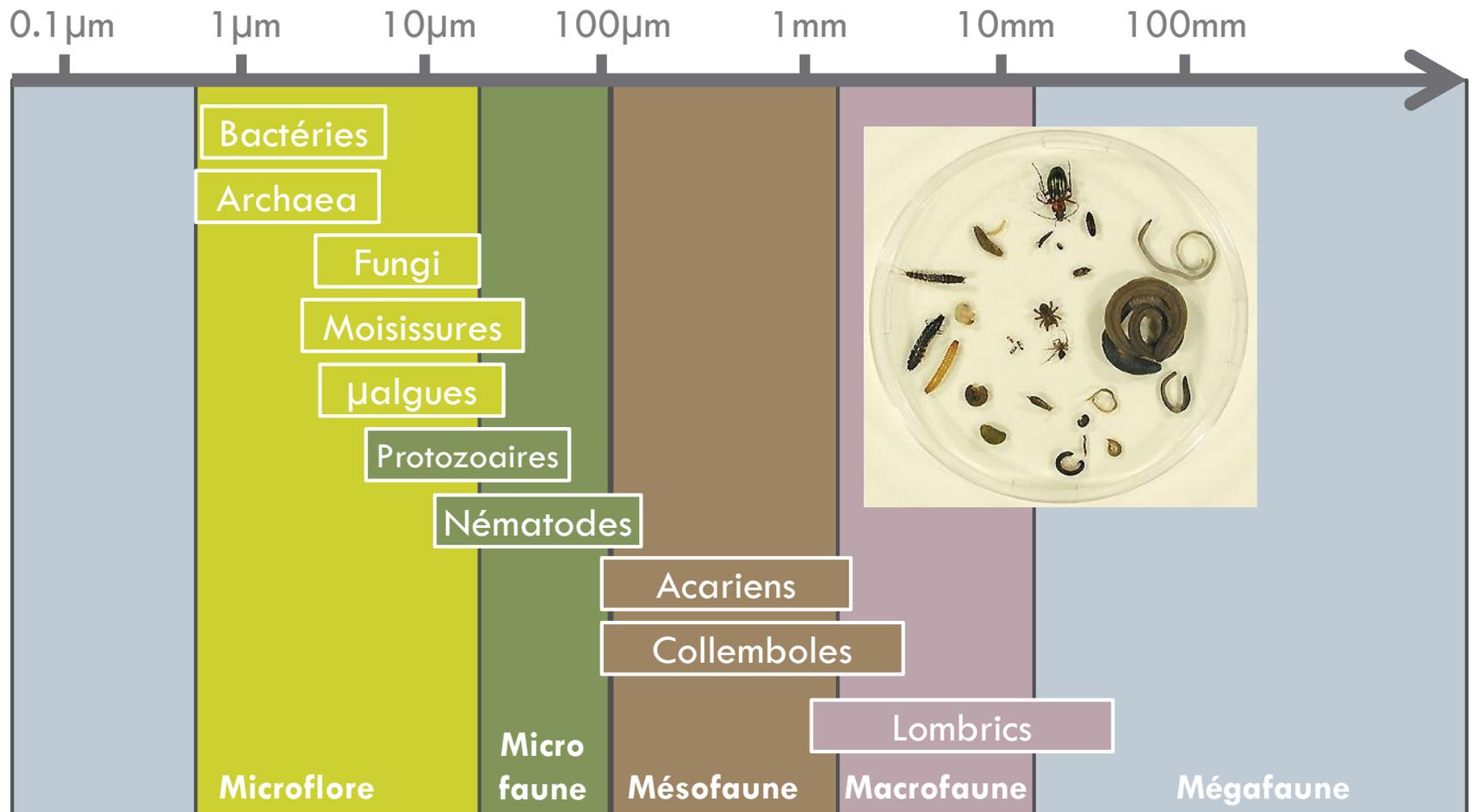
FIGURE 7.5 Head structures of a range of soil nematodes. (a) *Rhabditis* (bacterial feeding); (b) *Acrobelles* (bacterial feeding); (c) *Diplogaster* (bacterial feeding, predator); (d) tylenchid (plant feeding, fungal feeding, predator); (e) *Dorylaimus* (feeding poorly known, omnivore); (f) *Xiphinema* (plant feeding); (g) *Trichodorus* (plant feeding); (h) *Mononchus* (predator) (from Yeates and Coleman, 1982).

S. Jeffery, C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke and W. H. van der Putten (eds.), 2010, European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Introduction: microbiologie

13

□ Microorganismes



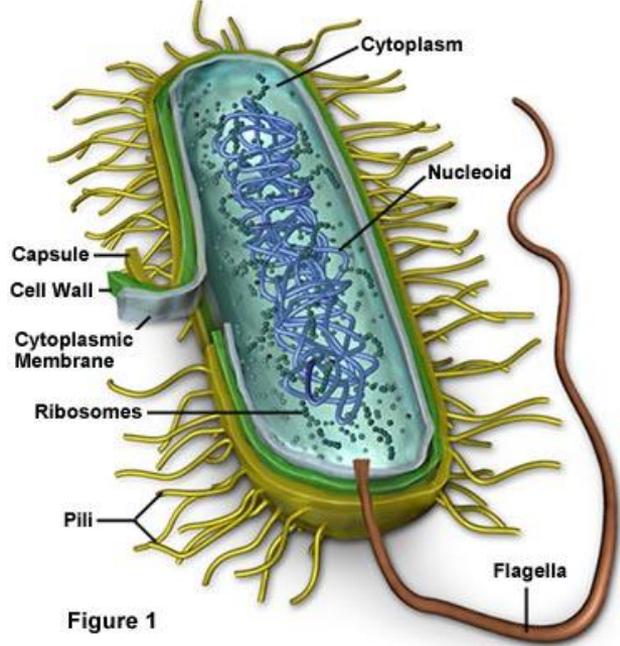
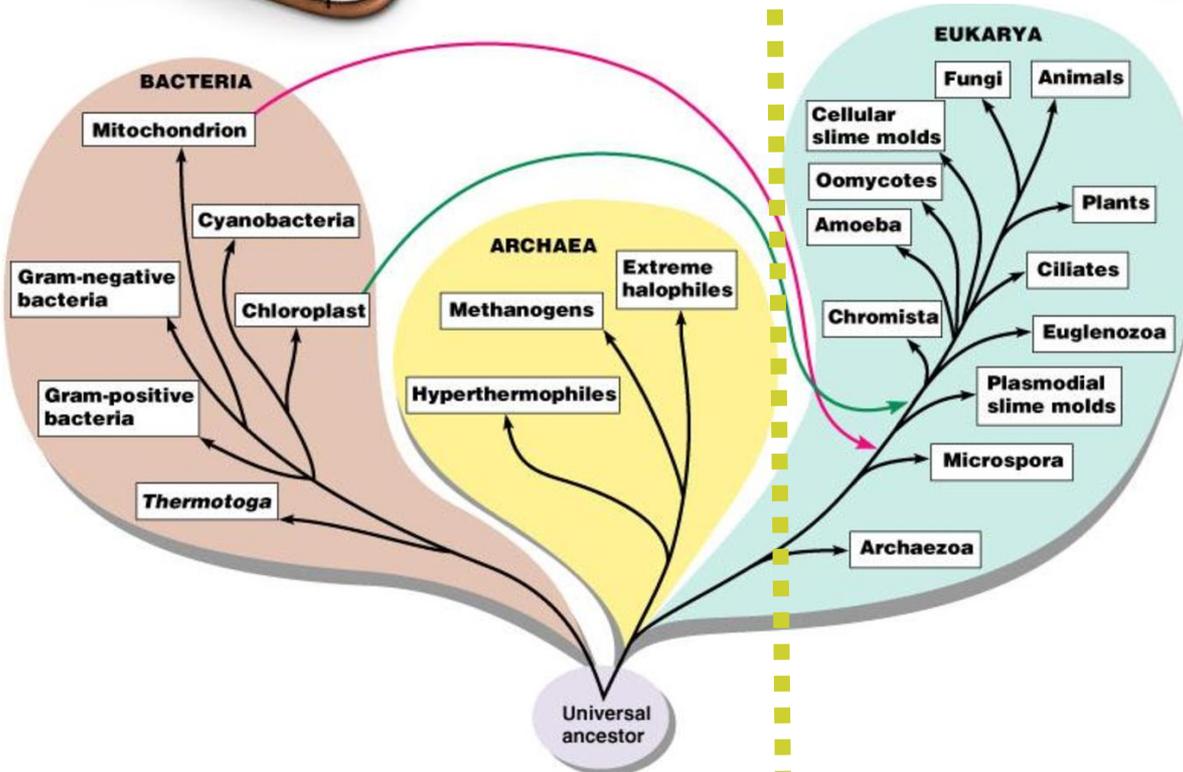
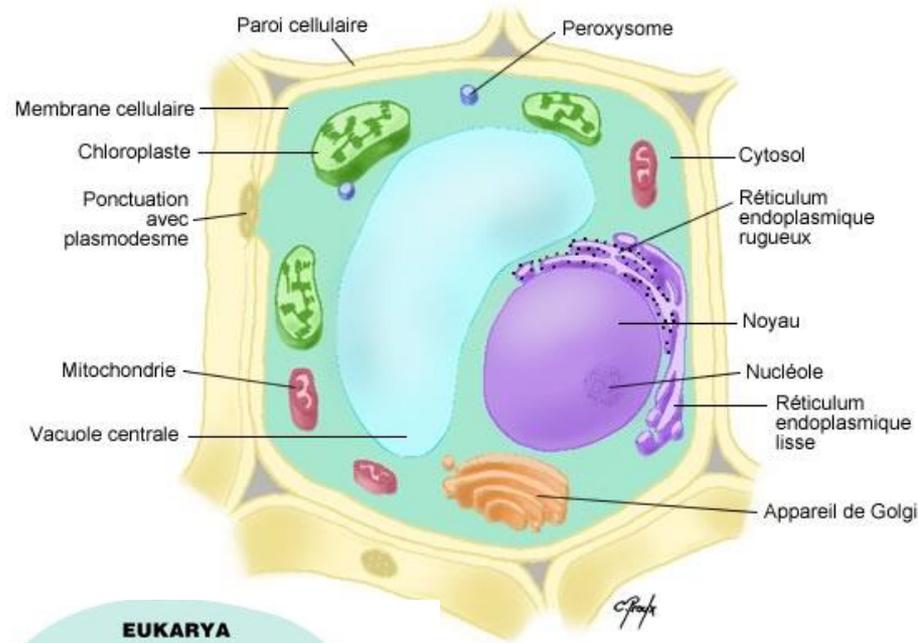


Figure 1

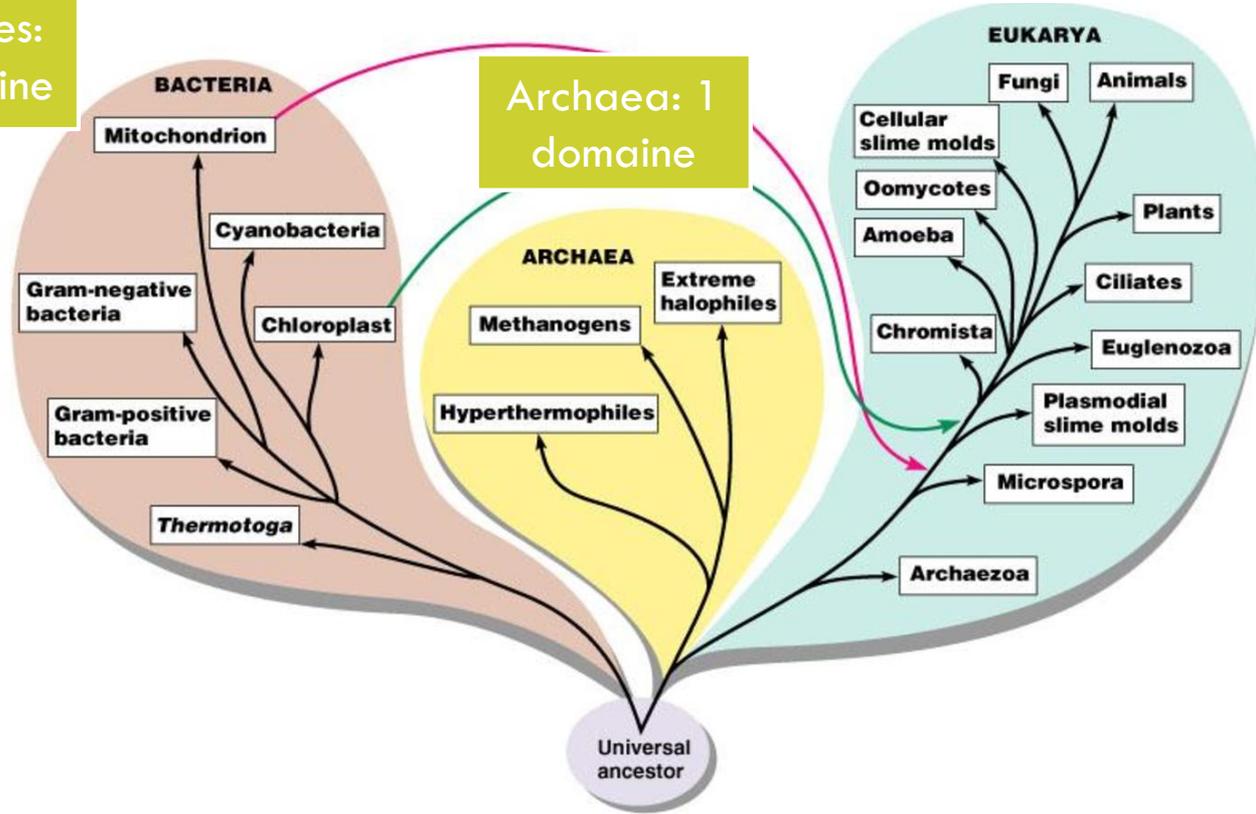


Les microorganismes du sol

15

□ Phylogénie des microorganismes du sol

Bactéries:
1 domaine



Fungi: 1 groupe
monophylétique

Moisissures:
groupe
polyphylétique

Microalgues:
groupe
polyphylétique

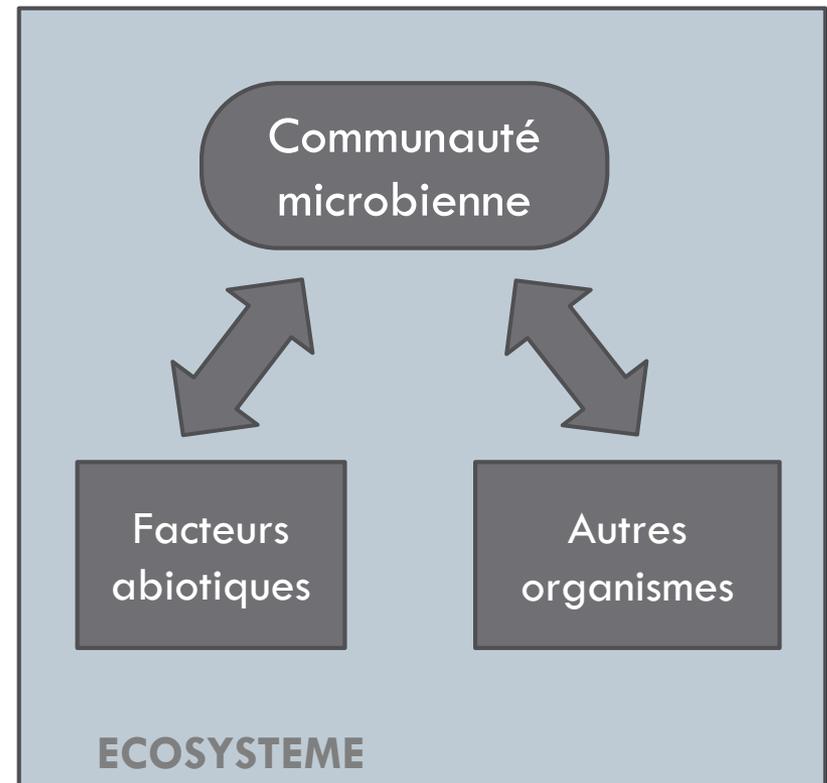
Microbiologie et écologie microbienne

16

Microbiologie

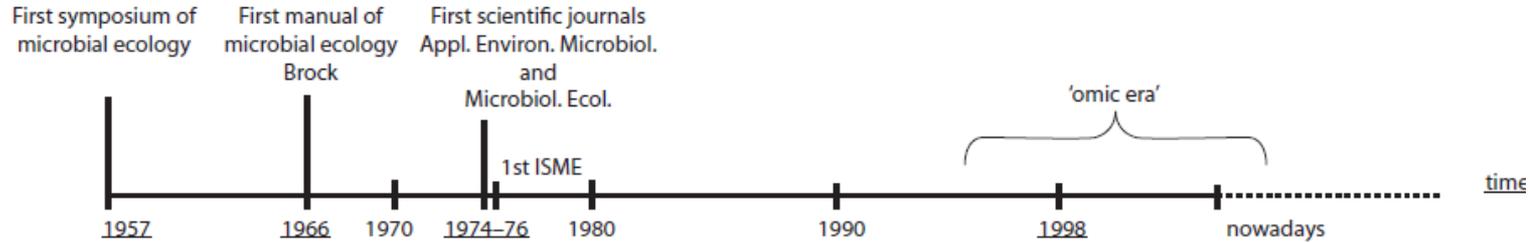
Microorganisme

Ecologie microbienne



Les ères de l'écologie microbienne

17



Integration level of studies in microbial ecology:

Individual level
(monoxenic culture)

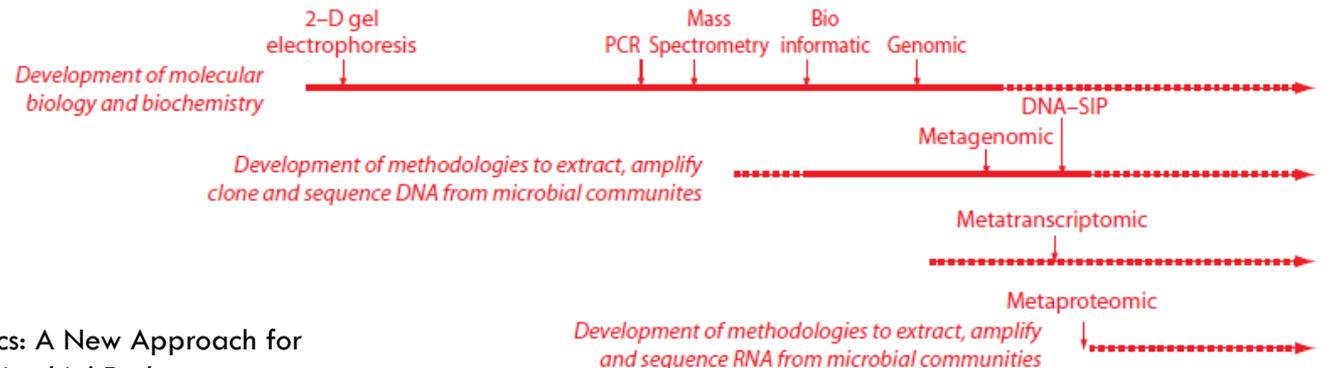
Population level

Community level

Link between genetic and functional diversity

Methodological developments:

Development of culture media for isolating microbial organisms



Abondance des microorganismes dans le sol

18

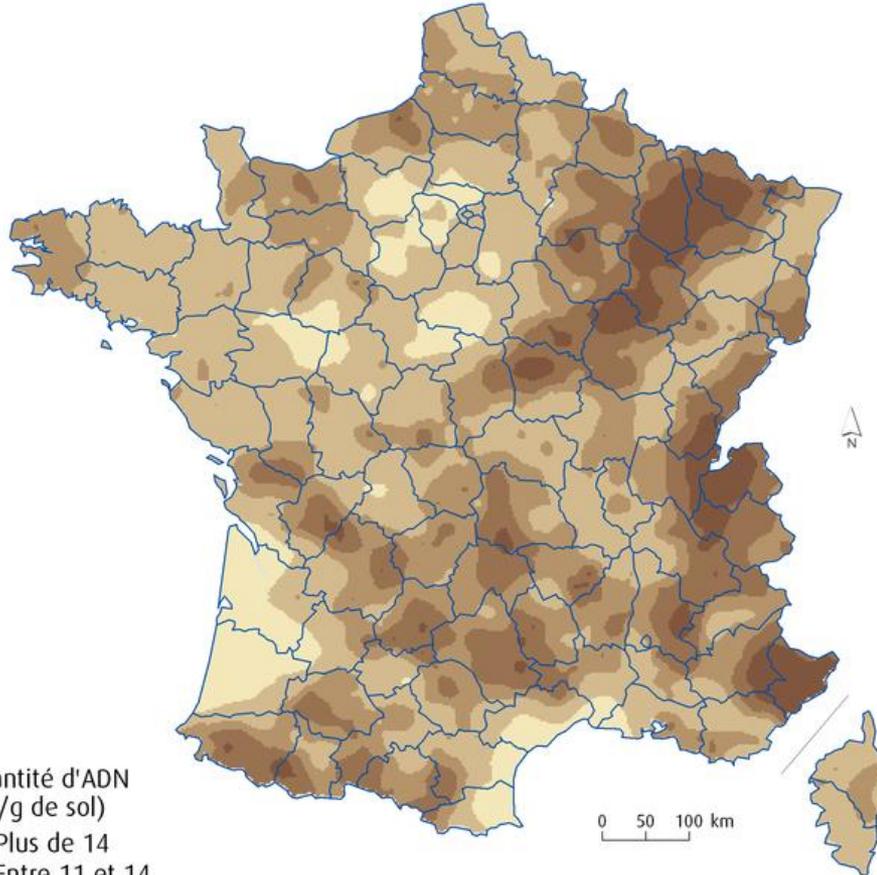


- 1 gramme de sol contient:
- 10^9 bactéries (qq μg_{ADN})
 - Plusieurs km d'hyphes

Abondance des microorganismes dans le sol

19

La biomasse microbienne des sols

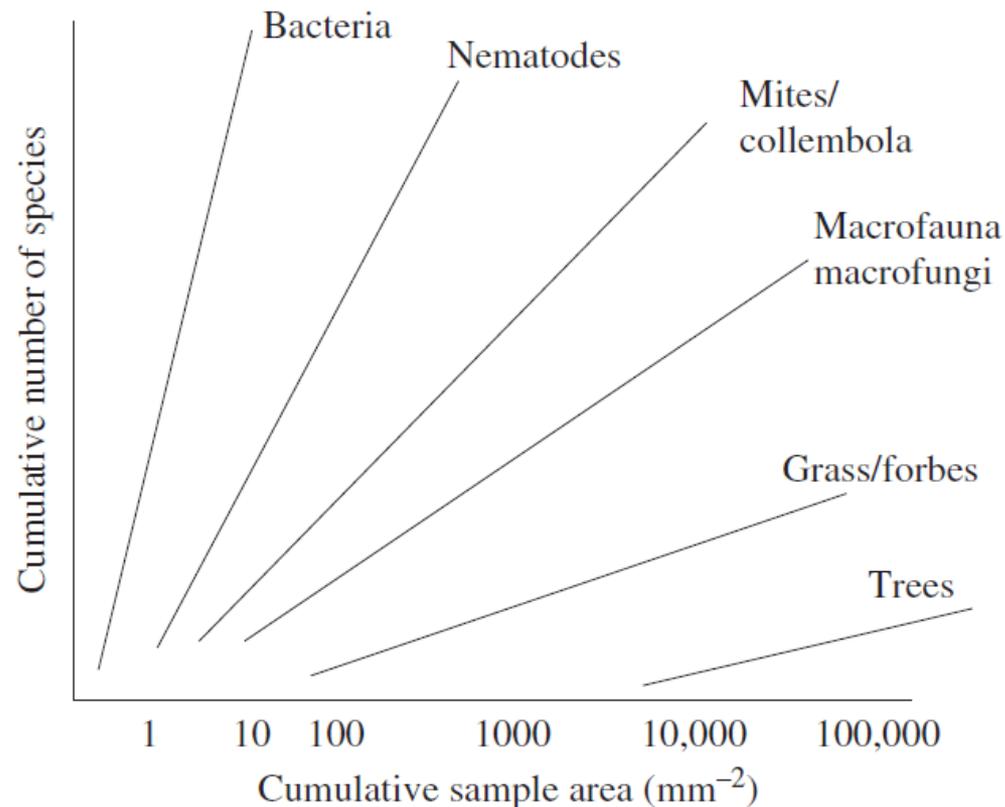


Occupation du sol	Concentration moyenne en ADN microbien (µg/g de sol)
Prairie	12
Forêt	10
Cultures	9
Autres (milieux naturels, parcs urbains)	8
Vignes et vergers	6

Texture des sols, teneur en carbone organique et en azote, pH, occupation et usage du sol

Diversité structurelle

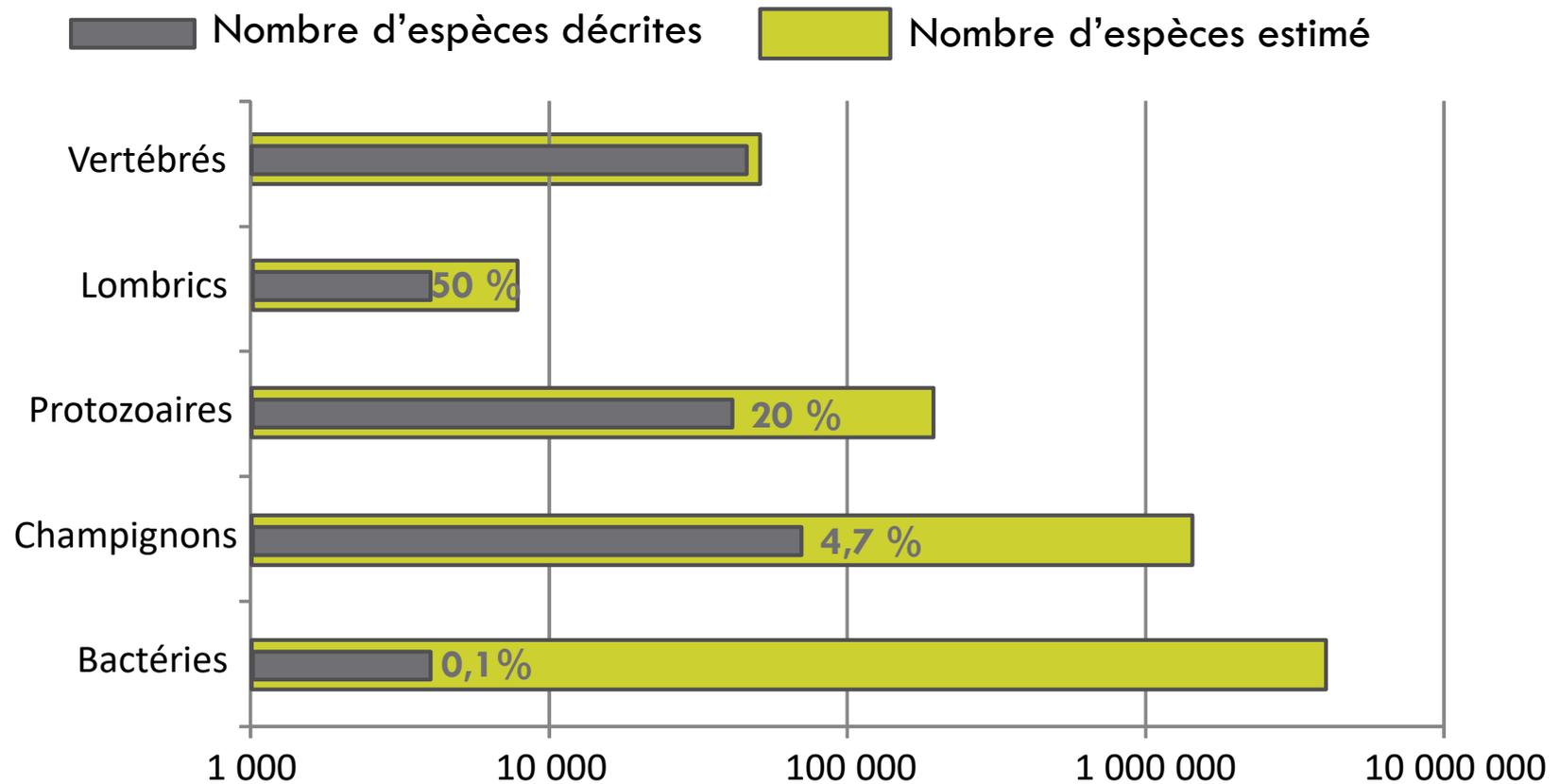
20



Hypothetical species/sample size relationships for soil organisms and vegetation cover affecting soil habitats. (Adapted from Bardgett et al. 2005)

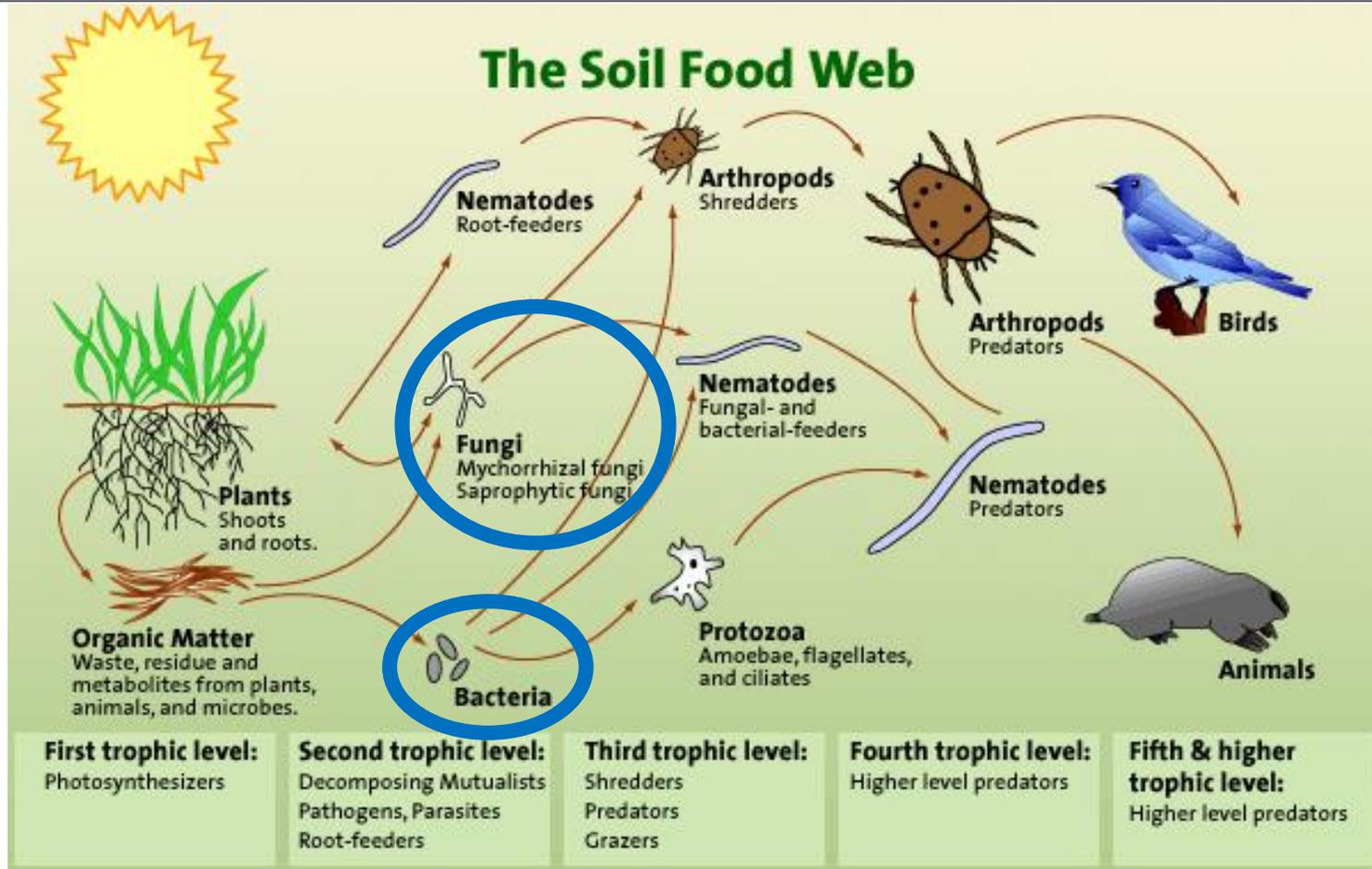
Une diversité inexplorée!!!

21



Rôles dans l'écosystème

22



Bactéries et champignons, en tant qu'acteurs majeurs de la décomposition, sont à la base de la chaîne trophique des sols.

Diversité fonctionnelle

Table 3.2. Essential ecosystem services provided by soil biota (modified from Bunning and Jiménez, 2003)

Ecosystem services	Examples of Soil biota groups providing the service
Decomposition and cycling of organic matter	Bacteria, fungi and actinomycetes (primary decomposers). Meso- and macrofauna such as various saprophytic and litter feeding invertebrates (detritivores) including earthworms (e.g. <i>Lumbricus rubellus</i> , <i>Lumbricus terrestris</i> , <i>Eisenia fetida</i> , <i>Allolobophorida andrei</i>), ants, (<i>Formicidae</i> sp.), Collembola (<i>Folsomia candida</i> , <i>Protaphorura fiata</i> , <i>Proisotomoa minuta</i>) and mites (<i>Acari</i>)
Regulation of nutrients availability and uptake	Mostly microorganisms like mycorrhizae, actinomycetes, nitrogen fixing bacteria (<i>Rhizobia</i> sp., <i>Azotobacter</i> sp., <i>Frankia</i> , <i>Klebsiella cyanobacteria</i>) and bacteria that mineralize nitrogen (<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrosospira</i> , <i>Nitrosococcus</i> , <i>Nitrosolobus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Nocardia</i> , <i>Nitrobacter</i> , <i>Nitrospina</i> , and <i>Nitrococcus</i>), some soil and litter feeding invertebrates such as ants and earthworms
Suppression of pests and diseases	Bacteria (e.g. <i>Pseudomonas chlororabhis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i>); fungi (e.g. <i>Beauveria bassiana</i> , <i>Arthrobrtyx dactyloides</i> , <i>Trichoderma harzianum</i>), nematodes (e.g. <i>Steinernema carpocapse</i>), Collembola, earthworms and decomposers as well as predators (e.g. predatory mites, centipedes or beetles)
Maintenance of soil structure and regulation of soil hydrological processes	Bioturbation by invertebrates such as earthworms (e.g. <i>Lumbricus</i> sp.), ants (<i>Formicidae</i> sp.), termites (macrostructure) and plant roots, mycorrhizae and some other microorganisms (microstructure)
Gas exchanges and carbon sequestration	Mostly microorganisms and plant roots, some (organic) carbon protected in biogenic aggregates made by earthworms, ants or termites
Soil detoxification	Mostly bacteria (e.g. <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp.) or fungi (<i>Coniochaeta ligniaria</i>)
Plant growth control	Plant roots, rhizobia, mycorrhizae, actinomycetes, pathogens, phytoparasitic nematodes, rhizophagous insects, plant growth promoting rhizosphere microorganisms, biocontrol agents
Pollination of horticultural crops	Soil-nesting insects such as solitary bees (<i>Peponapis pruinosa</i>)

Plan du cours

Introduction: écologie microbienne & sol

I. Le cycle du C

II. Le cycle de N

III. Interactions microorganismes-plantes

Plan du cours

Introduction: écologie microbienne & sol

I. Le cycle du C

II. Le cycle de N

III. Interactions microorganismes-plantes

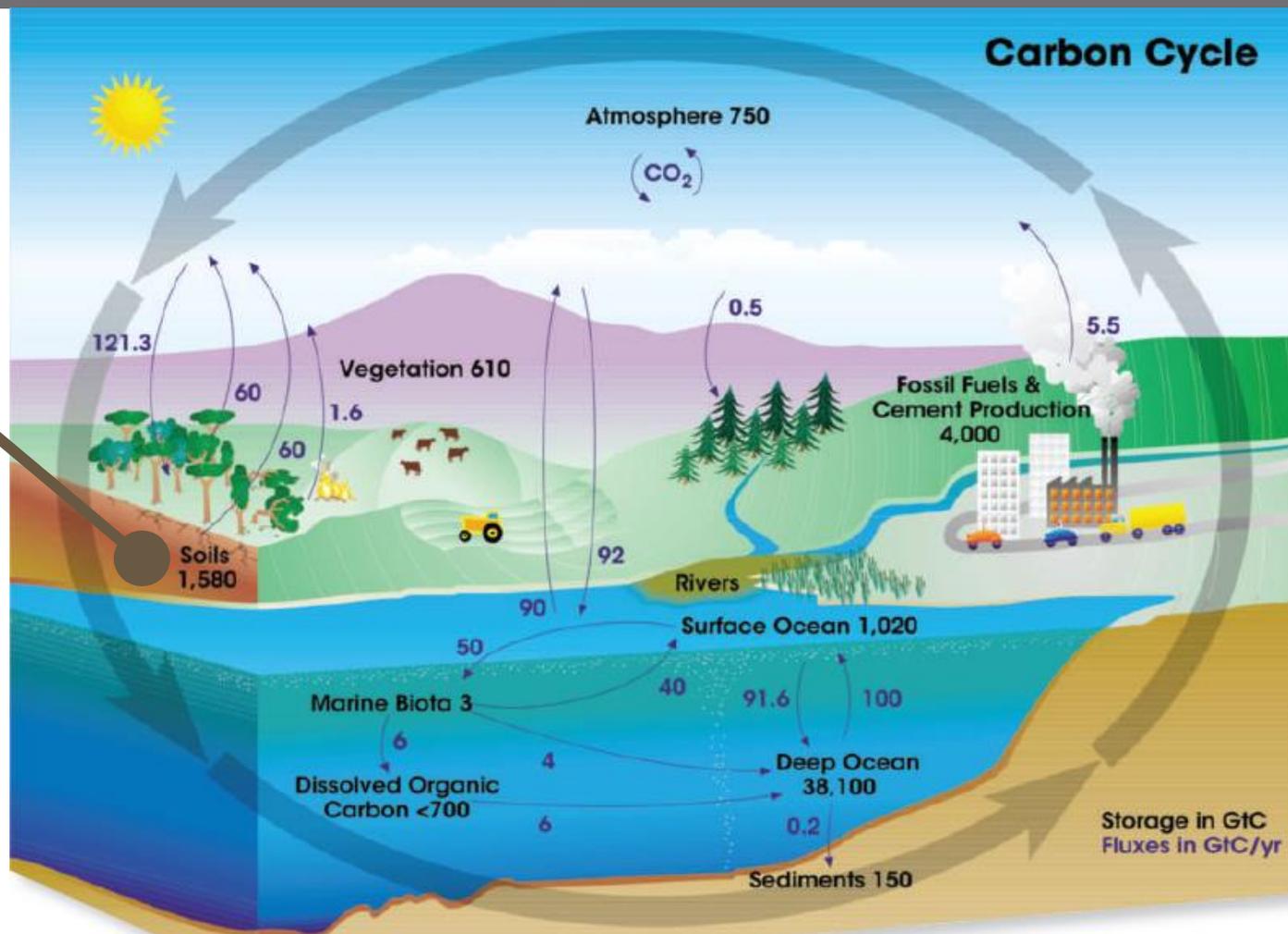
IV. Dépollution

Le cycle du C: vision globale

26

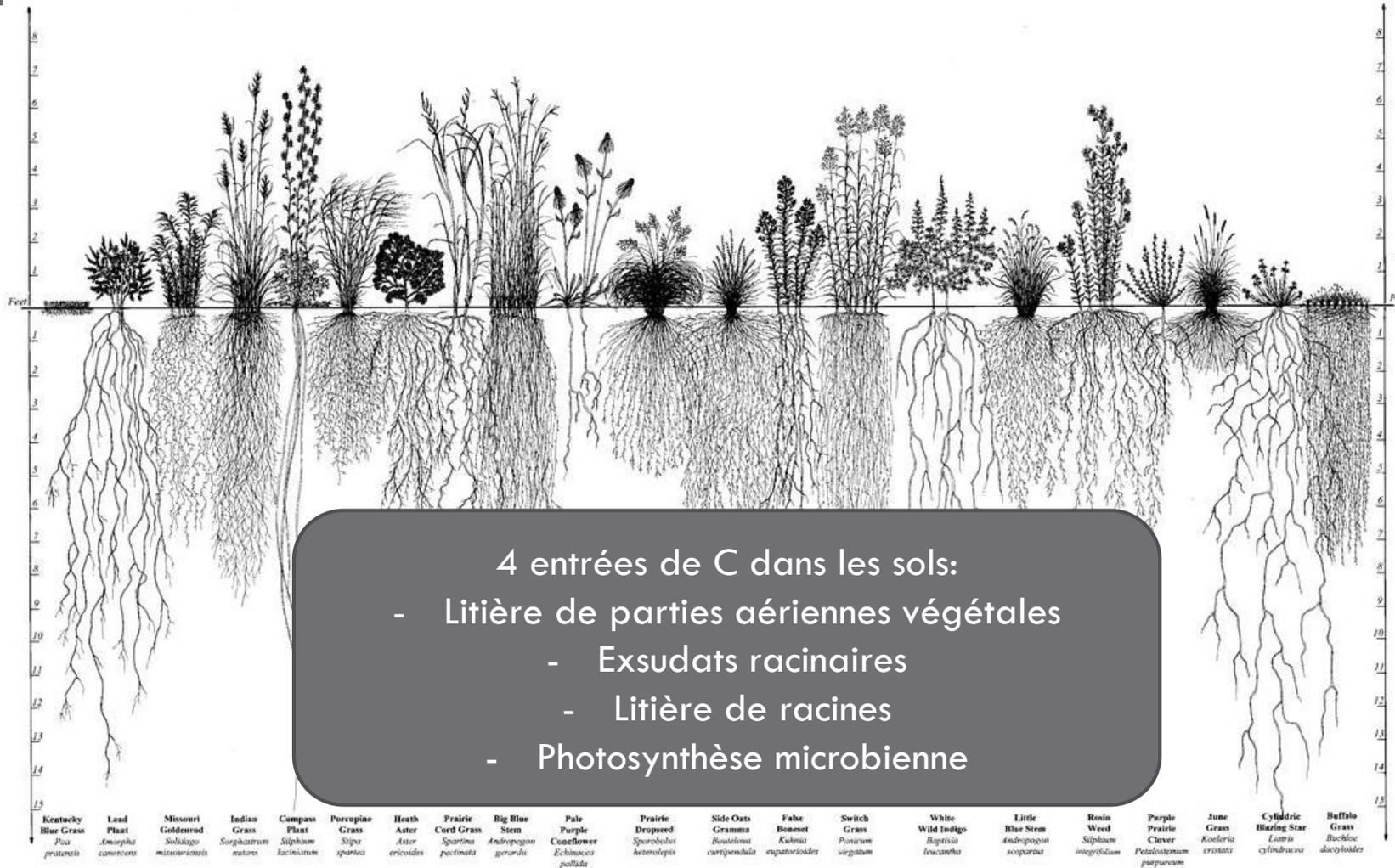
Le sol:

- Carrefour de flux
- Réservoir



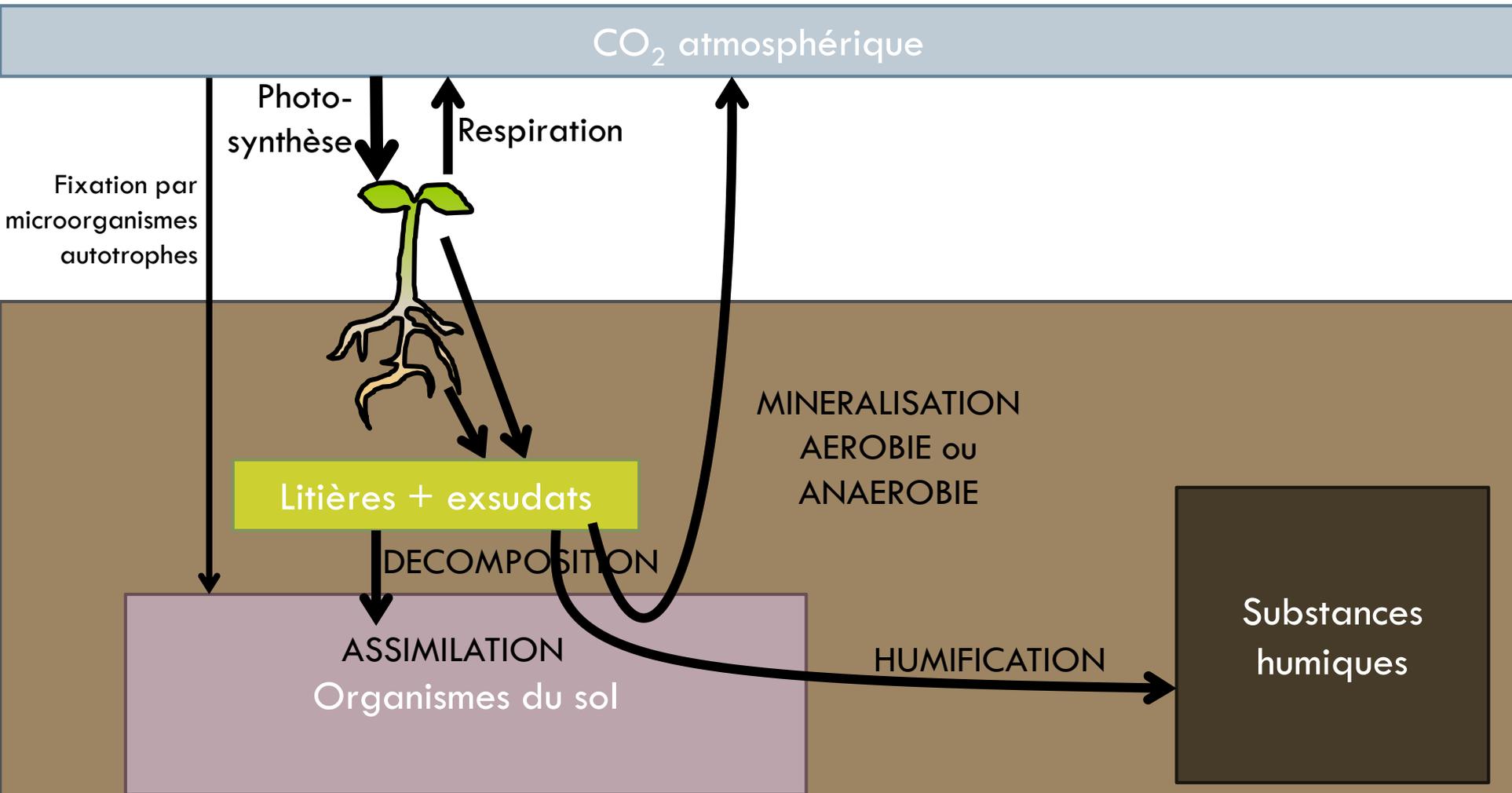
Cycle du C: zoom sur le sol

27



Cycle du C: zoom sur le sol

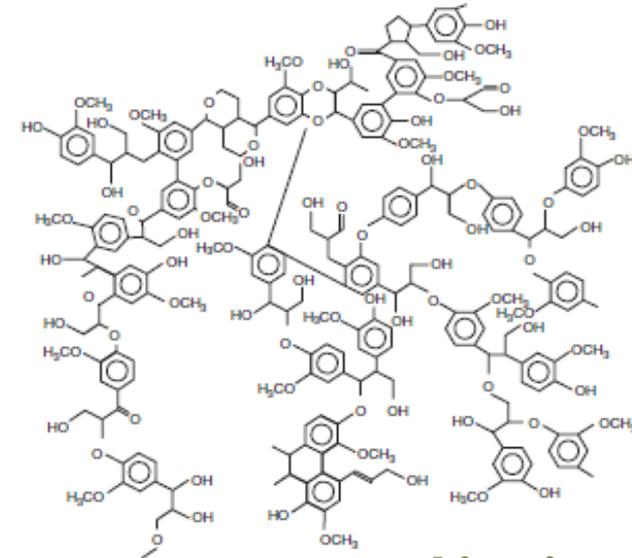
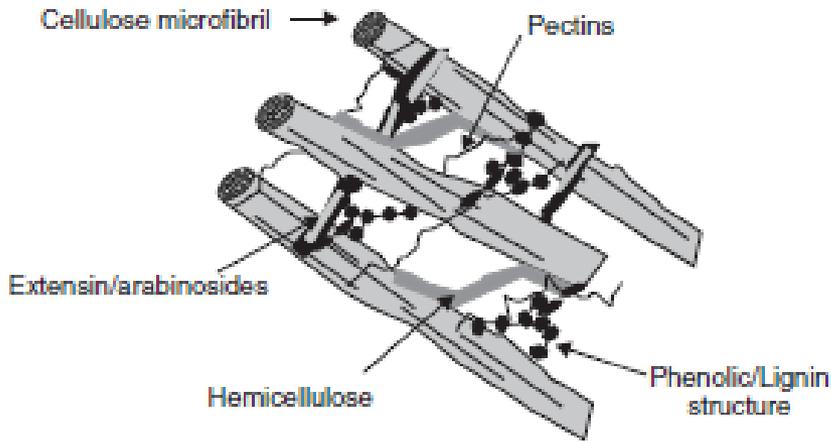
28



Cycle du C: MO entrant dans le sol

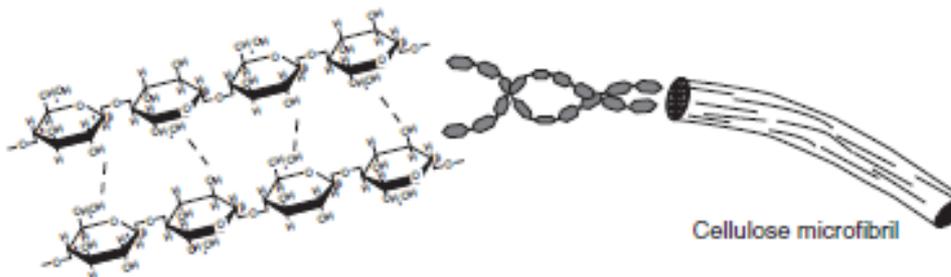
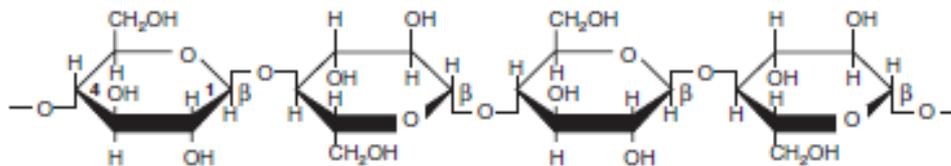
29

MO soluble
Hémi-cellulose
Cellulose
Lignine



Lignine

Cellulose

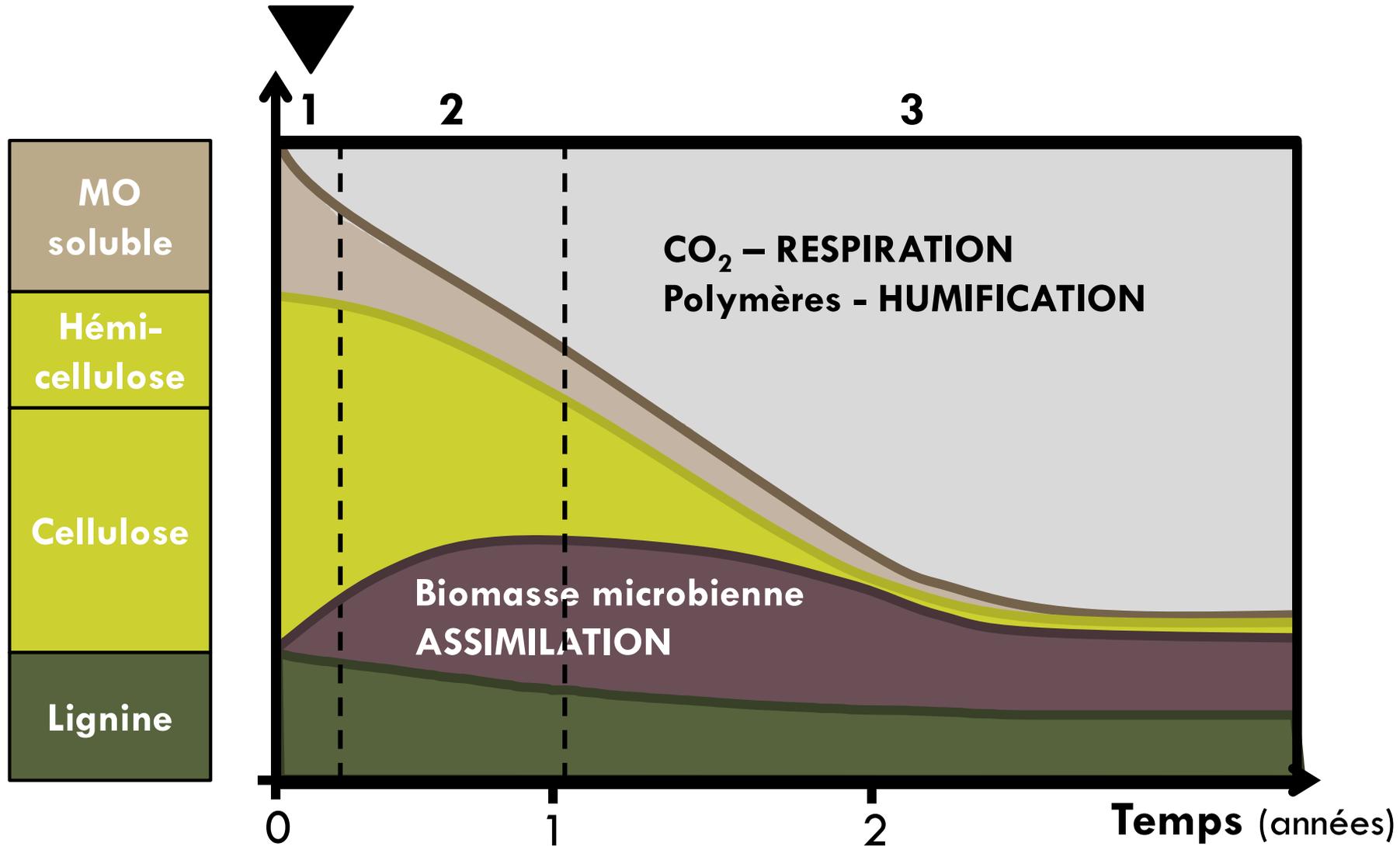


Hémicellulose:

Polymère branché de pentoses (xylose, mannose, galactose, rhamnose, arabinose)

Cycle du C: décomposition

30



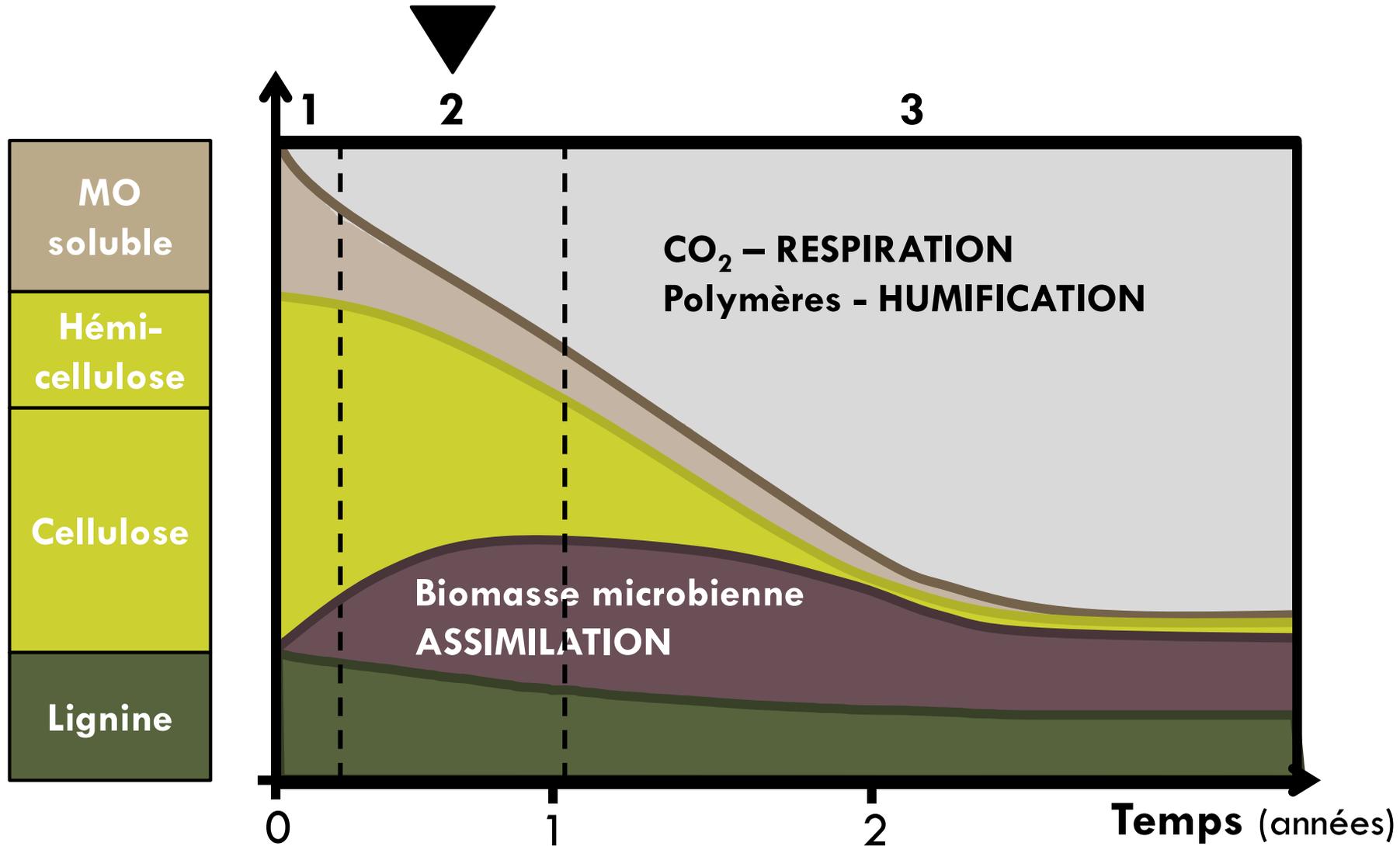
Cycle du C: décomposition

31

- Phase 1:
 - MO soluble, faible poids moléculaire, facilement dégradable
 - Croissance de microorganismes variés
 - Dégagement de CO₂

Cycle du C: décomposition

32

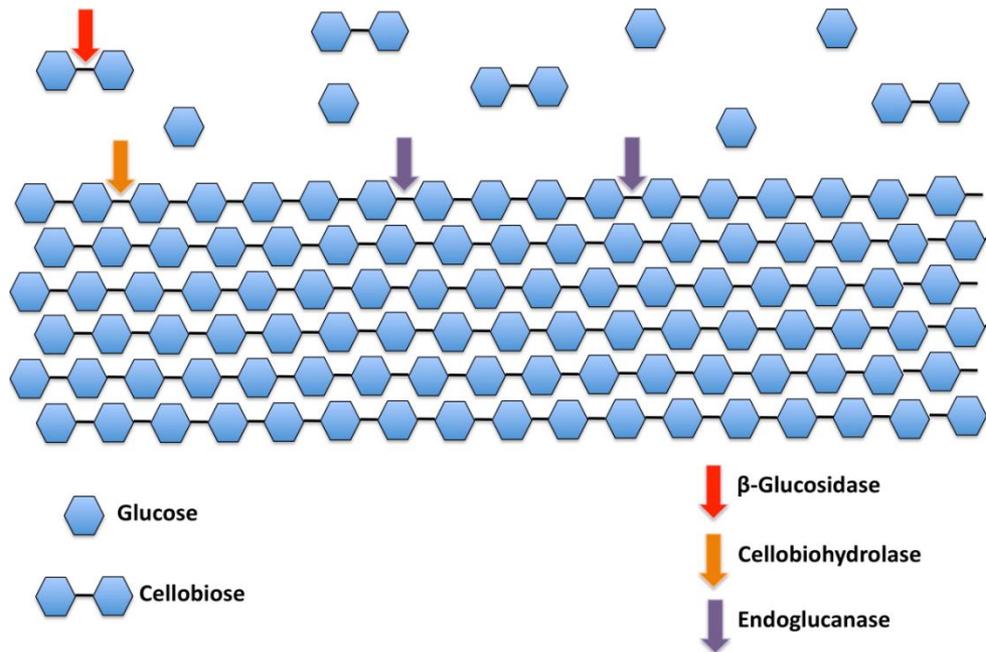


Cycle du C: décomposition

33

□ Phase 2:

- Dégradation cellulose/hémicellulose
- Excrétion d'enzymes extracellulaires par Fungi cellulolytiques et bactéries: *Bacillus*, *Cellulomonas*, *Pseudomonas*

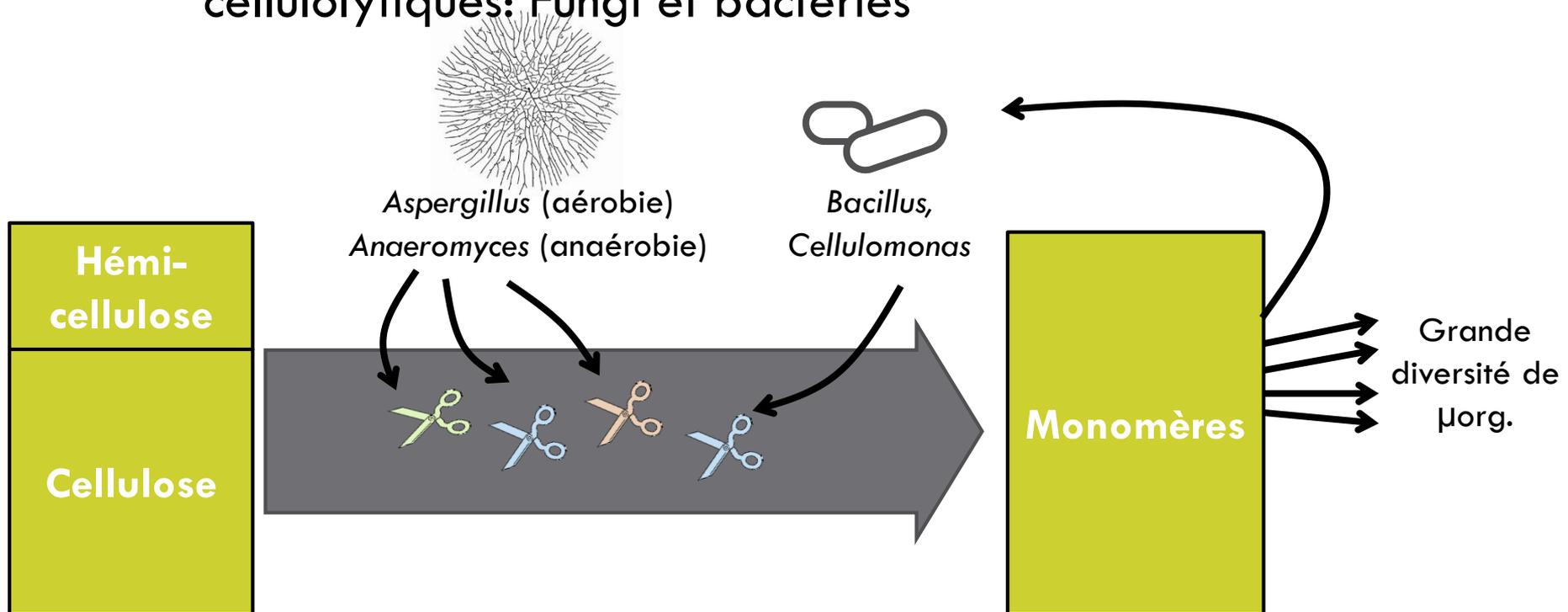


Cycle du C: décomposition

34

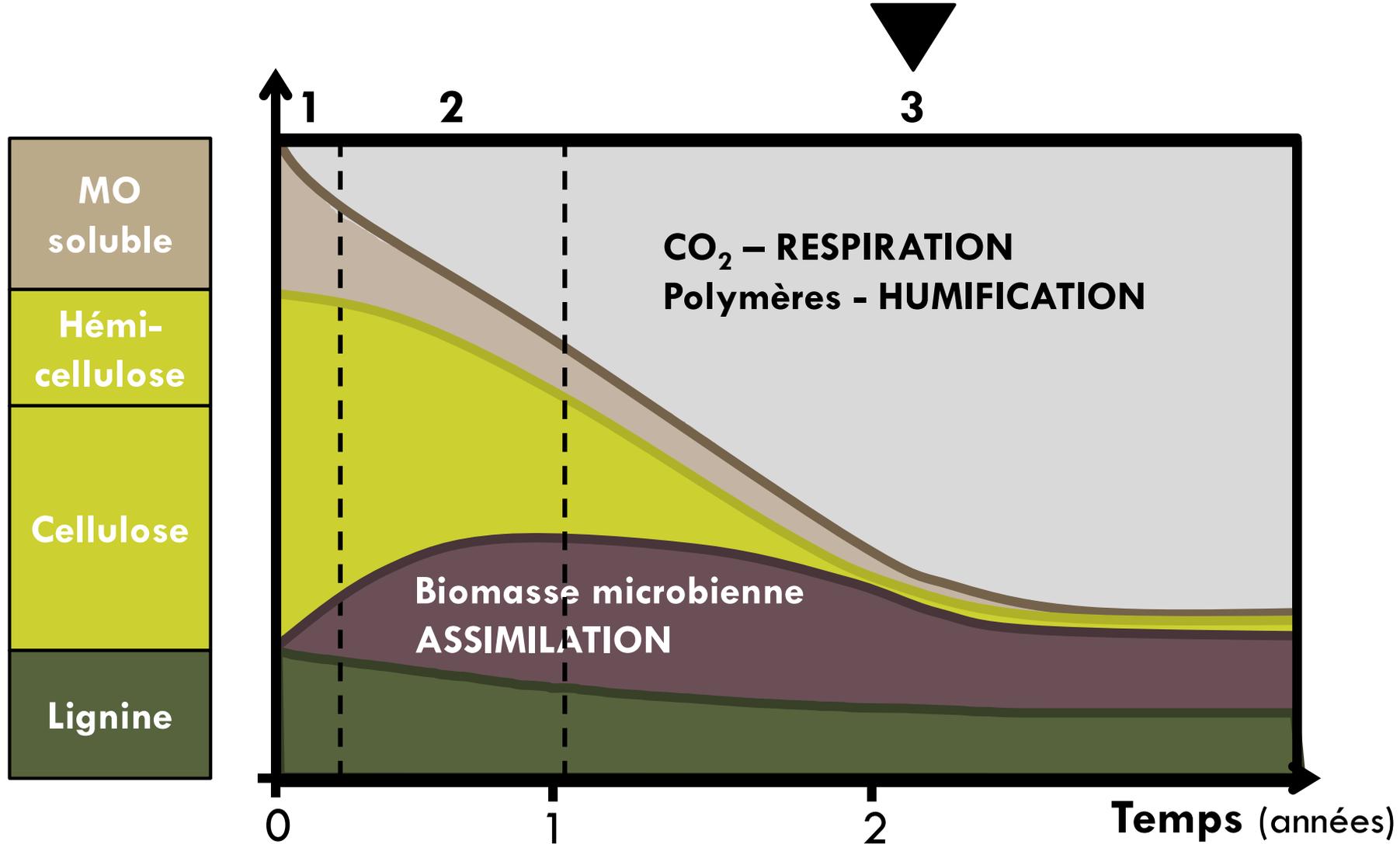
□ Phase 2:

- Dégradation cellulose/hémicellulose
- Excrétion d'enzymes extracellulaires par microorganismes cellulolytiques: Fungi et bactéries



Cycle du C: décomposition

35



Cycle du C: décomposition

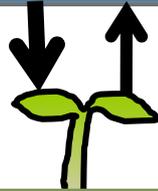
36

□ Phase 3:

- MO récalcitrante, hétérogène (lignine mais aussi cires, résines)
- Aérobie
- Lente
- Nécessité de sources de C complémentaires
- Champignons et actinomycètes lignolytiques excrètent des enzymes extracellulaires : polyphénoloxydase et peroxidase (Basidiomycètes, Ascomycètes)

Cycle du C: décomposition

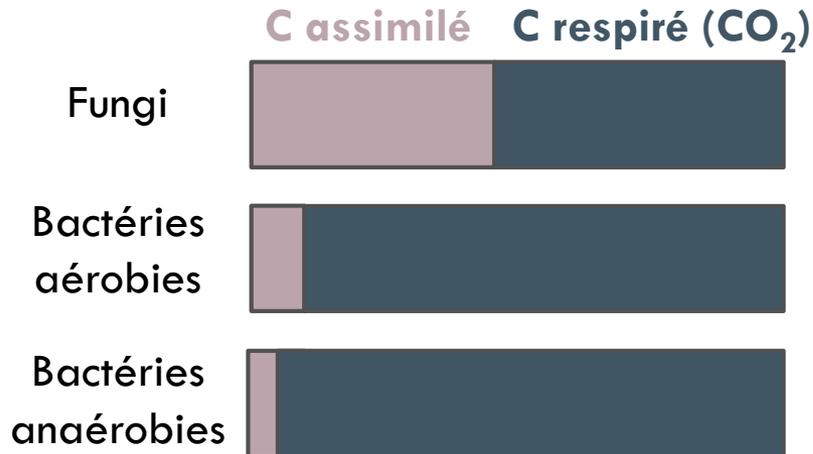
CO₂ atmosphérique



Litières + exsudats

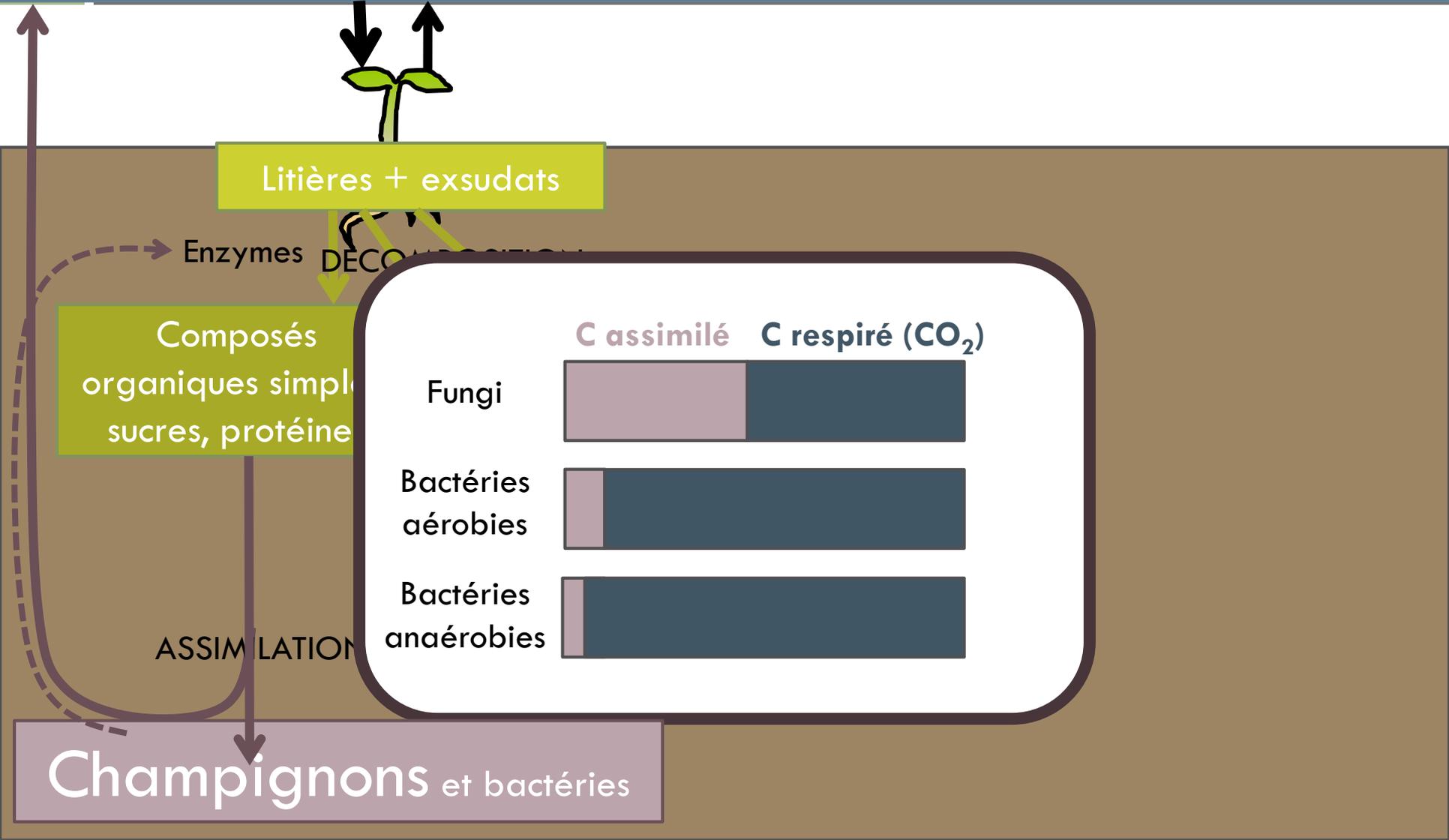
Enzymes DECOMPOSITION

Composés organiques simples
sucres, protéines

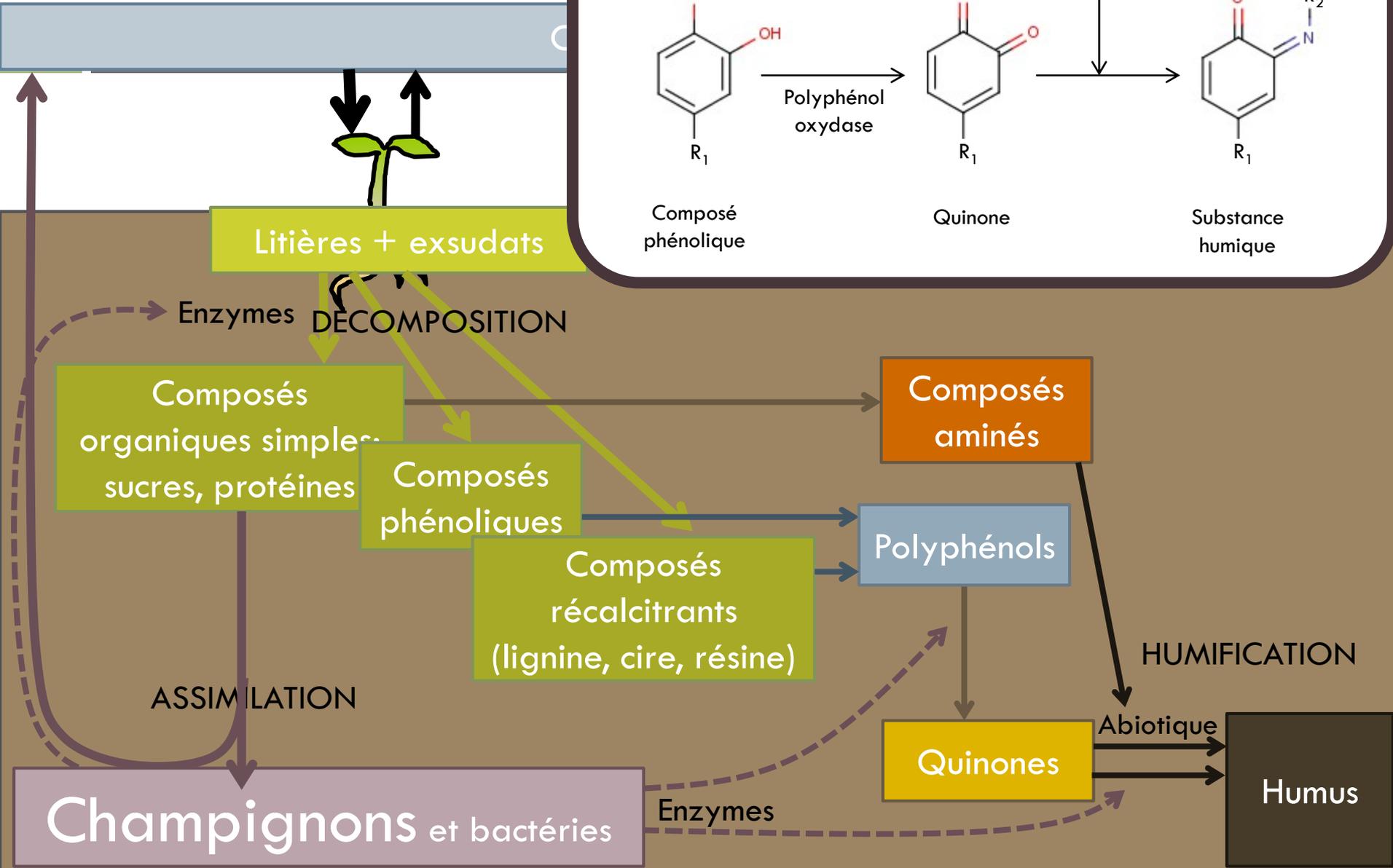
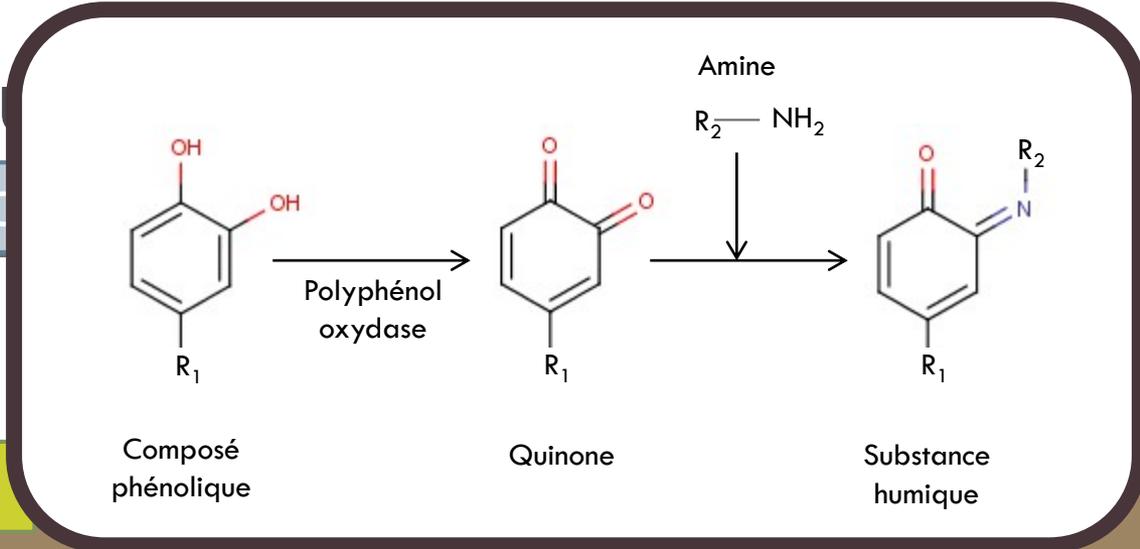


ASSIMILATION

Champignons et bactéries



Cycle du C: h



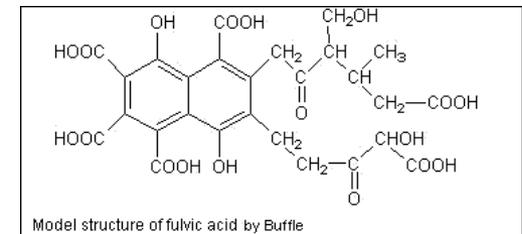
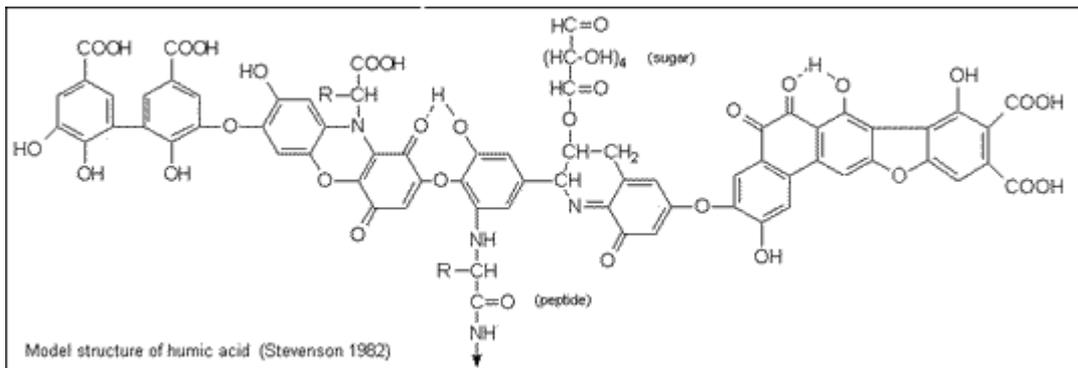
Substances humiques: définition

39

□ Substances humiques ~ composés humiques ~ humus, regroupent:

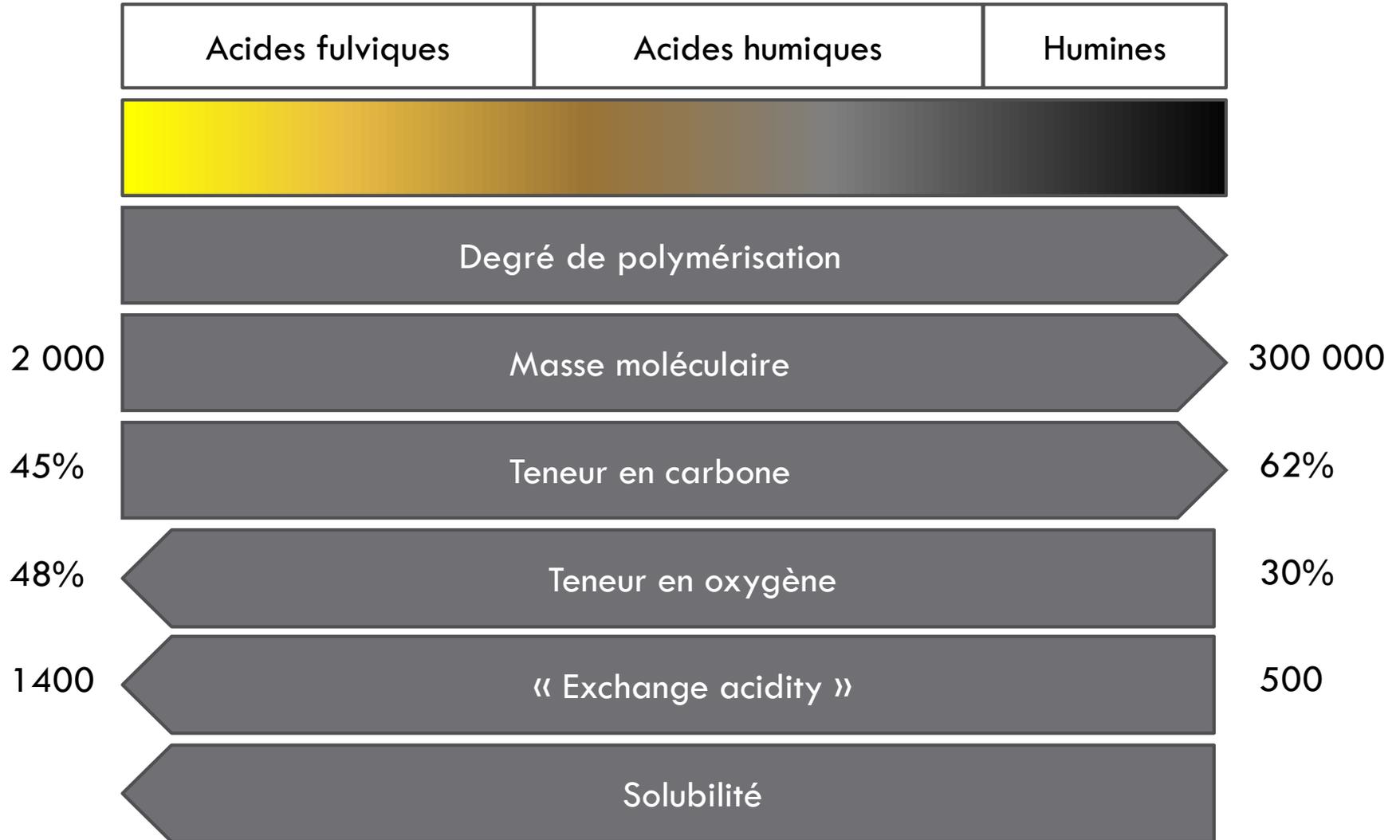
- ▣ Acides fulviques
- ▣ Acides humiques
- ▣ Humines

Noyaux condensés reliés par des chaînes aliphatiques et portant des groupes fonctionnels à caractère acide (-COOH, -OH)



Substances humiques: propriétés

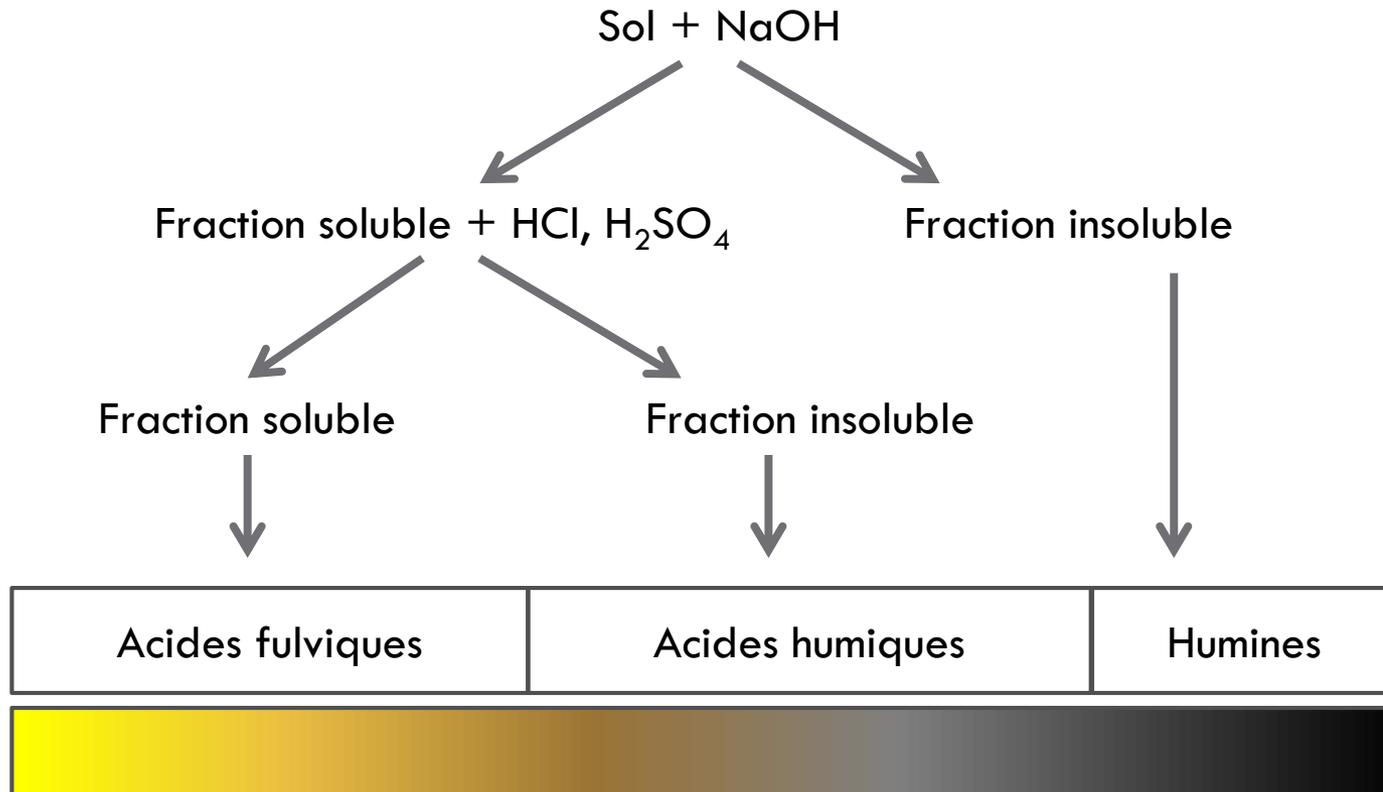
40



Substances humiques: fractionnement

41

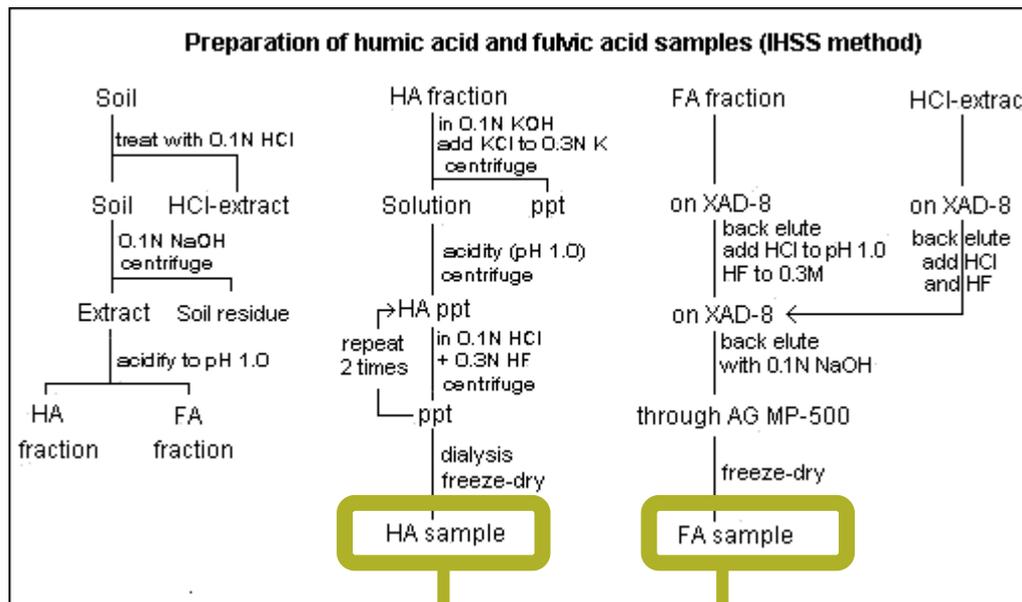
- Principe: différences de solubilité



Substances humiques: fractionnement

42

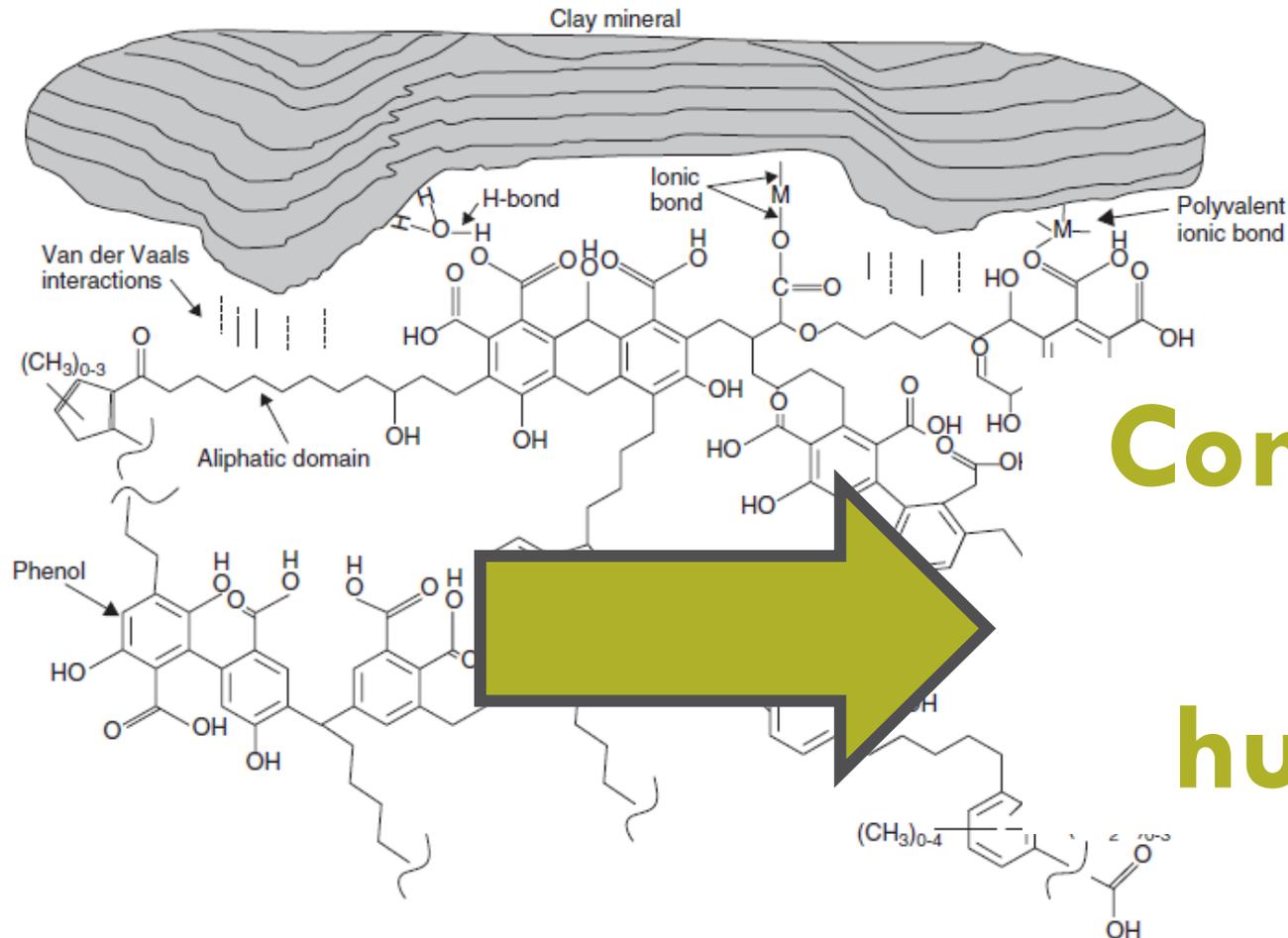
- Principe: différences de solubilité
- En détail: protocole International Humic Subst. Society



Standards: Elliott soil, Suwanee river, Pahokee peat

Interactions substances humiques - argiles

43



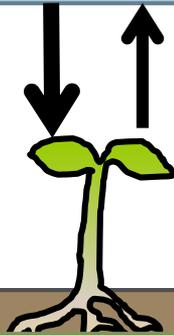
**Complexe
argilo-
humique**

FIGURE 12.17 Idealized structure of humic acid showing high aliphatic content (adapted from Schulten and Schnitzer, 1993) showing physicochemical interactions with a clay mineral. Organomineral interactions M denotes various cations, such as iron and calcium.

Cycle du C: synthèse

44

CO₂ atmosphérique



Litières + exsudats

DECOMPOSITION

ASSIMILATION

Champignons et bactéries

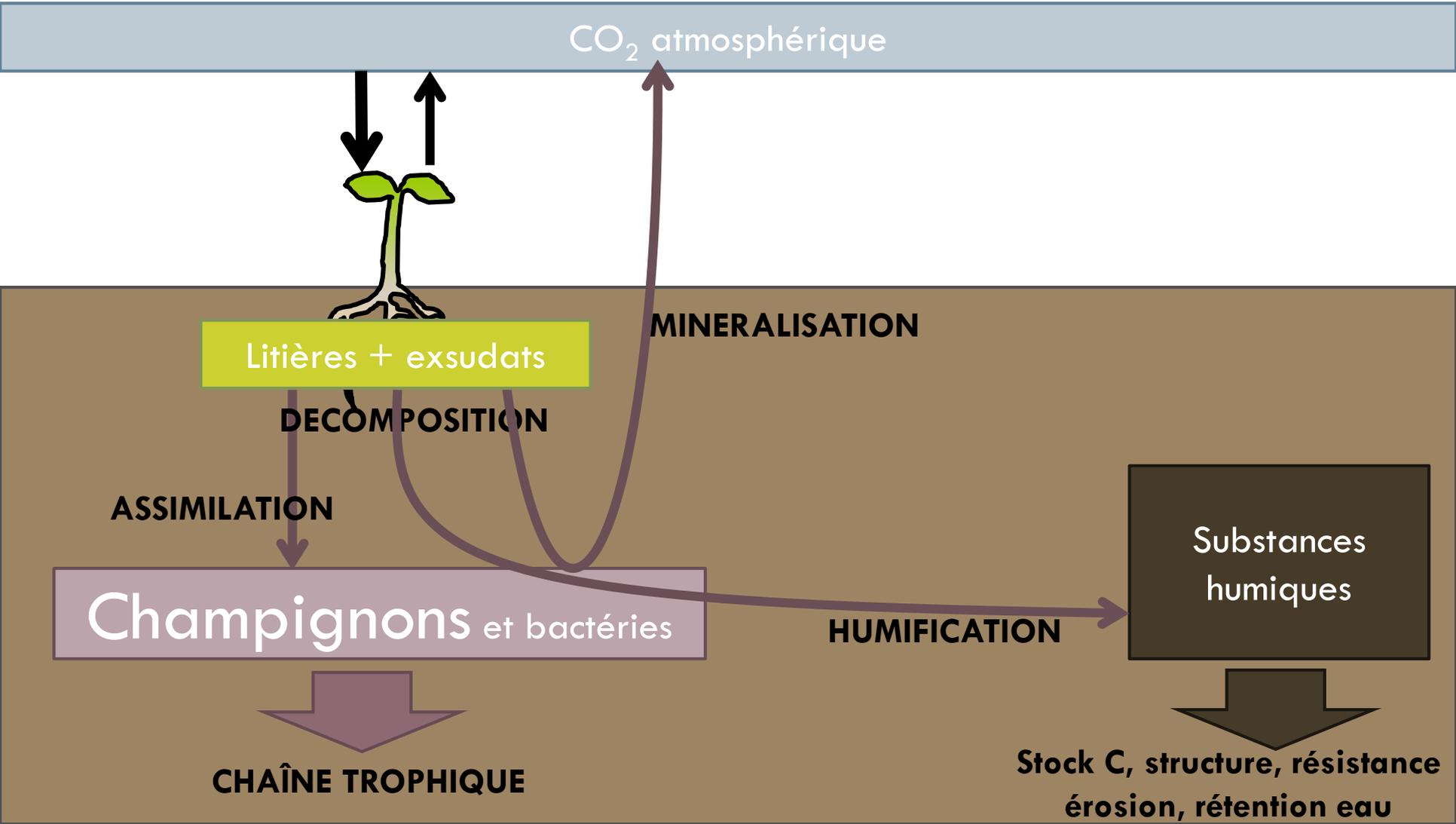
CHAÎNE TROPHIQUE

MINERALISATION

HUMIFICATION

Substances humiques

Stock C, structure, résistance
érosion, rétention eau



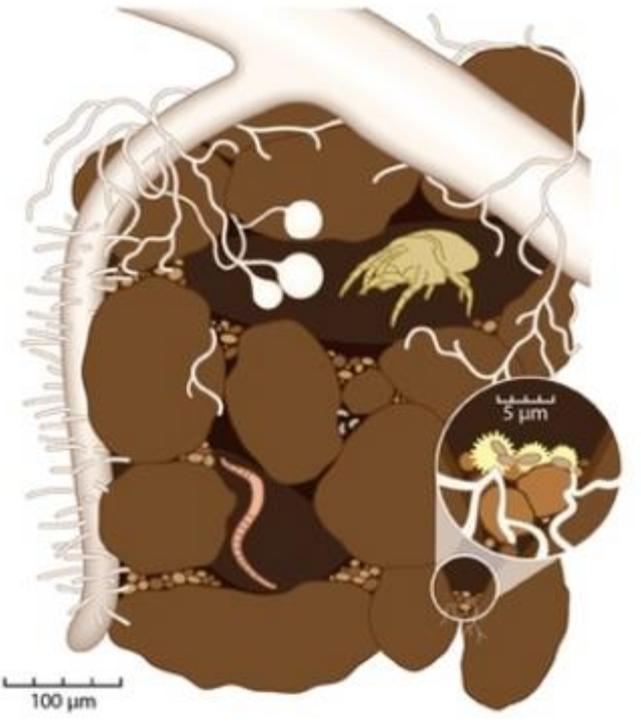
Cycle du C: intensification

45



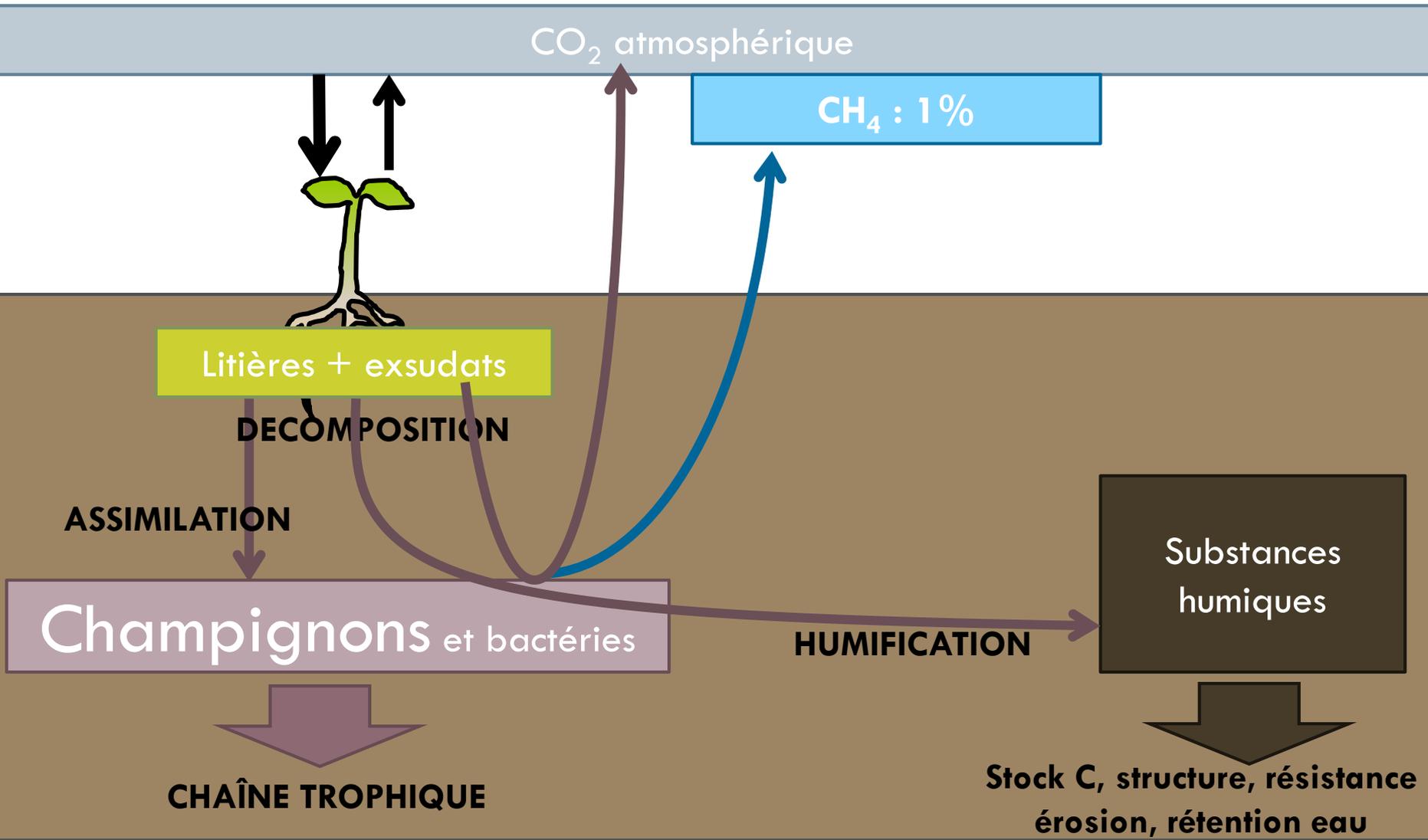
Et si limitation en O_2 dans le sol?

46



Cycle du C: déviation du flux

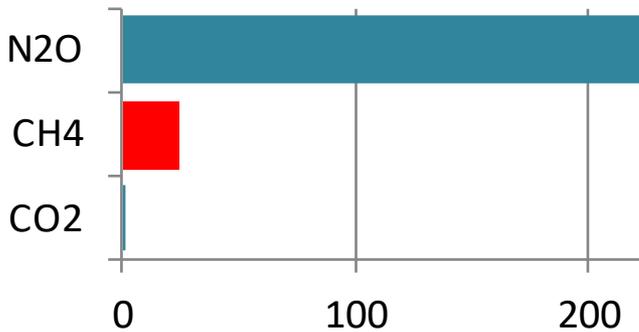
47



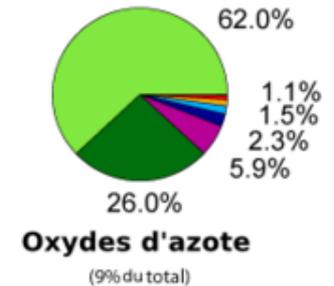
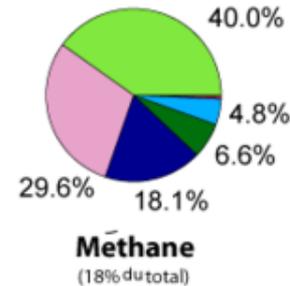
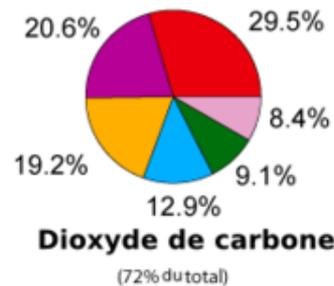
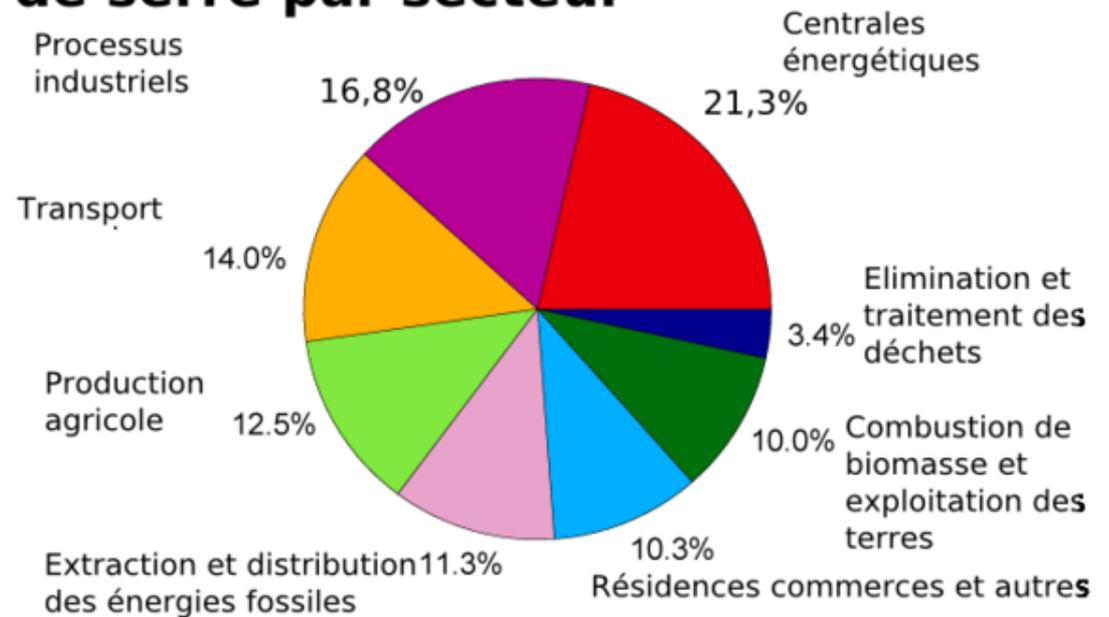
Cycle du C: déviation du flux

48

Pouvoir de réchauffement global



Emissions annuelles de gaz à effet de serre par secteur



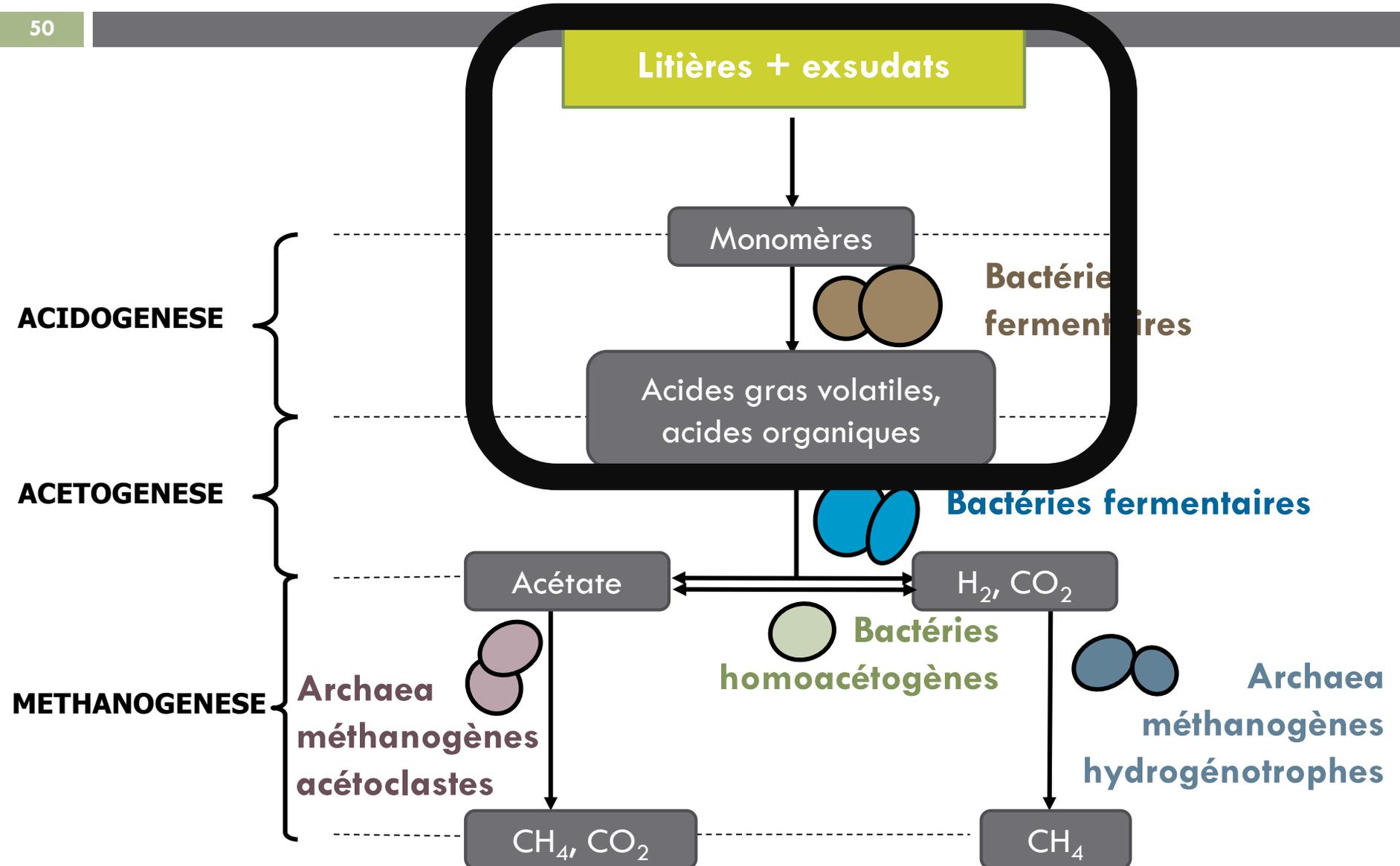
Emissions globales de méthane

49

	Tg CH ₄ year ⁻¹
Sources	
Wetlands	86–115 → 21%
Fossil fuel production/distribution	64–101
Enteric fermentation/animal waste	64–94
Rice production	44–60 → 11%
Biomass burning	30–40
Landfills	30–49
Termites	20–153
Oceans	8–10

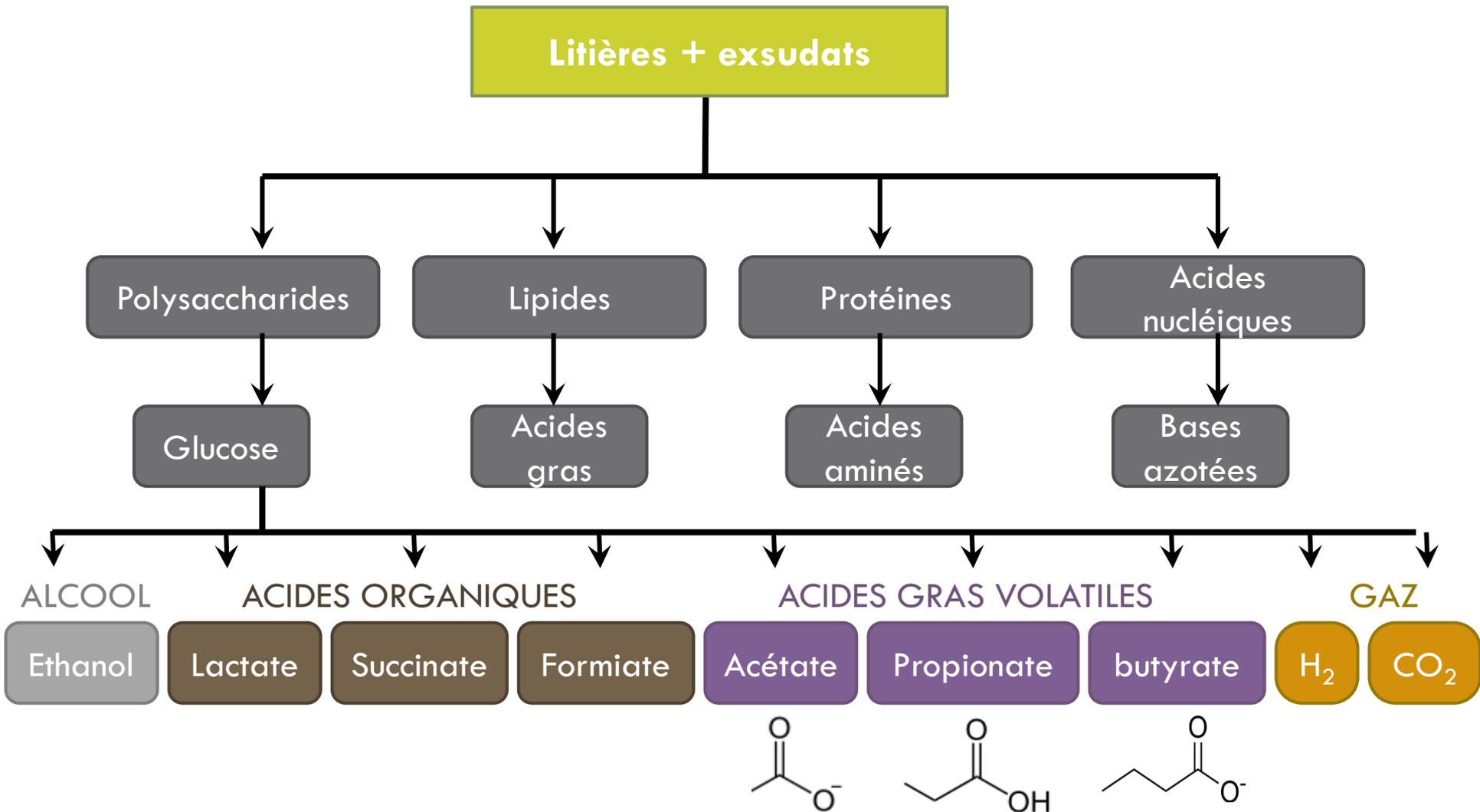
Cycle du C: Méthanogénèse

50



Cycle du C: Méthanogénèse

51



Cycle du C: Méthanogénèse

52

Litières + exsudats

Monomères

Bactéries
fermentaires

Acides gras volatiles,
acides organiques

Bactéries fermentaires

Acétate

H₂, CO₂

Bactéries
homoacétogènes

Archaea
méthanogènes
hydrogénéotrophes

Archaea
méthanogènes
acétoastes

CH₄, CO₂

CH₄

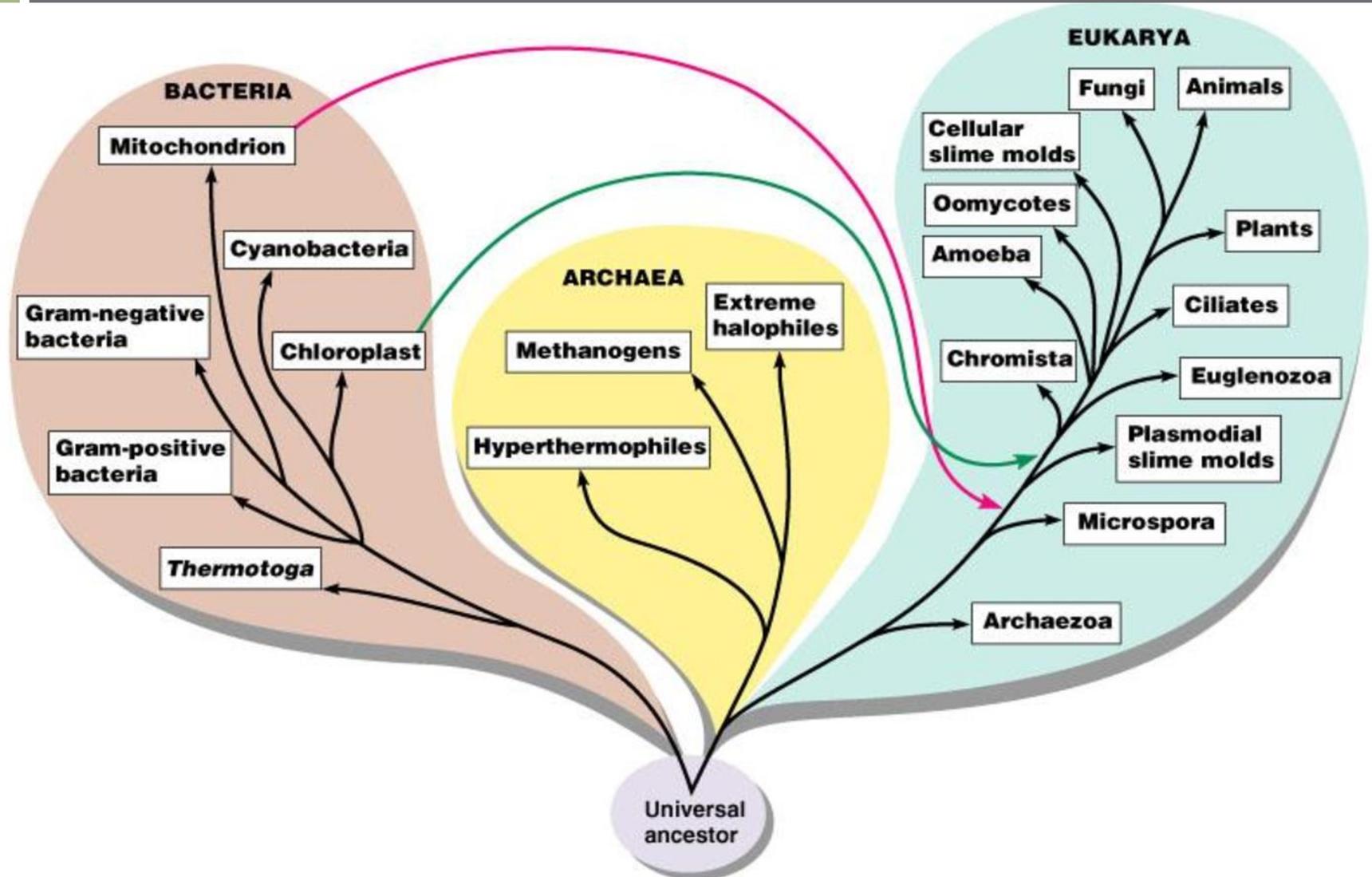
ACIDOGENESE

ACETOGENESE

METHANOGENESE

Cycle du C: Méthanogénèse

53



Cycle du C: Méthanogénèse

54

□ Voie hydrogénotrophe: « respiration anaérobie »

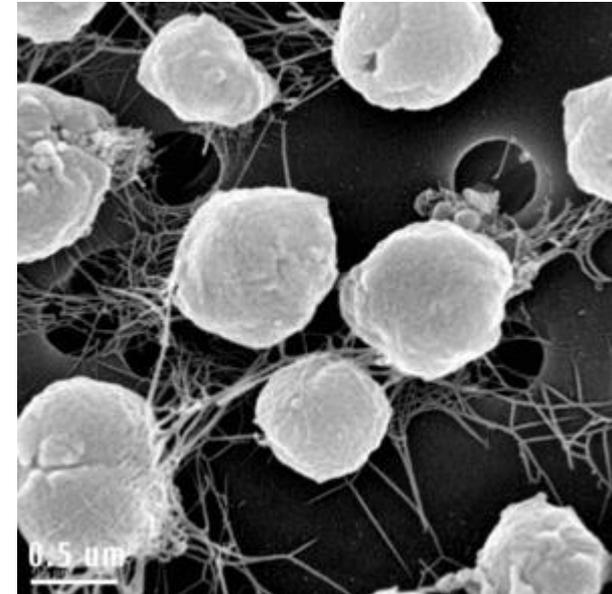
□ *Methanobacterium, Methanobrevibacter*



Accepteur
d'électrons



Donneur
d'électrons
+
évacuation
d'un
inhibiteur
des étapes
amont



Cycle du C: Méthanogénèse

55

- Voie hydrogénotrophe: « respiration anaérobie »
 - ▣ *Methanobacterium, Methanobrevibacter*
 - ▣ $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$, ($\Delta G = -131 \text{ kJ/mol}$)

- Voie acétoclaste: « dismutation »
 - ▣ *Methanosarcina, Methanosaeta*
 - ▣ $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$, ($\Delta G = -36 \text{ kJ/mol}$)

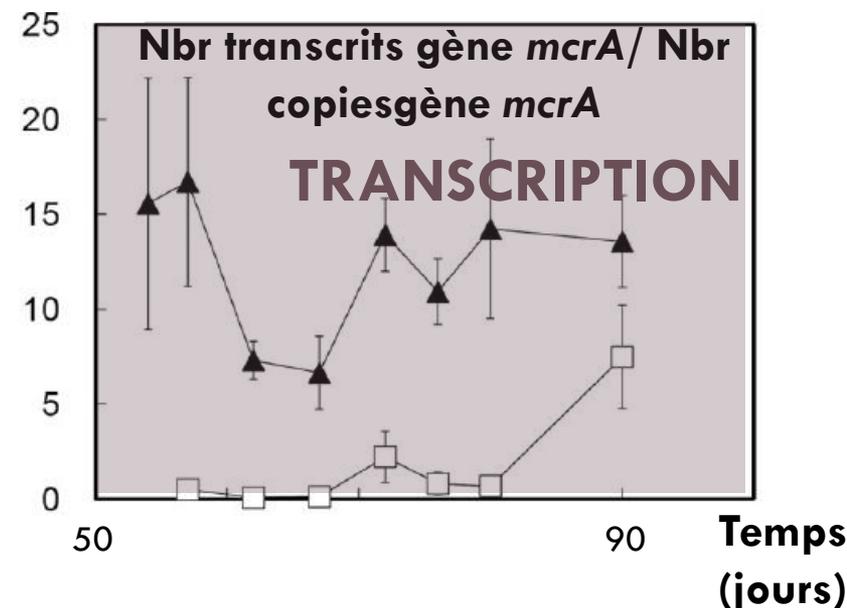
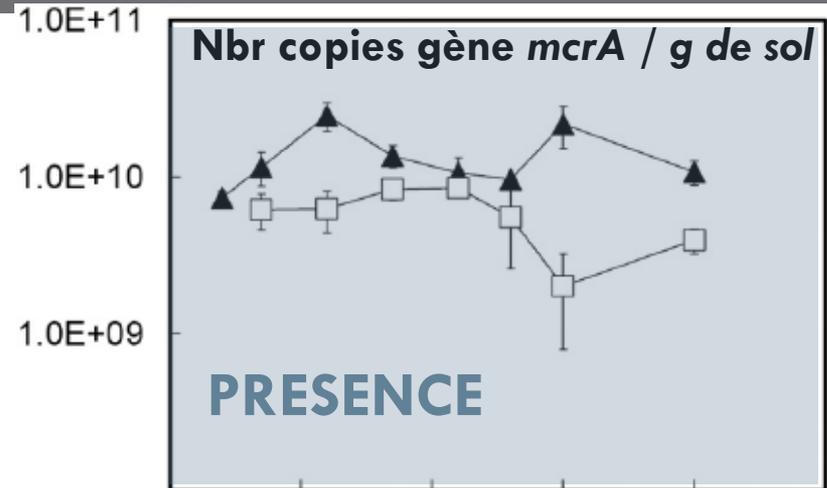
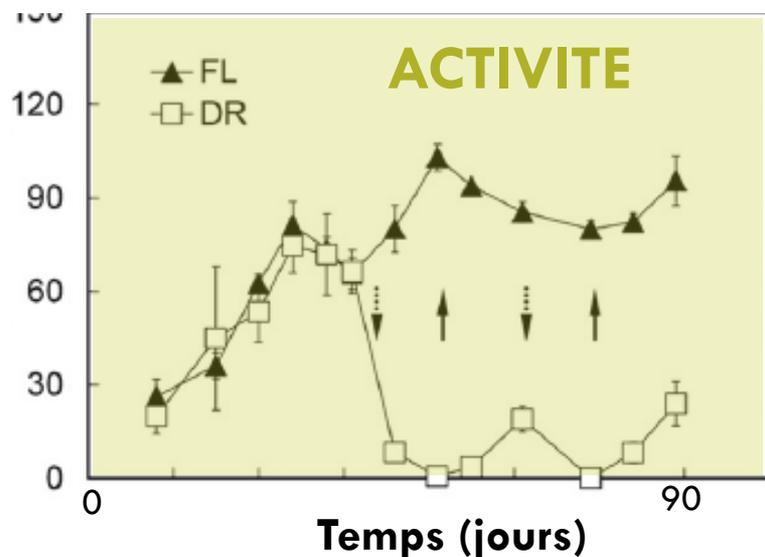
Faible rendement énergétique: absence d'autres accepteurs d'électrons (oxygène, nitrate, fer, sulfate...)

Cycle du C et CH₄: pratiques agricoles

56

- ▲ Rizière continuellement submergée
- Alternance submergée/assechée

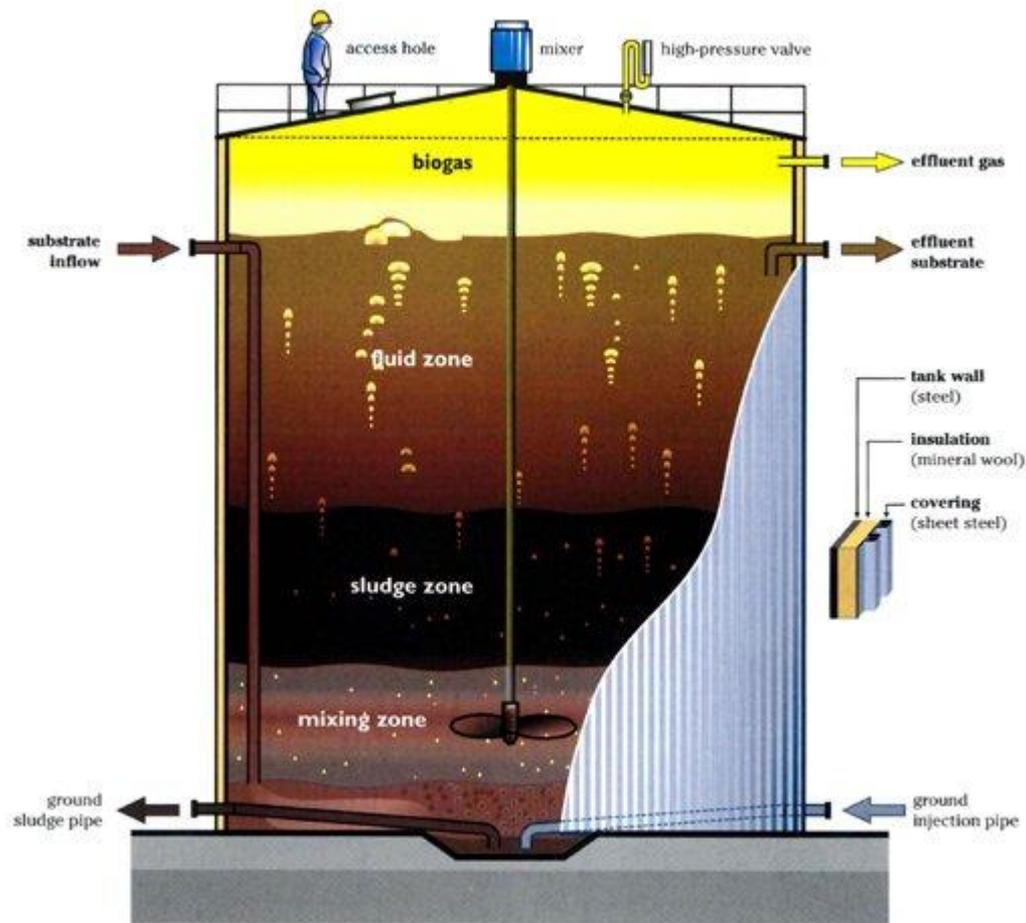
Vitesse d'émission de CH₄ (mmol/j/m²)



Cycle du C: Méthanisation

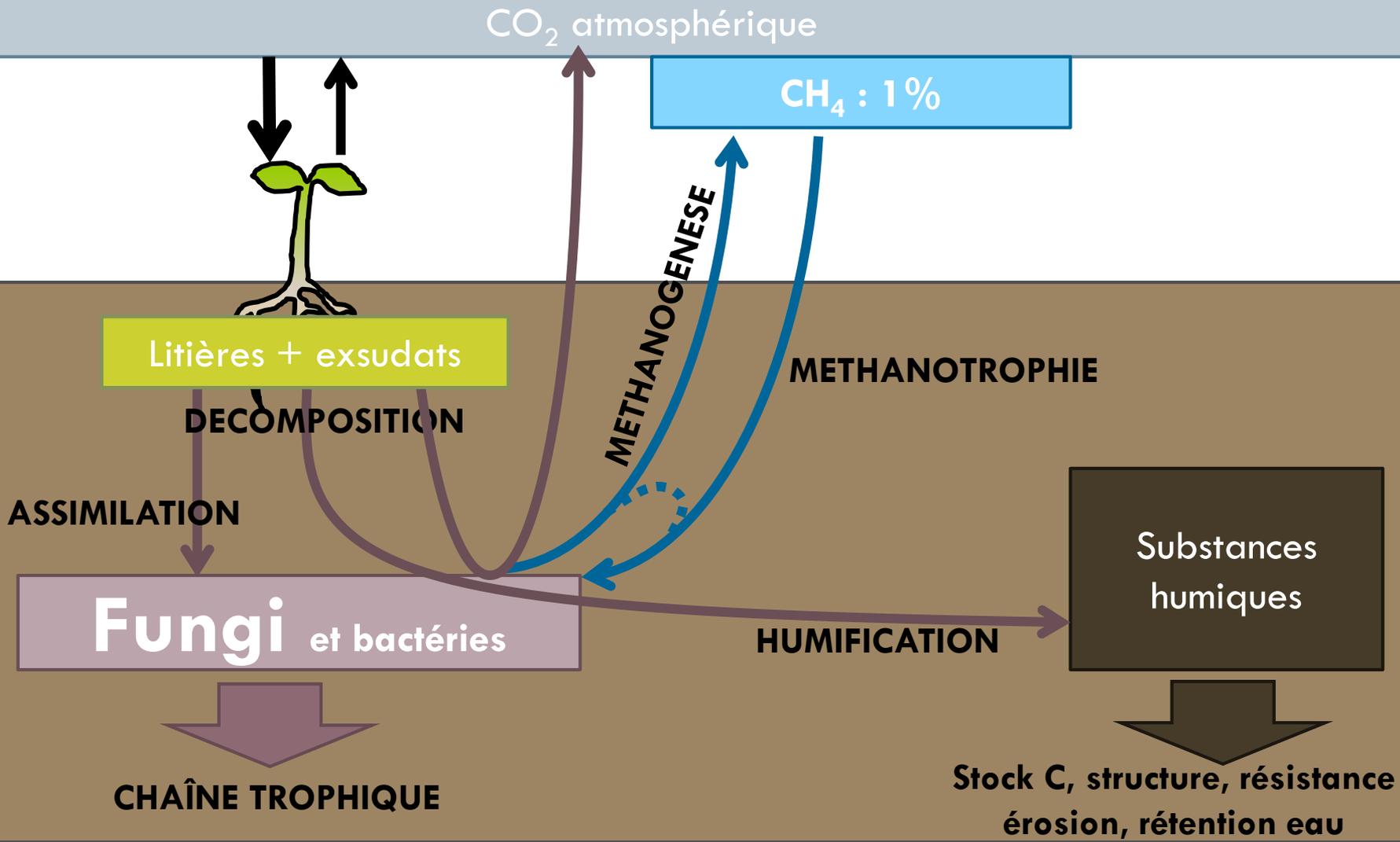
57

- Le processus naturel de méthanogénèse peut être intensifié



Cycle du C: déviation du flux

58



Méthanotrophie

59

	Tg CH ₄ year ⁻¹
<hr/>	
Sources	
Wetlands	86–115
Fossil fuel production/distribution	64–101
Enteric fermentation/animal waste	64–94
Rice production	44–60
Biomass burning	30–40
Landfills	30–49
Termites	20–153
Oceans	8–10
Sinks	
Atmospheric removal	308–560
Soil microbial oxidation	10–30
Atmospheric increase	28–32

Méthanotrophie

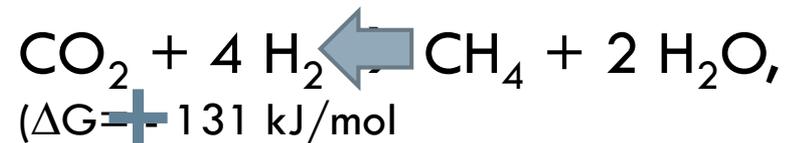
60

Aérobic

- Bactérie Gram –
 - Aérobie stricte
 - CH₄: source de C et d'énergie
 - Genres: *Methylosinus*,
Methylocystis,
Methylomonas,
Methylobacter

Anaérobie

- Archaea « ANME »
 - ~ méthanogènes
 - Enzyme fonctionnant en sens inverse

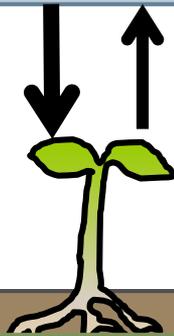


- Syntrophie nécessaire: bactéries sulfato-réductrices ou dénitrifiantes

Cycle du C: synthèse

61

CO₂ atmosphérique



Litières + exsudats

DECOMPOSITION

MINERALISATION

ASSIMILATION

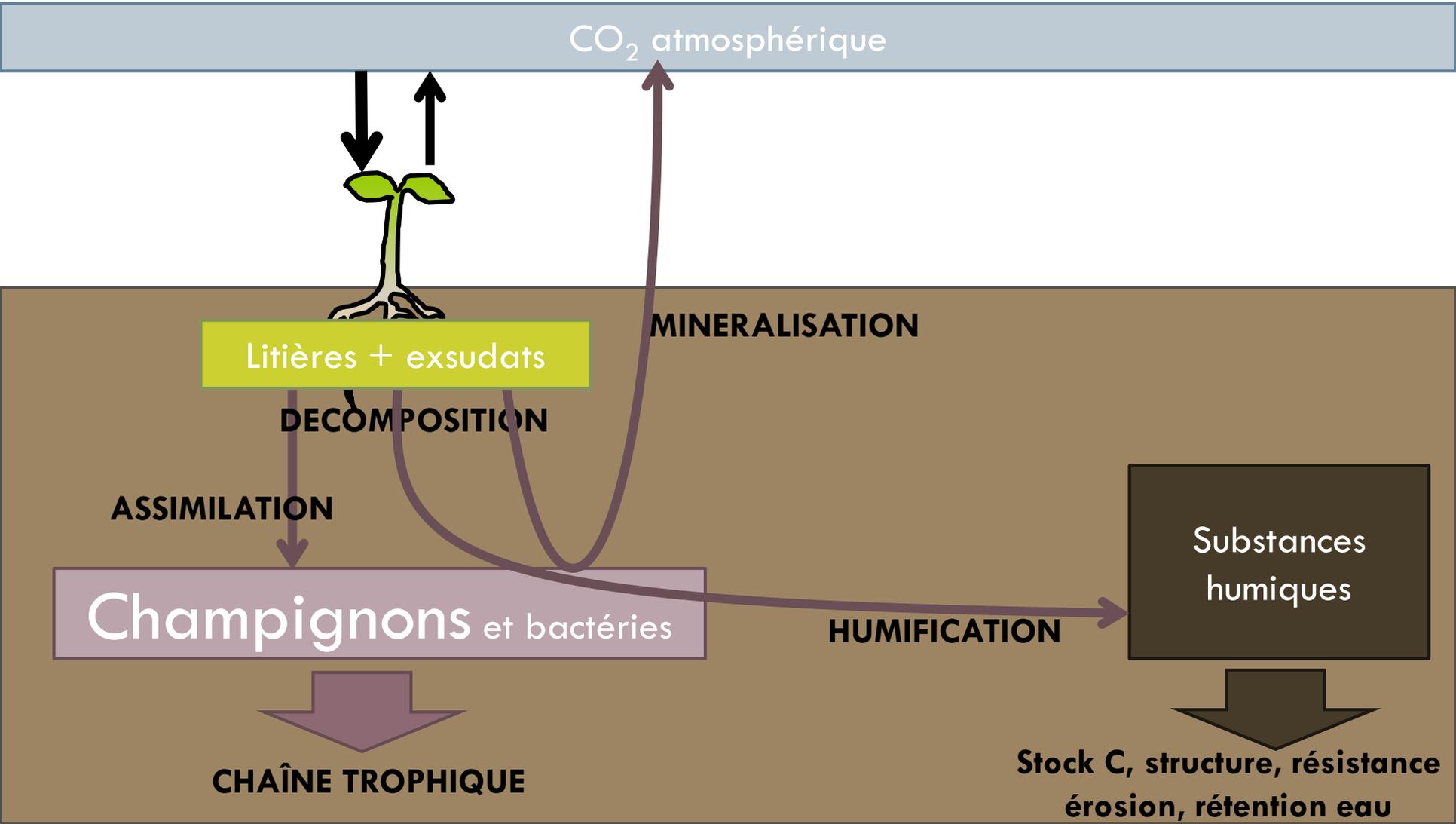
Champignons et bactéries

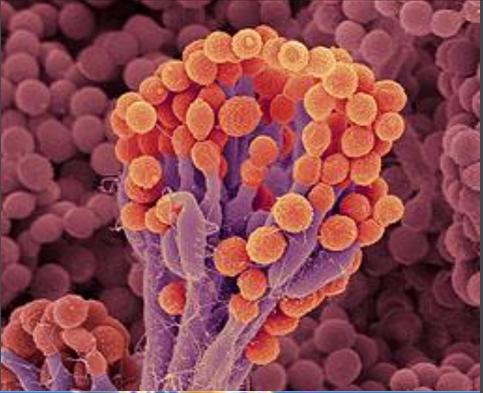
HUMIFICATION

Substances humiques

CHAÎNE TROPHIQUE

Stock C, structure, résistance
érosion, rétention eau





MICROBIOLOGIE DU SOL

PARTIE II

S6 2017-2018

Maialen BARRET, MCF INPT-ENSAT

Plan du cours

Introduction: écologie microbienne & sol

I. Le cycle du C

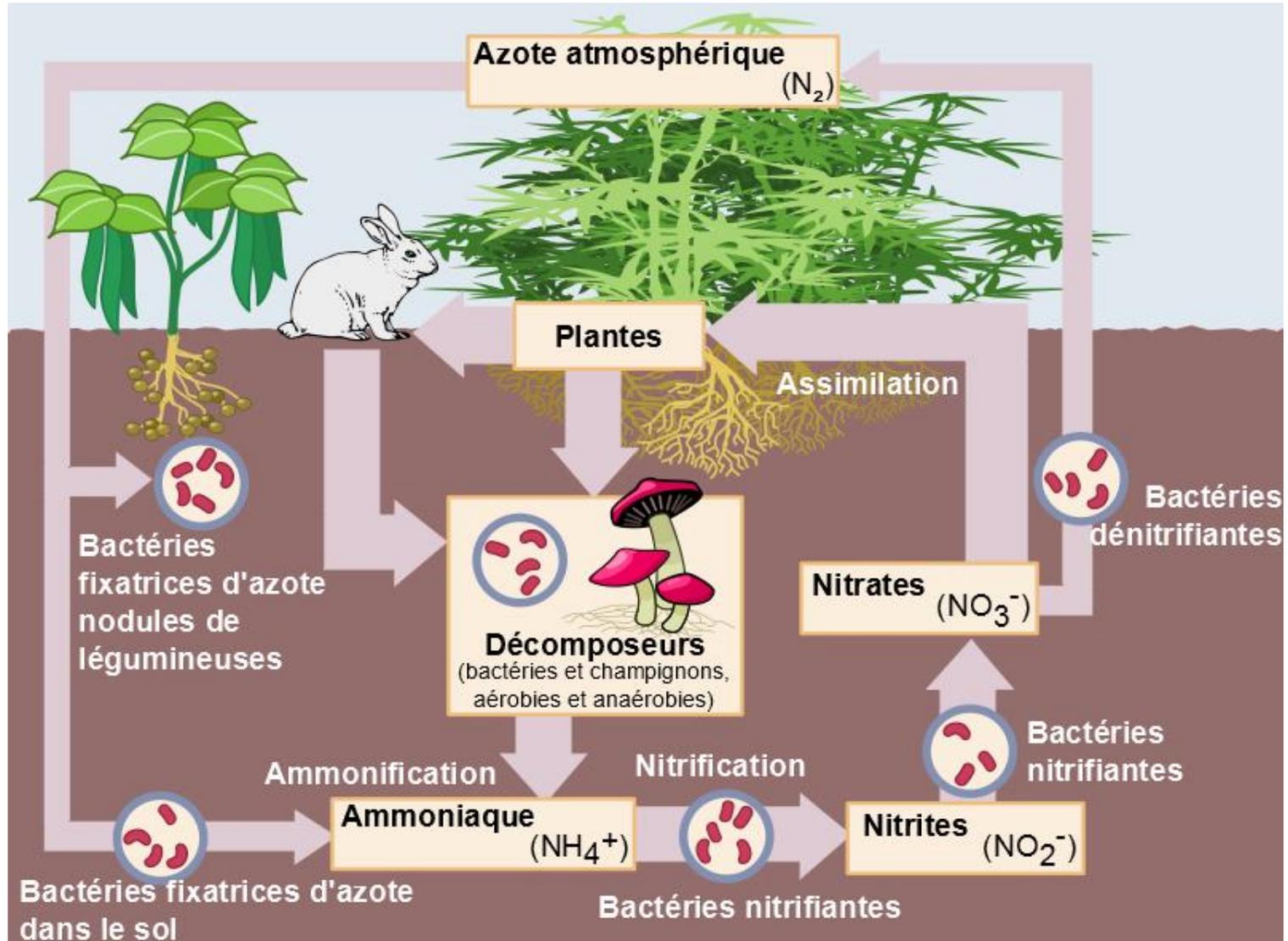
II. Le cycle de N

III. Interactions micro-macroorganismes

IV. Dépollution

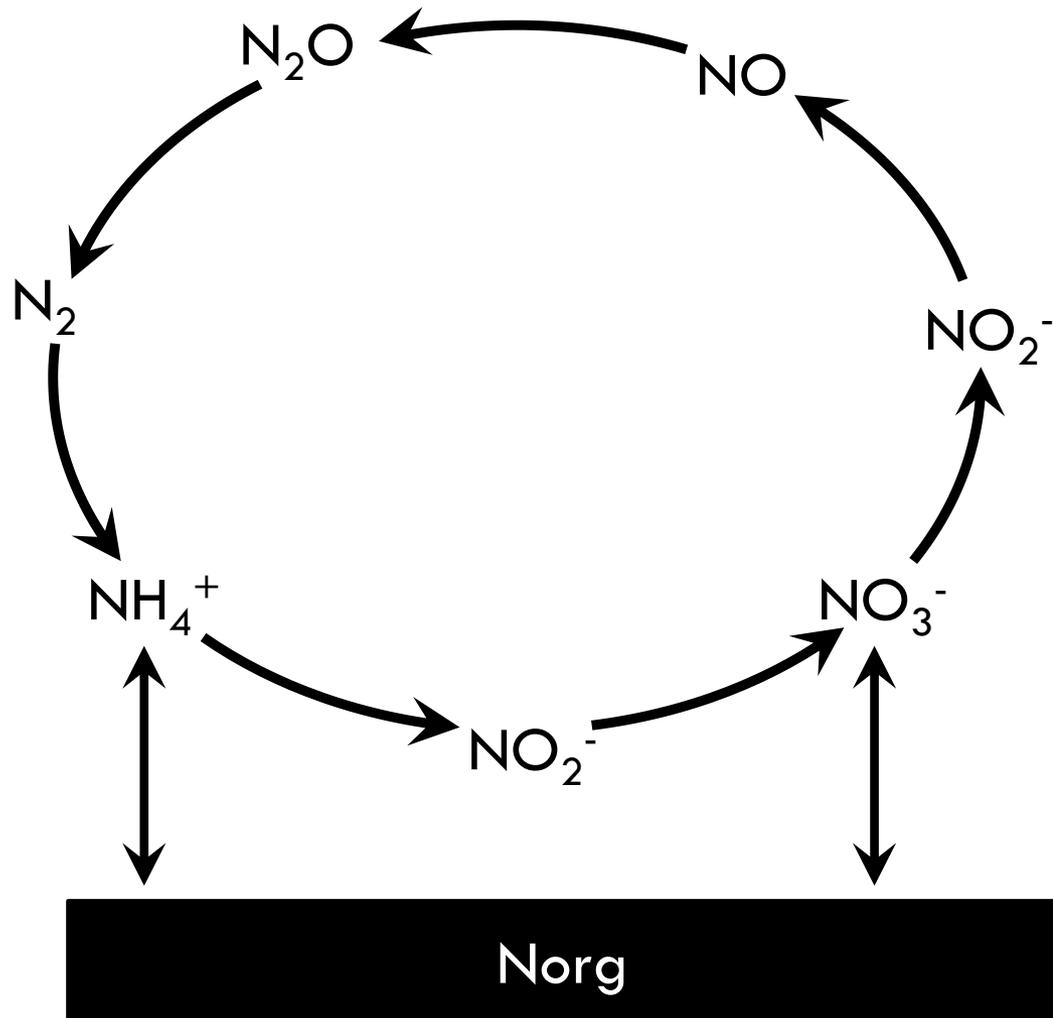
Cycle de l'azote: approche « compartiments »

64



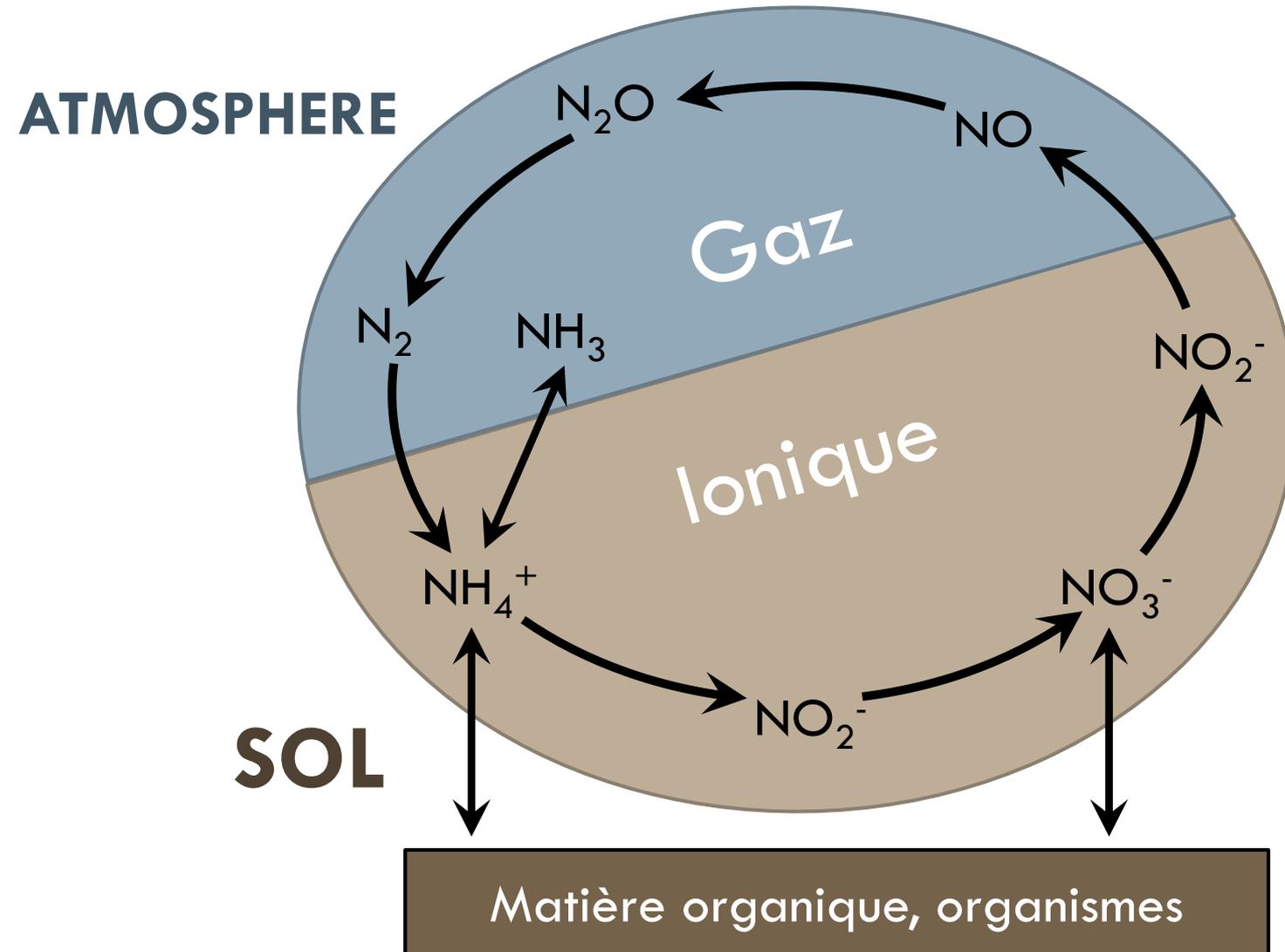
Cycle de l'azote: approche biochimique

65



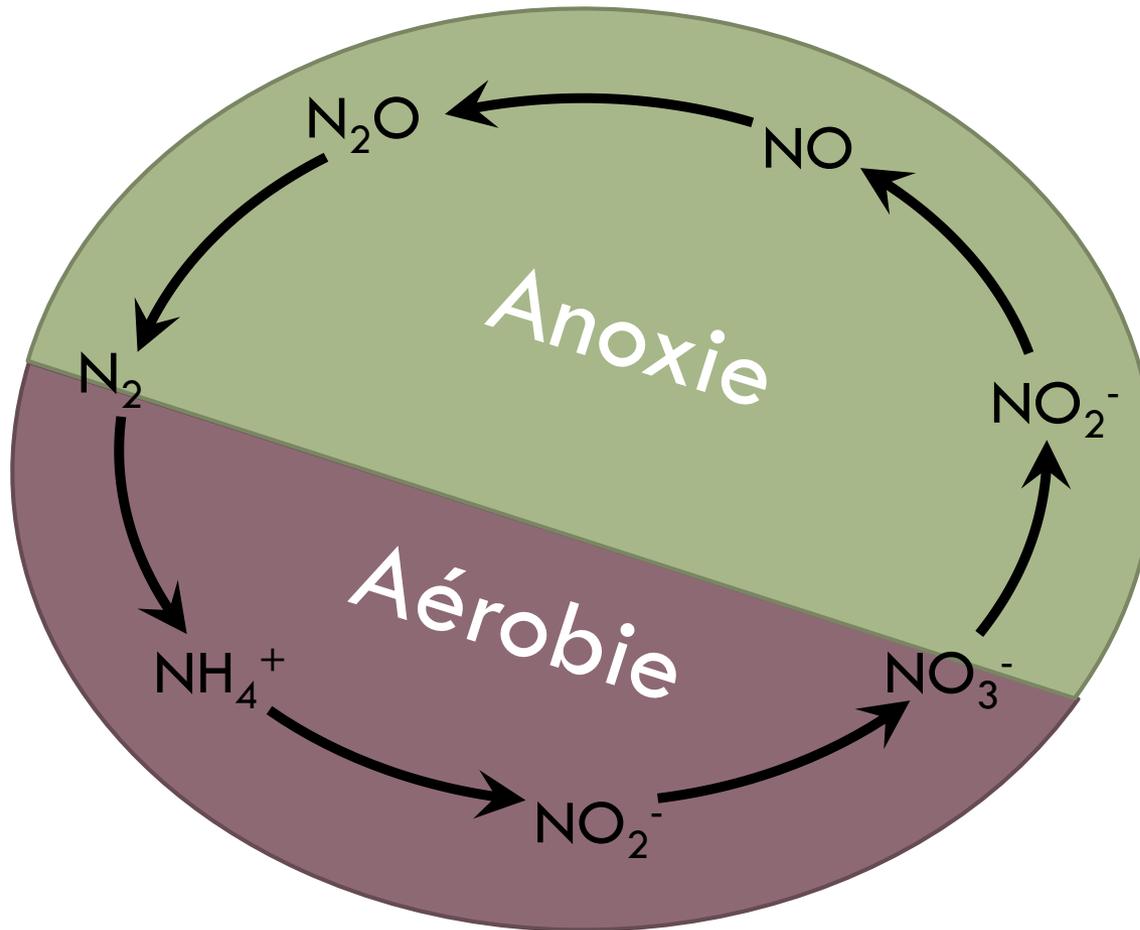
Cycle de l'azote: 2 états

66



Cycle de l'azote: 2 environnements

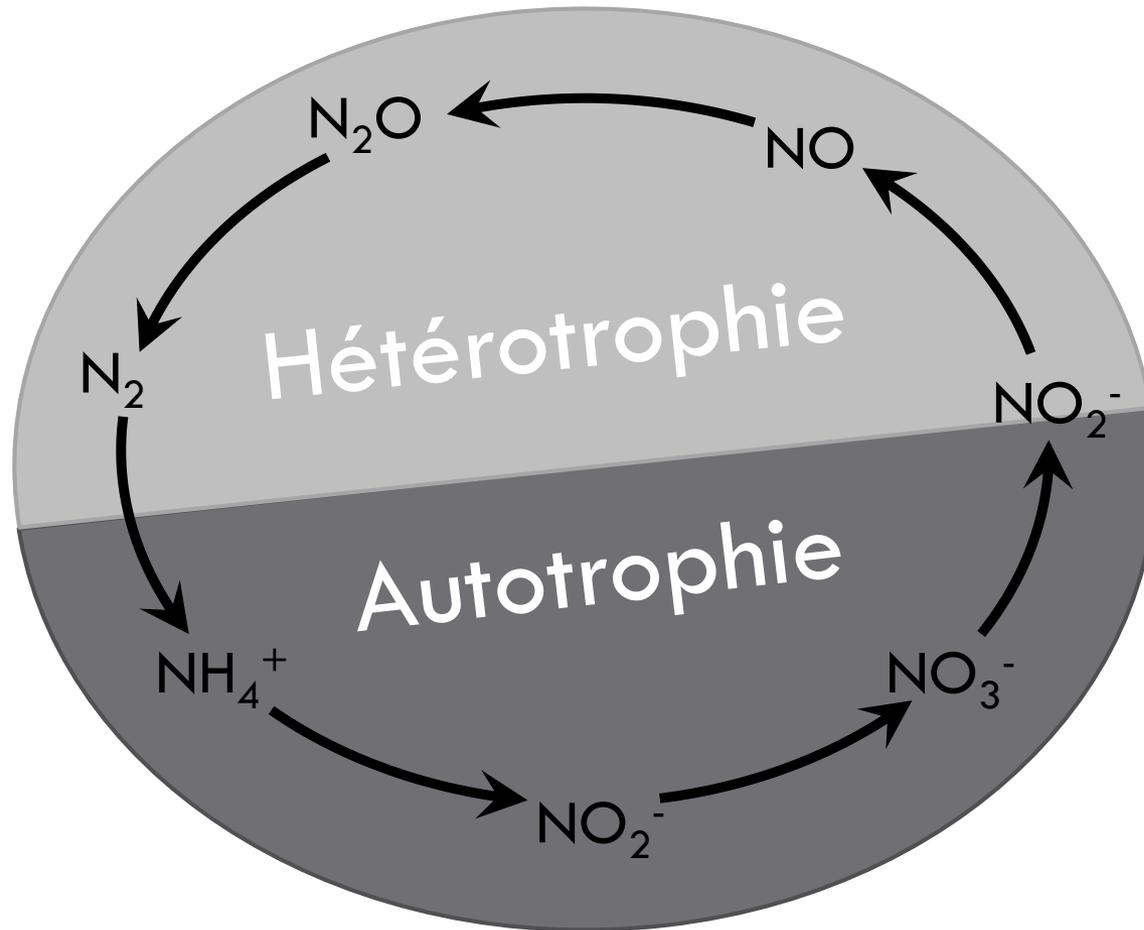
67



Hétérogénéité spatiale et temporelle du sol est nécessaire!

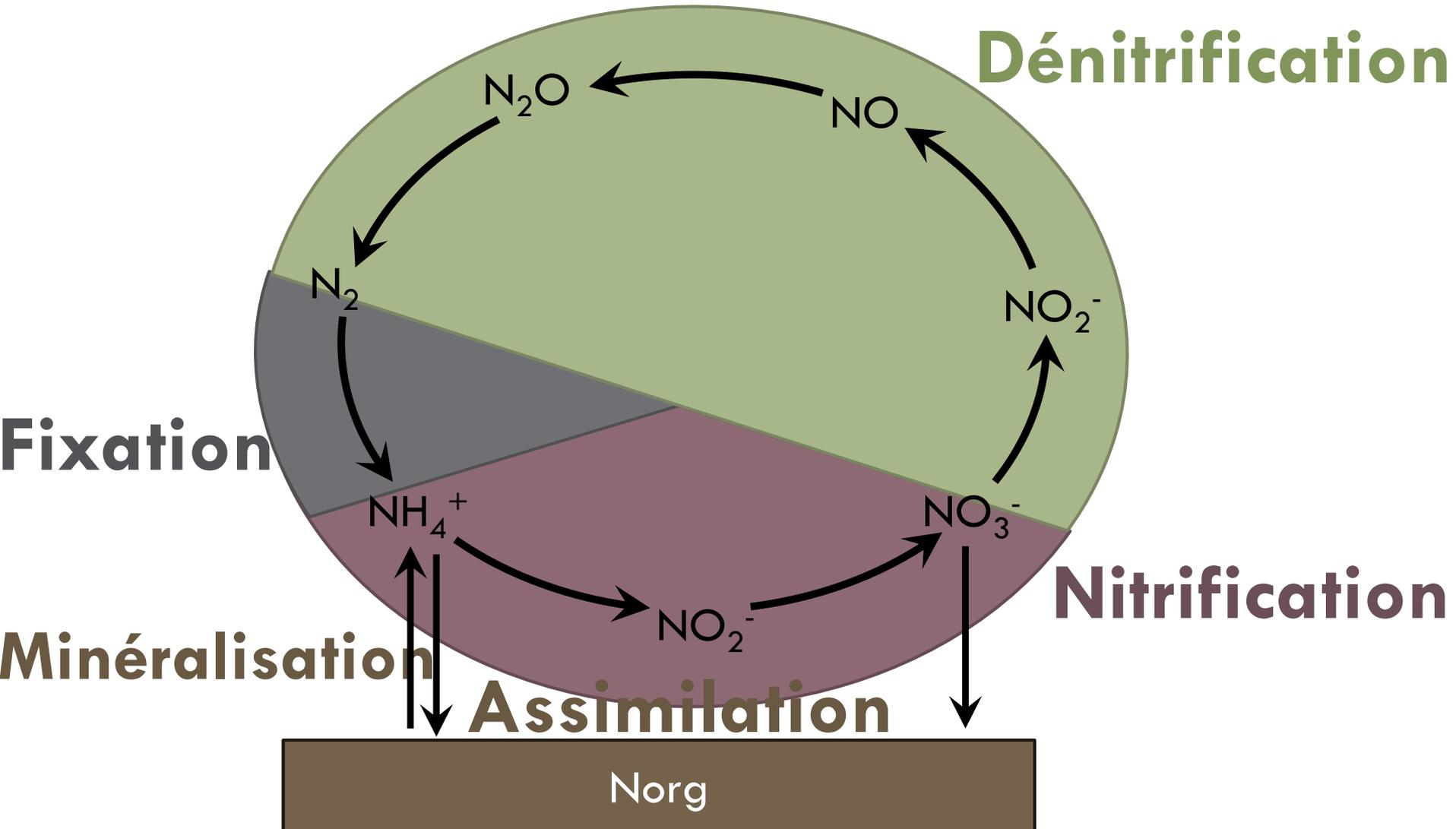
Cycle de l'azote: 2 métabolismes

68



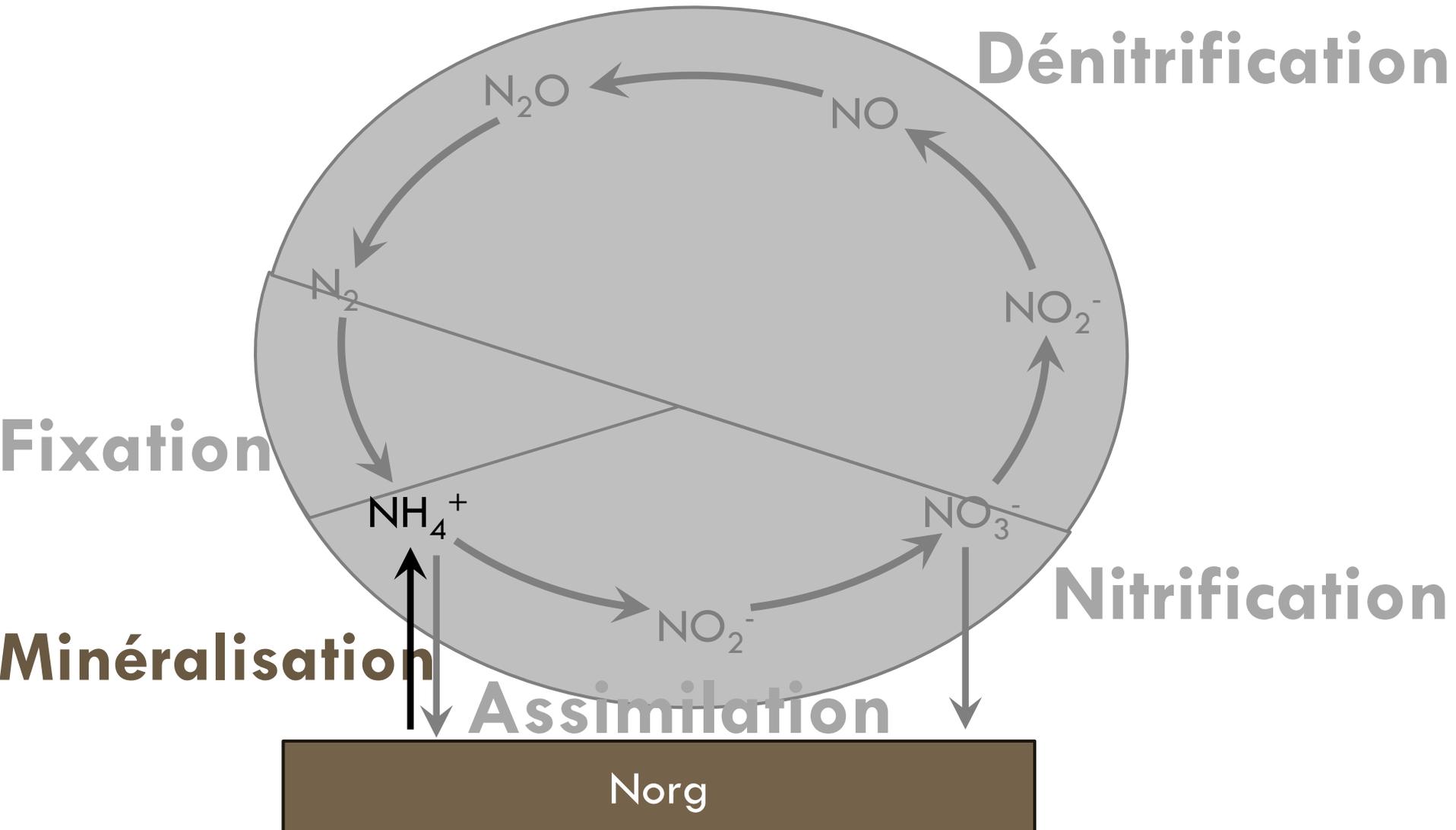
Cycle de l'azote: 5 processus majeurs

69



Minéralisation: N organique \rightarrow NH_4^+

70



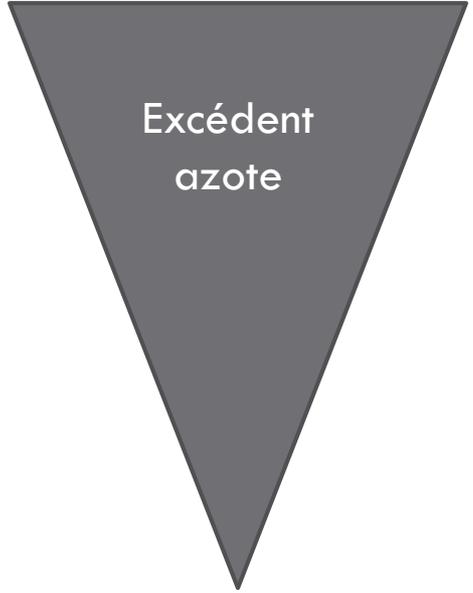
Minéralisation: N organique \rightarrow NH_4^+

71

□ Minéralisation C & N

Matériaux organique	Ratio C:N
Microorganismes du sol	8:1
MO du sol	10:1
Résidus de luzerne	16:1
Lisier	20:1
Maïs fourrage	60:1
Paille céréales	80:1
Litière de chêne	200:1
Litière de pin	300:1
Bois de conifère	625:1

DECOMPOSITION



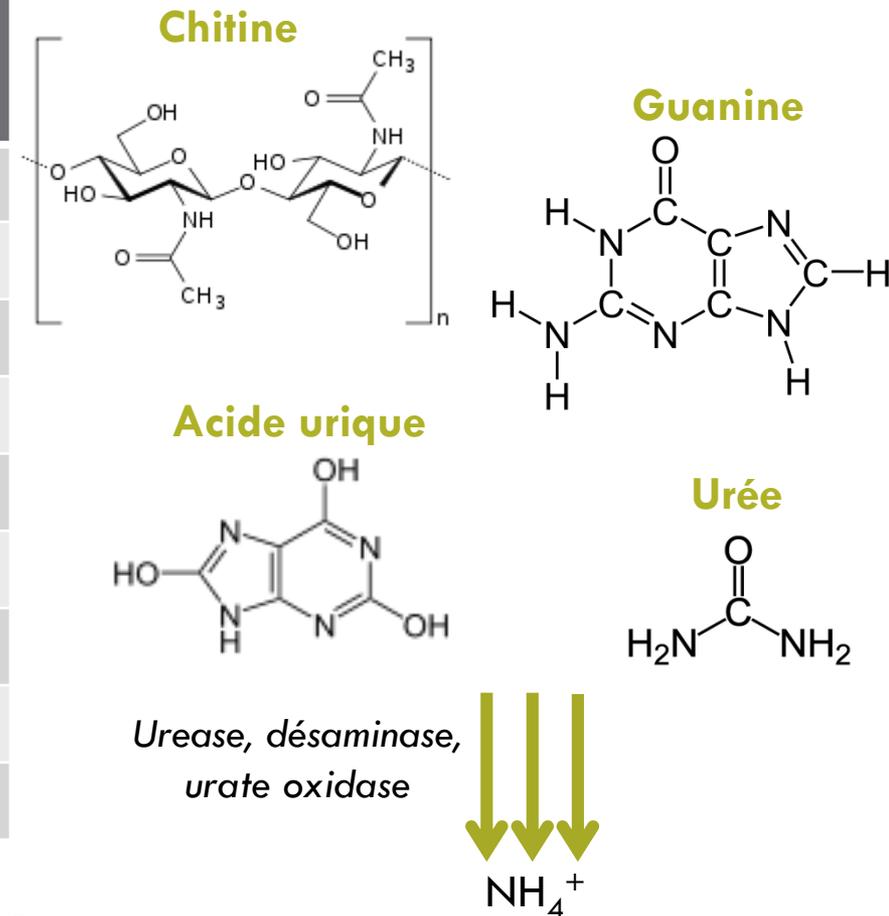
Excédent
azote

Minéralisation: N organique \rightarrow NH_4^+

72

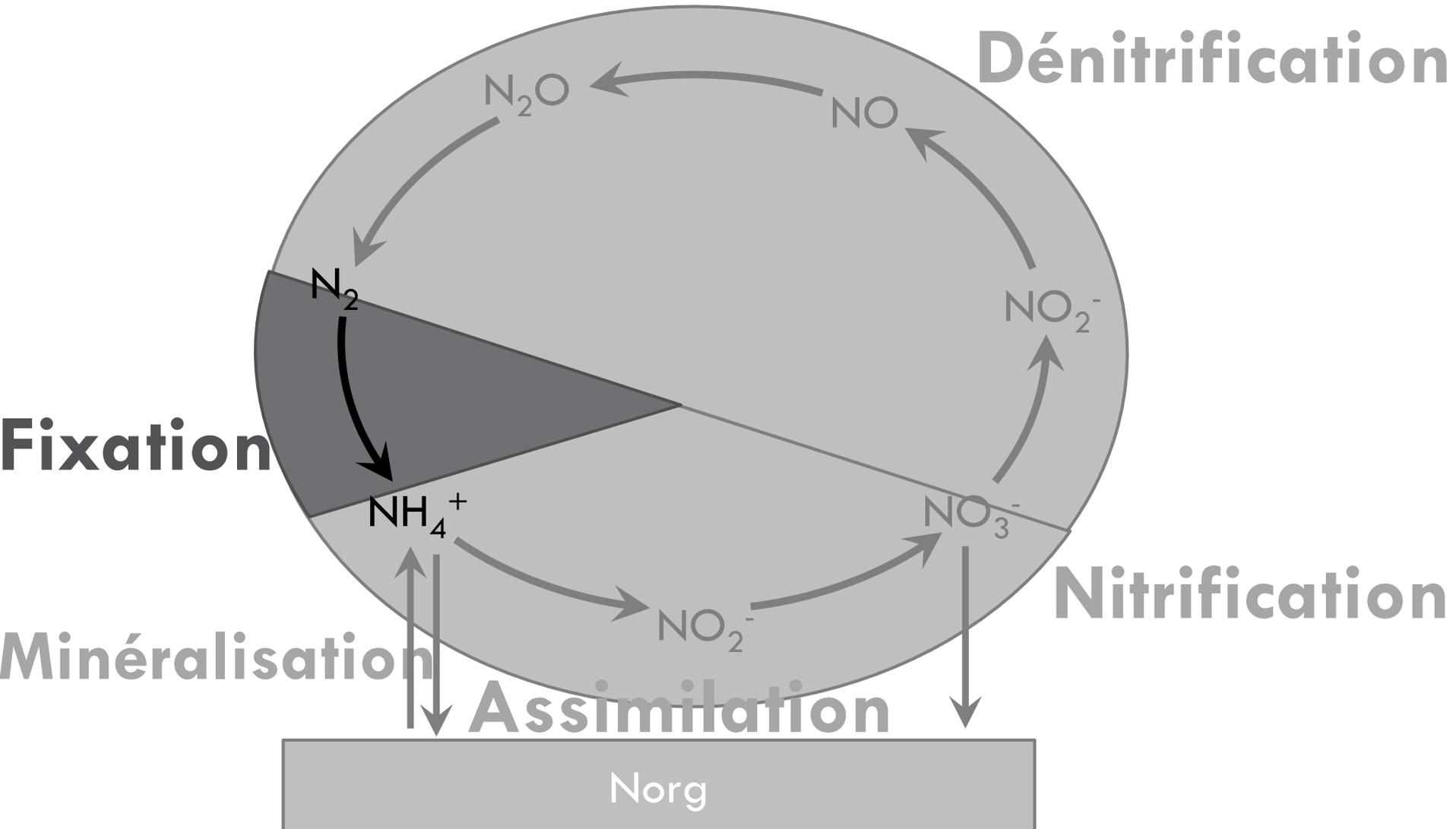
□ Formes d'azotes excrétées par les organismes

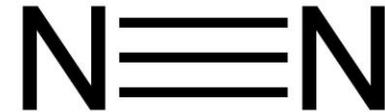
Organisme	Formes d'azote
Bactérie	NH_4^+ , parois cellulaires
Champignon	NH_4^+ , chitine des parois cellulaires
Protozoaires	NH_4^+
Nématodes	NH_4^+ , purines
Rotifères	NH_4^+
Oribatides	Cristaux de guanine
Collemboles	Acide urique
Oligochaeta	NH_4^+ , urée et acide urique





73





- Exclusivité des bactéries et archaea
- Diazotrophes : groupe fonctionnel très divers

TABLE 14.2 Examples of Genera of Diazotrophic Bacteria Arranged by Mode of Energy Generation and the Oxygen Sensitivity of Their Diazotrophy

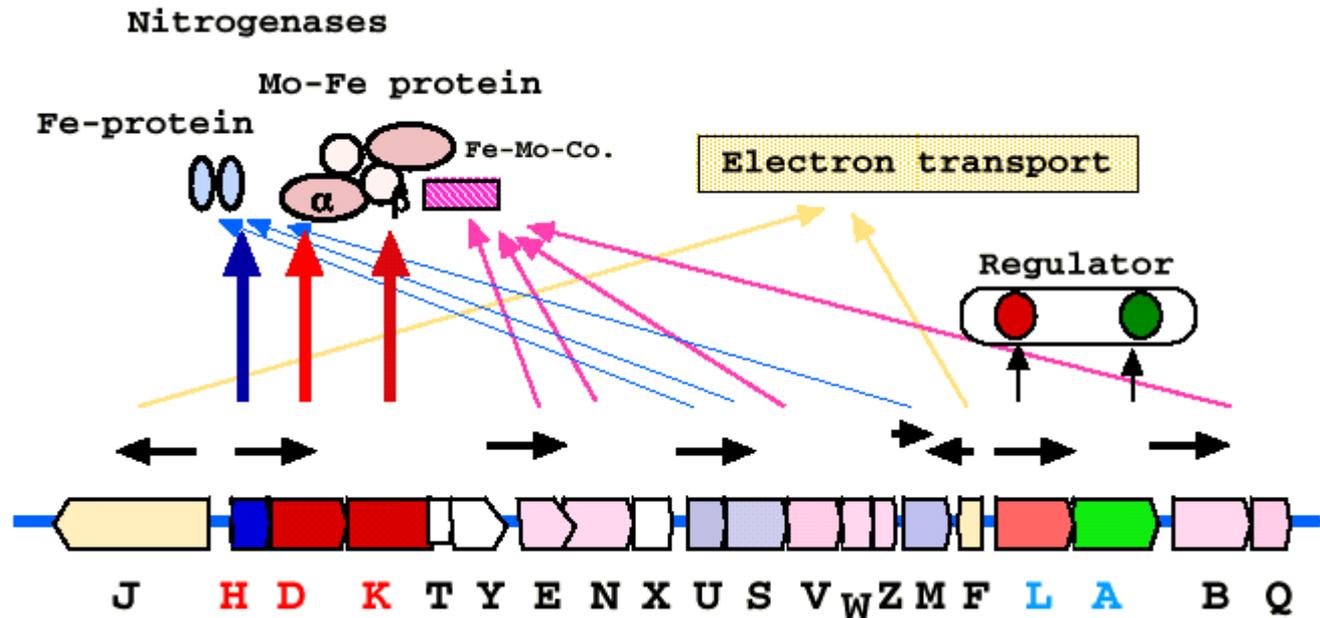
Energy source	Sensitivity of N ₂ fixation to oxygen	Examples (Genera)
Heterotrophic	Aerobic diazotrophs	<i>Azotobacter, Gluconacetobacter</i>
	Microaerophilic diazotrophs	<i>Azospirillum, Herbaspirillum, Methylococcus</i>
	Facultatively aerobic diazotrophs	<i>Klebsiella, Paenibacillus, Enterobacter</i>
	Obligately anaerobic diazotrophs	<i>Clostridium, Desulfovibrio, Methanosarcina</i>
Phototrophic	Aerobic diazotrophs (primarily filamentous heterocyst-forming cyanobacteria)	<i>Anabaena, Nostoc</i>
	Microaerophilic diazotrophs (filamentous nonheterocystous cyanobacteria)	<i>Lyngbya, Oscillatoria</i>
	Facultatively aerobic diazotrophs (purple nonsulfur bacteria)	<i>Rhodobacter</i>
	Obligately anaerobic diazotrophs (purple sulfur bacteria)	<i>Chromatium</i>

Sol riche en C, forte décomposition, disponibilité d'exsudats

Sol pauvre en C



- Complexe enzymatique: « nitrogénase »



Gènes *nif* de *Klebsiella pneumoniae*



- Un processus coûteux en énergie:
 - ▣ 16 ATP / N_2
 - ▣ Transcription/traduction de >20 gènes

Bacterial species	Energy source	N_2 -N fixed/g C source used (mg)
Anaerobic growth: <i>Clostridium pasteurianum</i>	Sucrose	11
Microaerophilic growth: <i>Azospirillum brasilense</i>	Malate	26
Aerobic growth: <i>Azotobacter vinelandii</i>	Sucrose	7

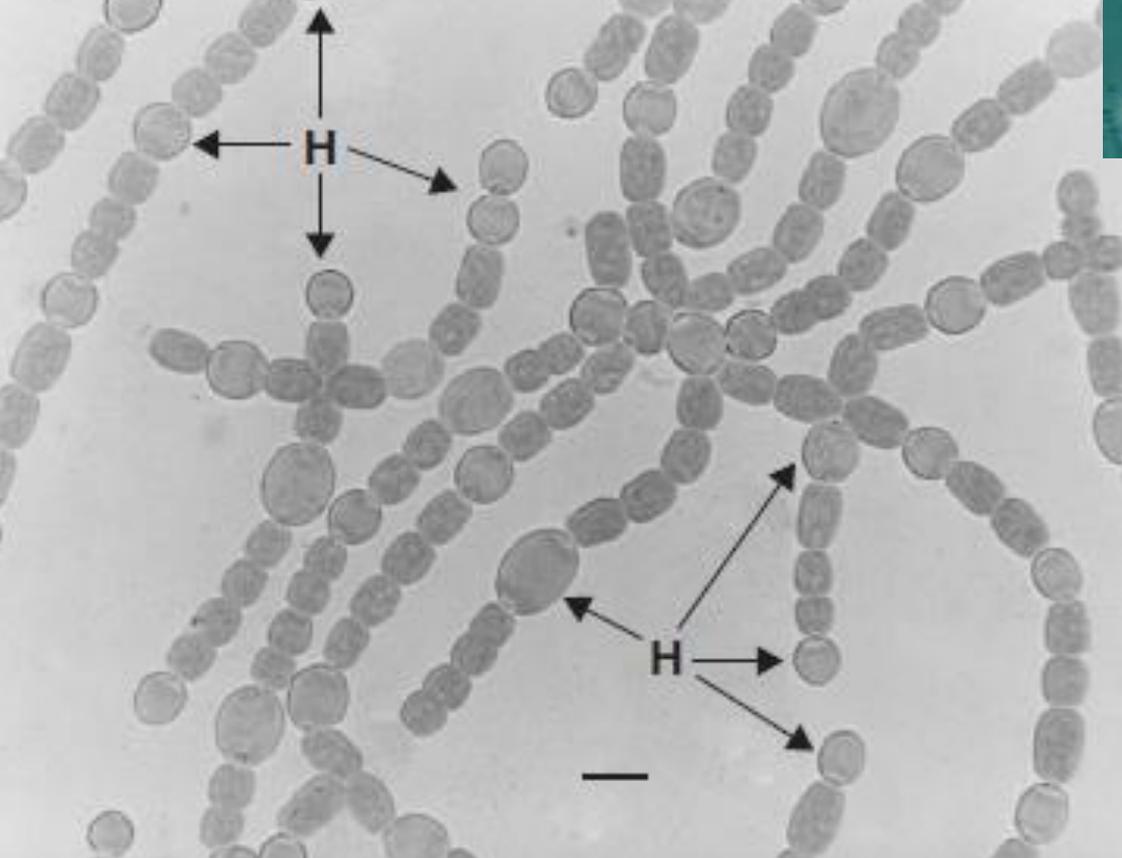
Fixation n'a lieu qu'en **absence**
d'autres sources de N



77

□ Nitrogénase sensible à l'O₂

Cyanobactéries : protection par hétérocystes (H)



Autres Cyanobactéries : fixation en absence de production d'O₂ (nuit)

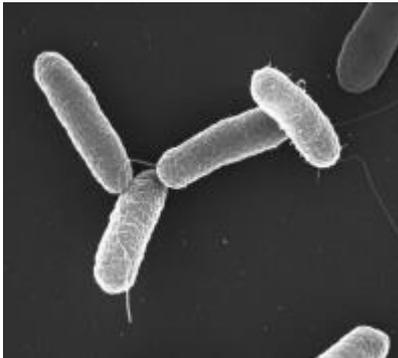
Azotobacter: active respiration

Fixation : 2 modes

78

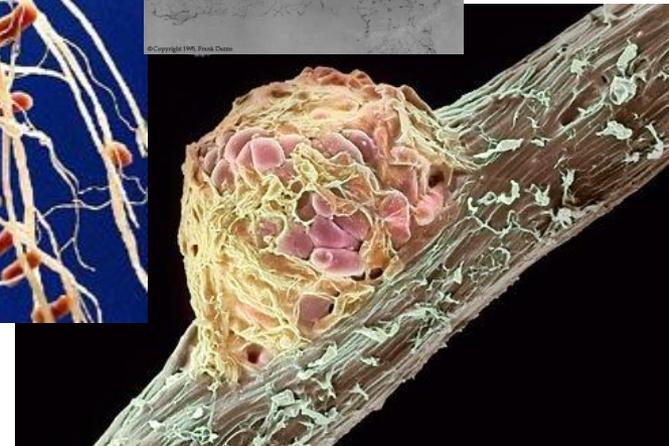
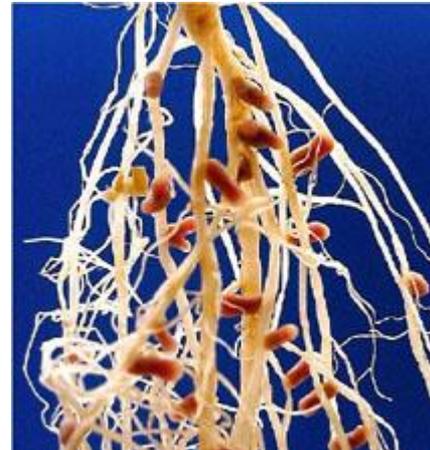
« Libre »: voie mineure

- ~20 genres de bactéries aérobies (*Azotobacter*) et anaérobies (*Clostridium*)
- ~15 genres de cyanobactéries (photosynthétiques)



Symbiose: voie majeure

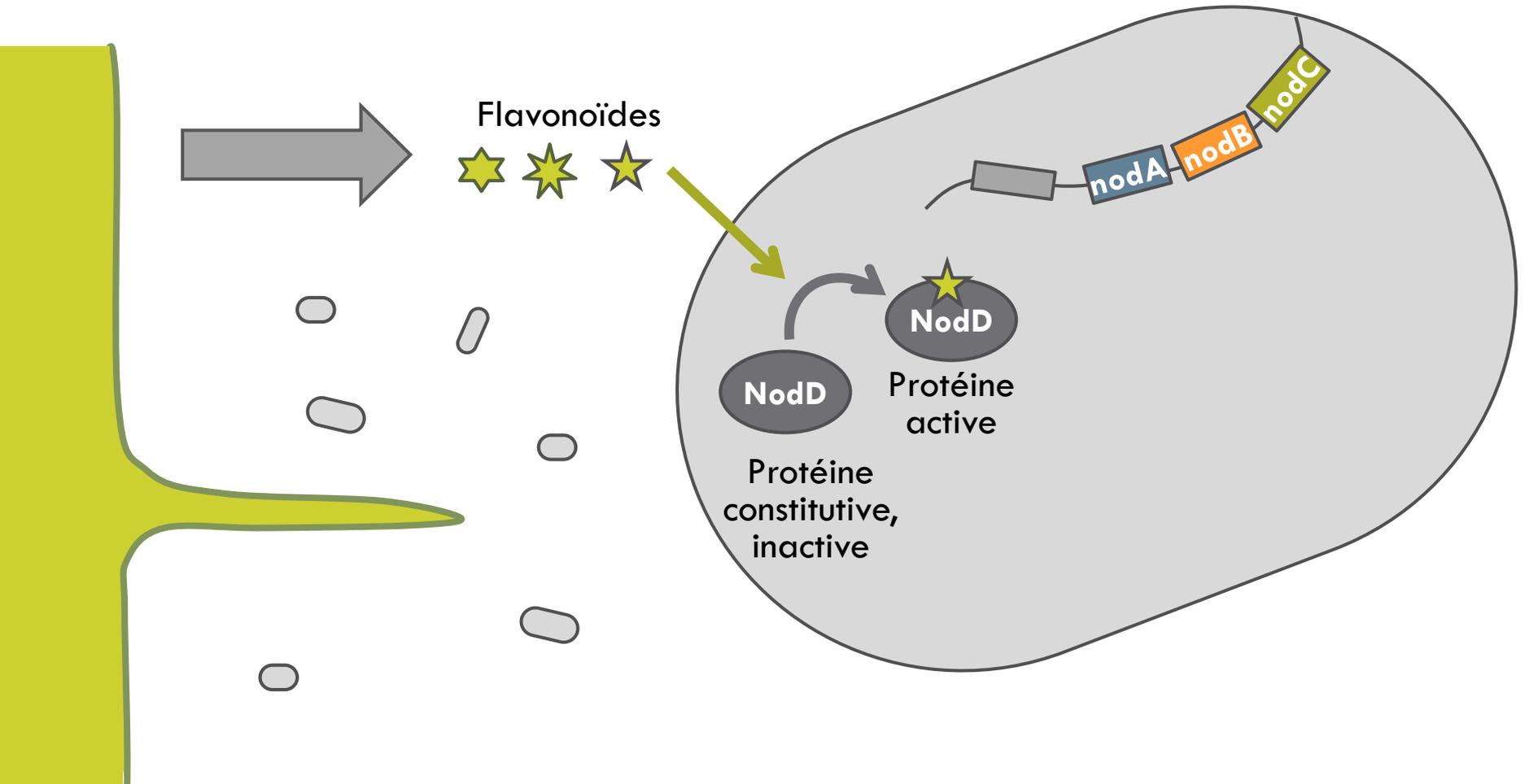
- Plantes: légumineuses, quelques céréales et herbes
- Bactéries: *Rhizobium*, *Allorhizobium*, *Bradyrhizobium*... et actinomycètes *Frankia*



Comment se forment les nodules de *Rhizobia*?

79

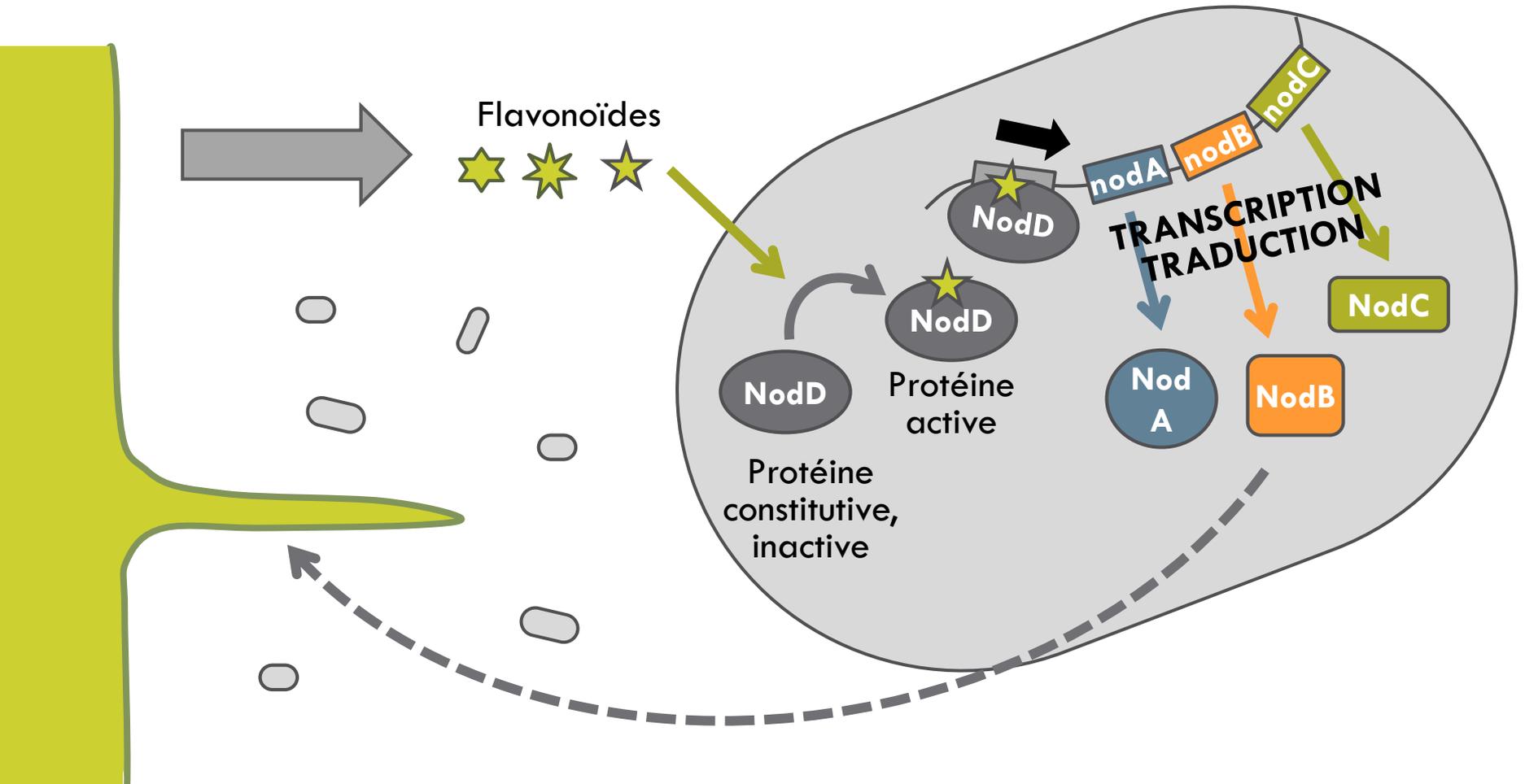
- Etape ① : La plante excrète des flavonoïdes



Comment se forment les nodules de *Rhizobia*?

80

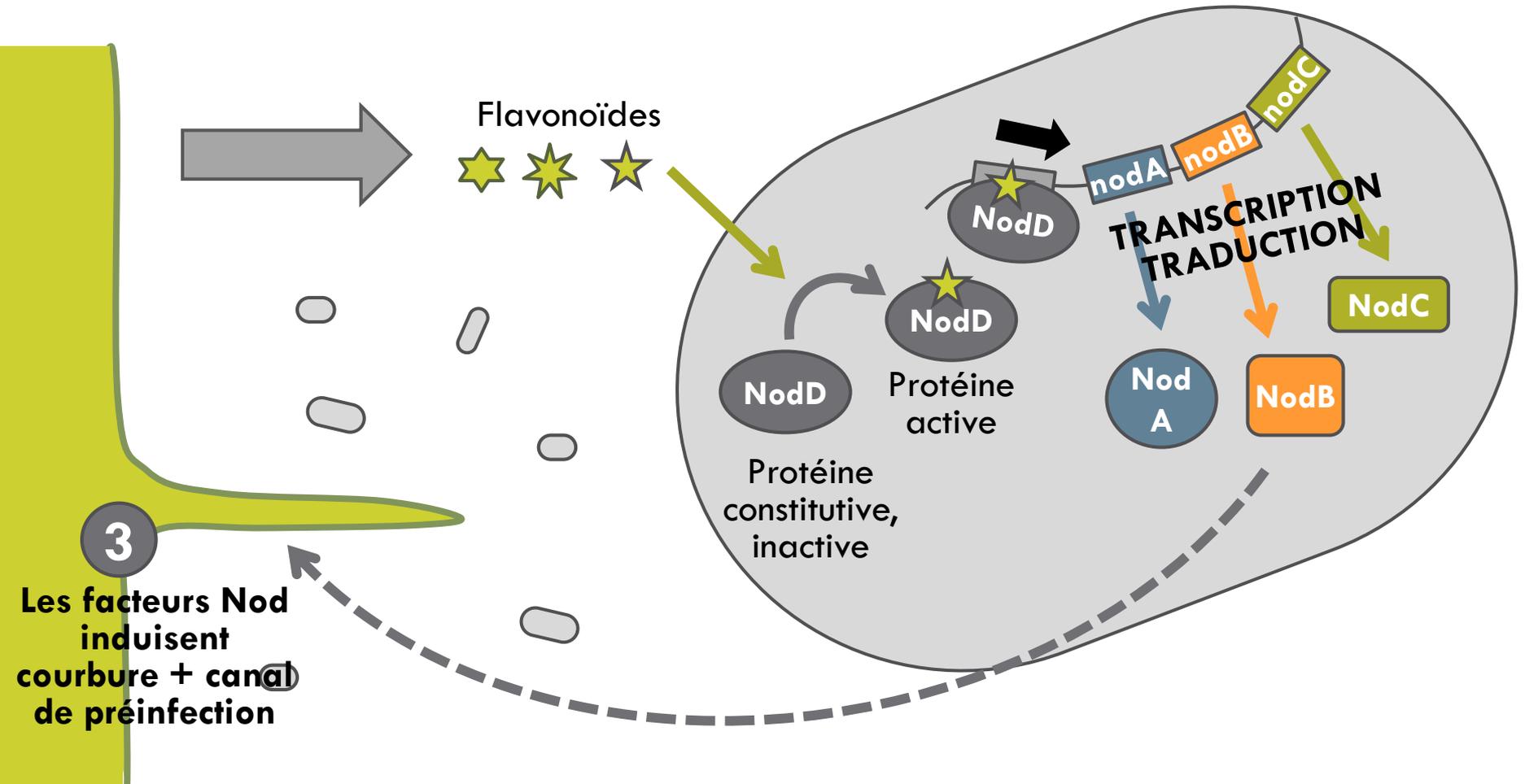
- Etape ② : Les *Rhizobia* excrètent les facteurs Nod



Comment se forment les nodules de *Rhizobia*?

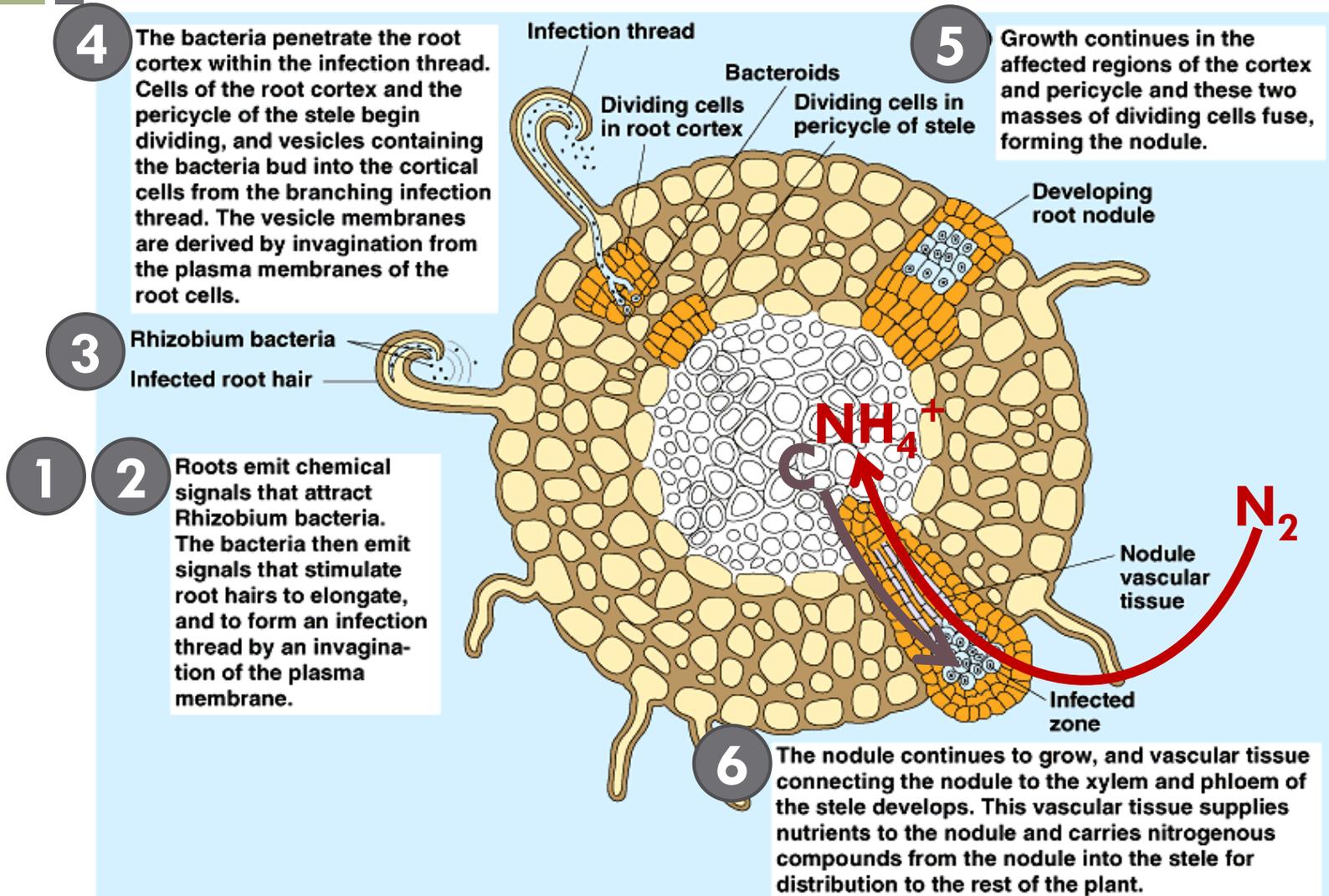
81

- Etape 2 : Les *Rhizobia* excrètent les facteurs Nod



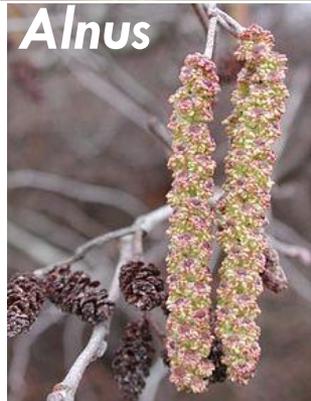
Comment se forment les nodules de *Rhizobia*?

82



Fixation: performances

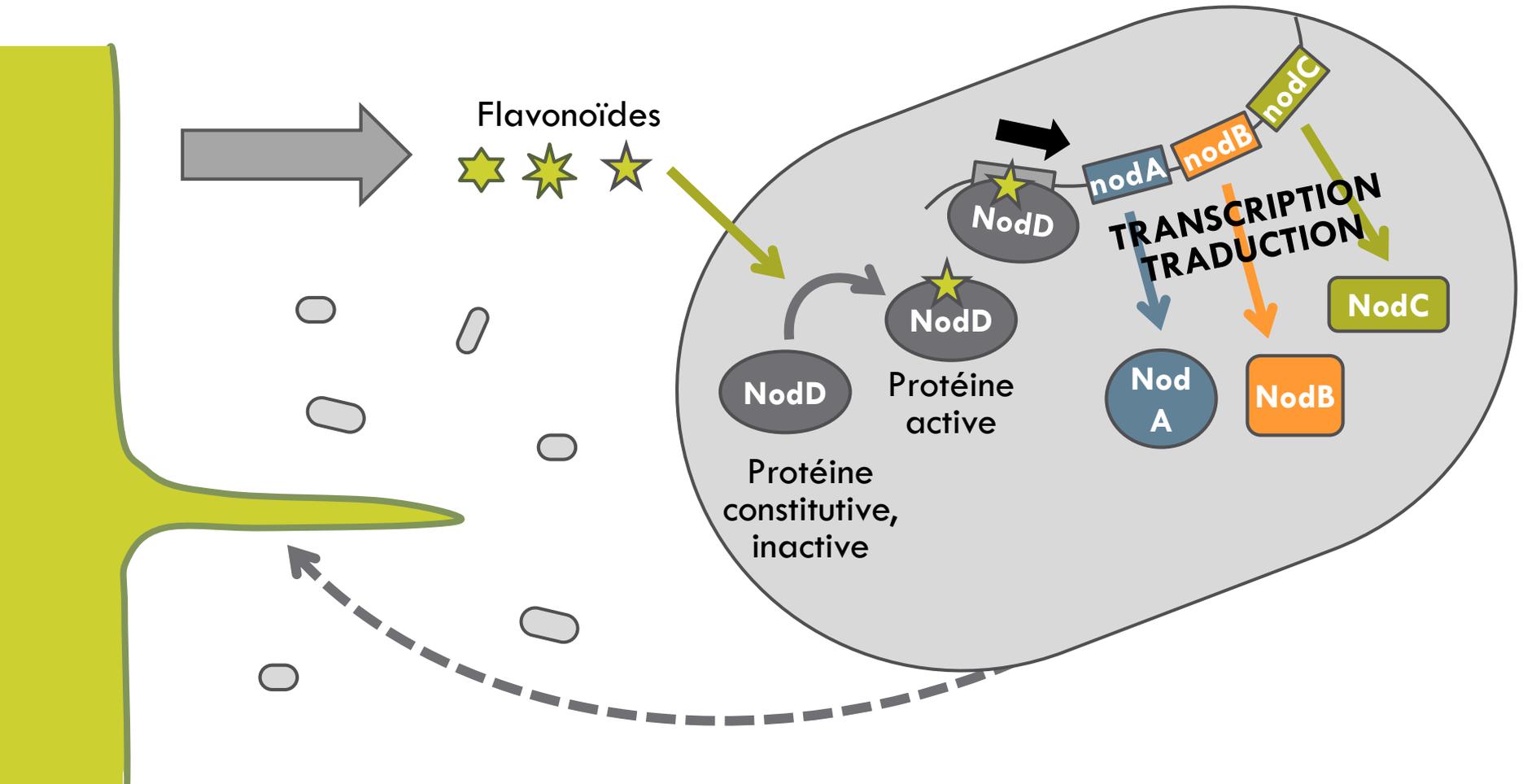
83



Bactéries diazotrophes et associations	N ₂ fixé (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)
Bactéries libres	<1 - 10
Exemple de plante associée à des cyanobactéries <i>Azolla</i>	≤300
Exemples de légumineuses associées à des Rhizobia Soja Haricots Luzerne	60-115 50-100 130-250
Ex. de non-légumineuses associées aux <i>Frankia</i> Alder <i>Ceanothus</i> <i>Hippophae</i>	50-300 50-60 10-60

Qu'est-ce qui détermine la spécificité plante-microorganisme?

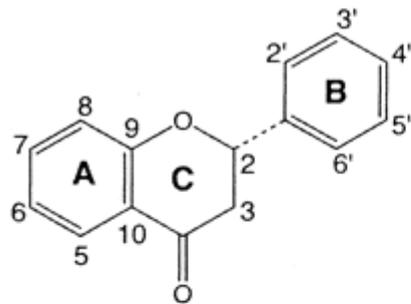
84



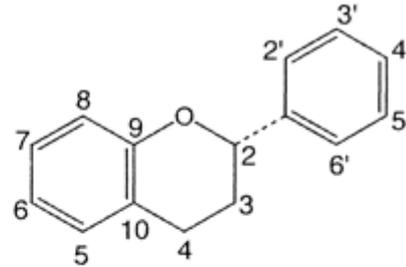
Qu'est-ce qui détermine la spécificité plante-microorganisme?

85

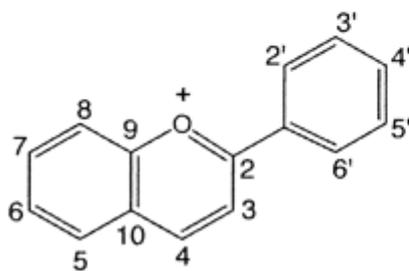
□ Les flavonoïdes:



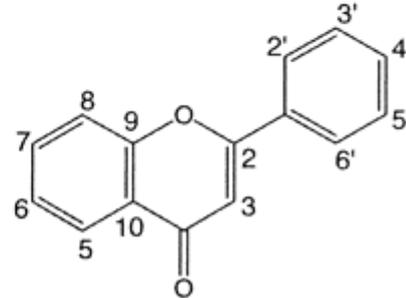
Flavanones



Flavan-3-ols



Anthocyanins



Flavones & Flavonols

Qu'est-ce qui détermine la spécificité plante-microorganisme?

86

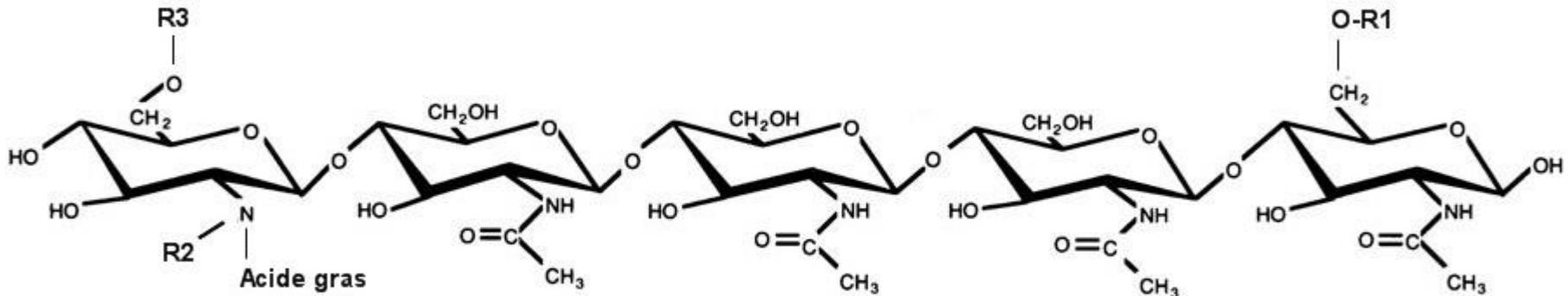
□ Les facteurs Nod

R3 =

H (haricot)
AcO (vesce, pois)
NH₂CO (sesbania)

R1 =

SO₃H (luzerne, haricot)
Méthylfucose (soja)
Arabinose (sesbania)
H (vesce, pois, luzerne)



R2 =

H (luzerne, soja)
CH₃ (haricot, sesbania)

Acide gras =

C16 Δ 2,9 (luzerne)
C18 Δ 2,4,6,11 (vesce)
C18 Δ 11 (soja, haricot, serbania)

Fixation d' N_2 et agronomie

87

- 30 à 300kg d' N /ha/jour
- Rotation des cultures/engrais verts
- Bioaugmentation:

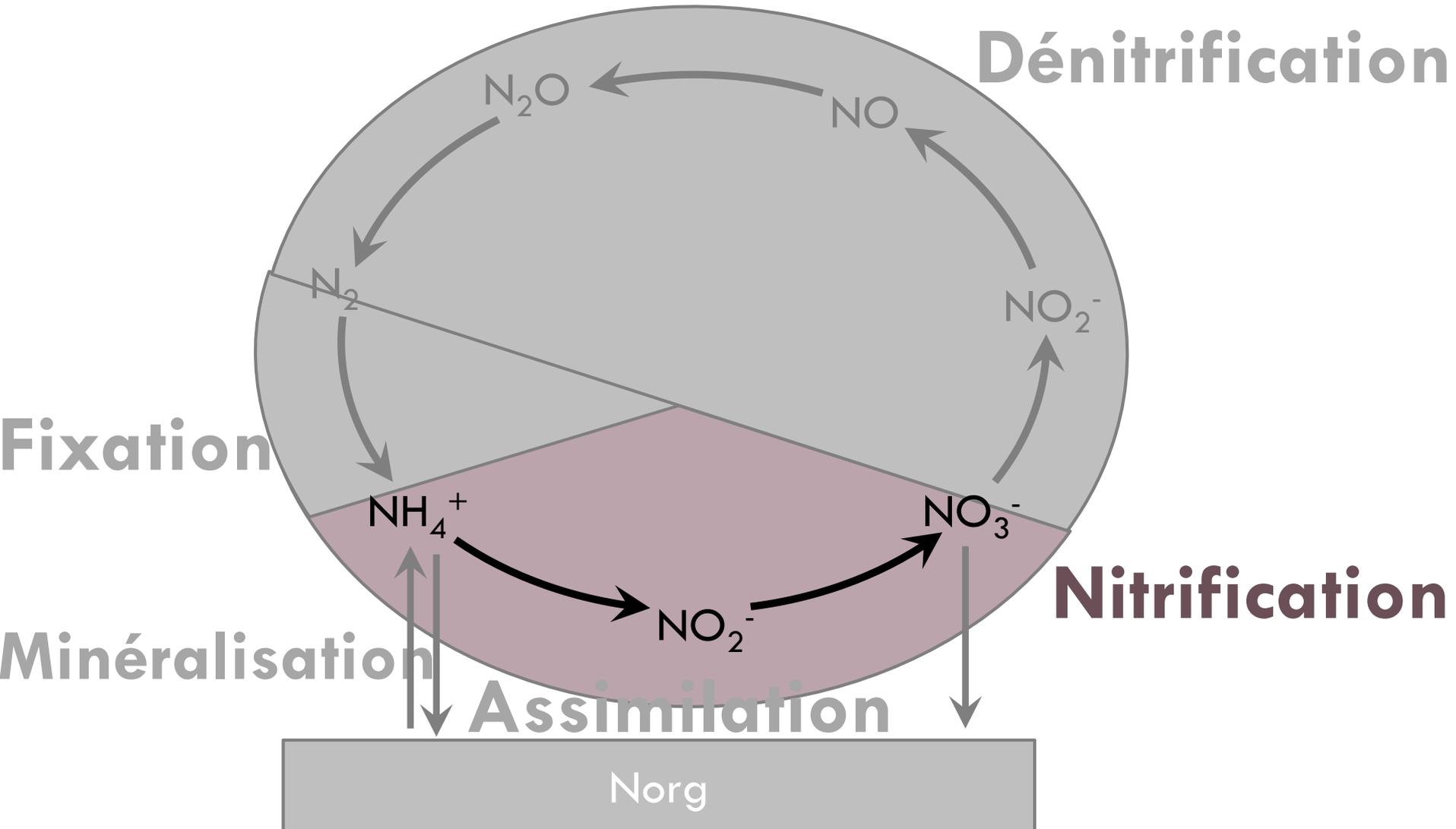


Fig. 3.27: Rice fields in Austria having been treated with Azolla bio-fertilizer which has been found to give the same yields as those treated with chemical nitrogen fertilizers. (SP/FAO)

S. Jeffery, C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke and W. H. van der Putten (eds.), 2010, European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Nitrification

88



Nitrification: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

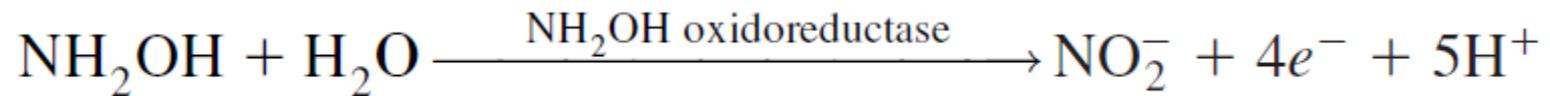
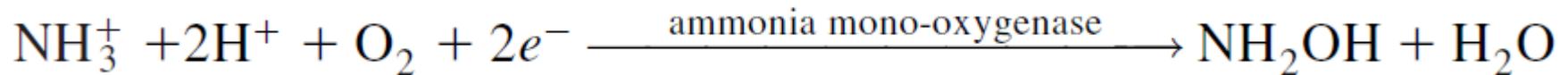
89

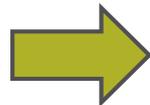
- En absence de fertilisation, nitrate produit *in situ* par nitrification
- Processus majeur:
 - NO_3^- = source azotée pour plantes
 - NO_3^- est plus mobile que NH_4^+
- Aérobie
- Autotrophie majoritaire:
 - AOB: bactéries oxydant l'ammonium
 - NOB: bactéries oxydant les nitrites

Nitrification: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

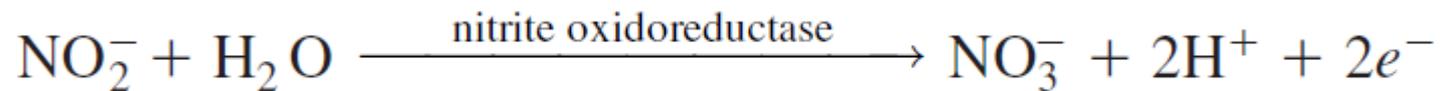
90

- AOB: gène *amoA*, *Nitrosomonas*, *Nitrosovibrio*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*



 **$2e^-$ génèrent énergie**

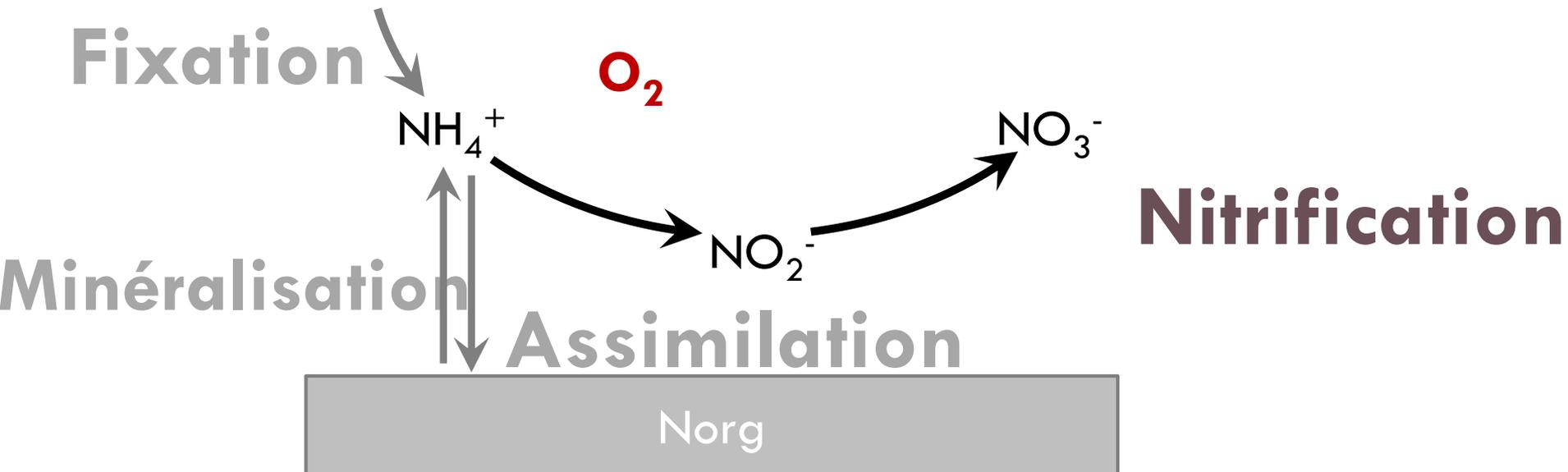
- NOB: gène *nxrA*, *Nitrospira*, *Nitrobacter*, *Nitrospina*



Nitrification: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

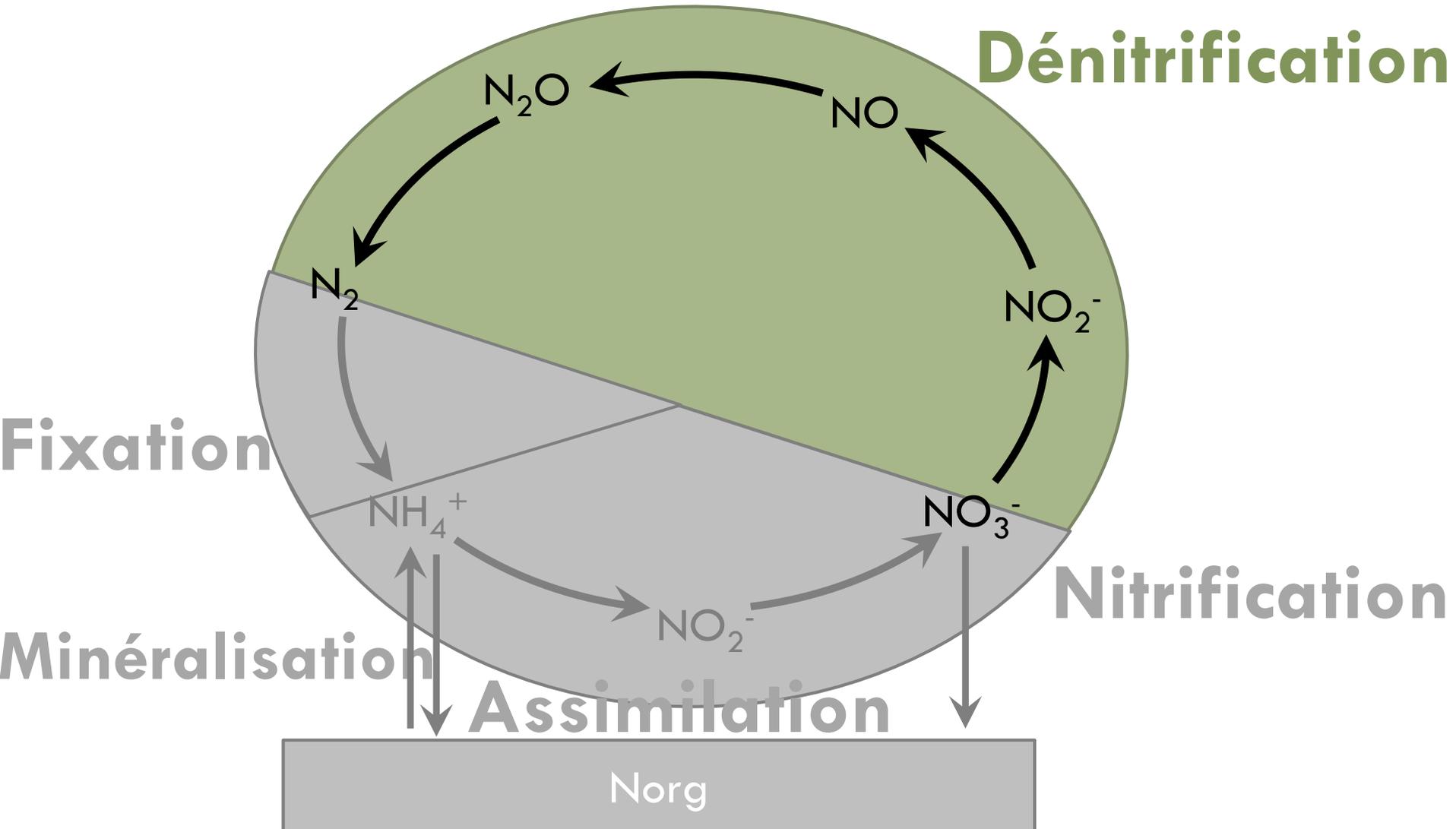
91

- Régulation: disponibilité de NH_4^+ , O_2
- Facteurs environnementaux: humidité, pH,



Dénitrification

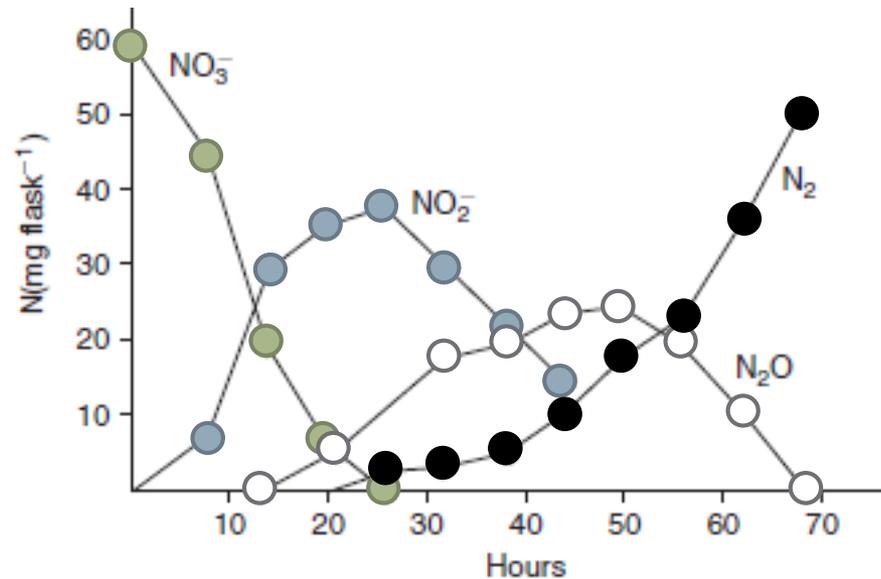
92



Dénitrification: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$

93

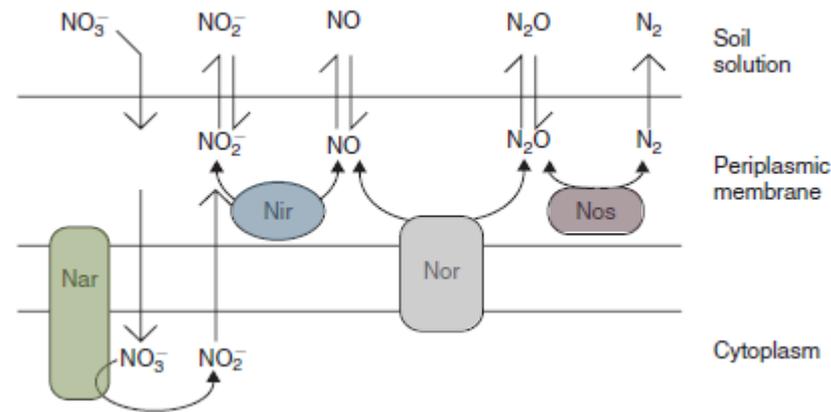
□ Cinétique de dénitrification:



Dénitrification: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$

94

- 4 réactions, 4 enzymes



- Bactéries très diverses, anaérobies facultatives, transmission horizontale des gènes de dénitrification

Dénitrification: exemple de transfert horizontal de gènes

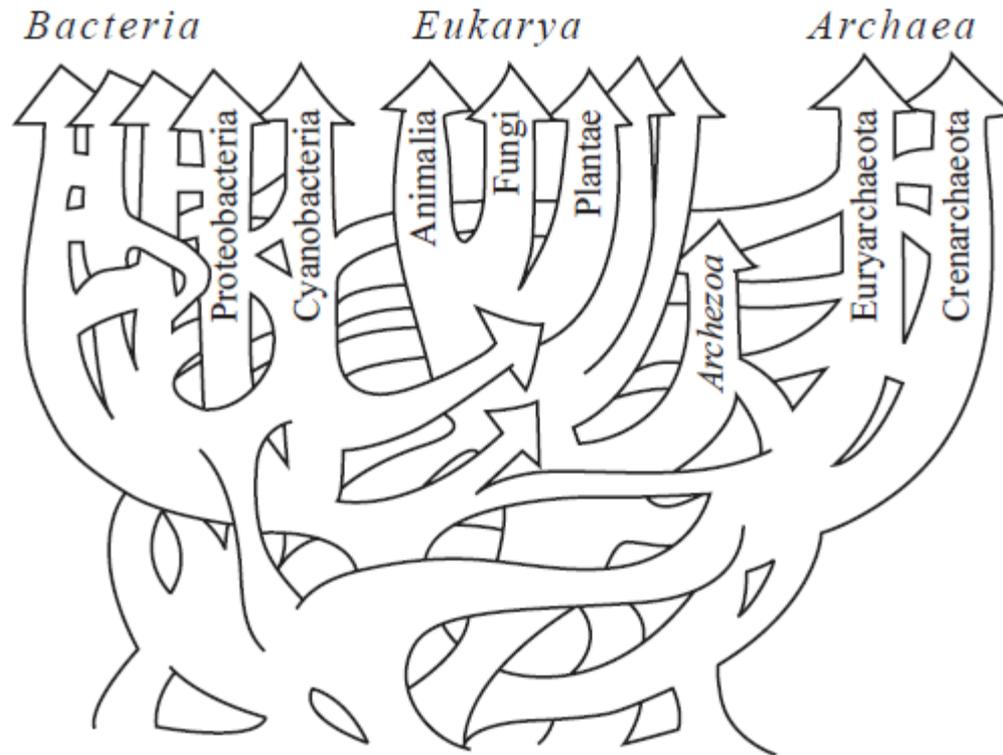
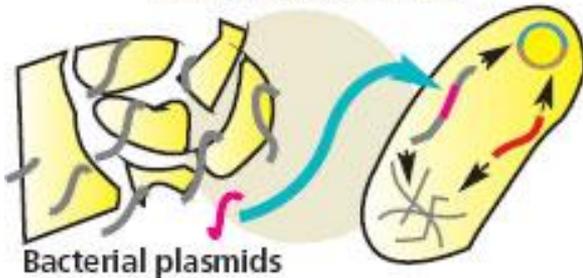


Figure 5.22 A version of the tree of life (based on small subunit rRNA sequences) that incorporates horizontal gene transfer processes in shaping the genetic composition of the three domains, *Eukarya*, *Archaea*, and *Bacteria*. (From Doolittle, R.F. 1999. Phylogenetic classification and the universal tree. *Science* 284:2124–2129. Reprinted with permission from AAAS.)

Dénitrification: exemple de transfert horizontal de gènes

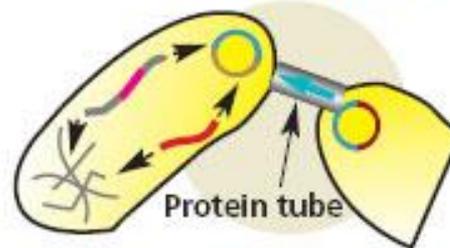
96

TRANSFORMATION



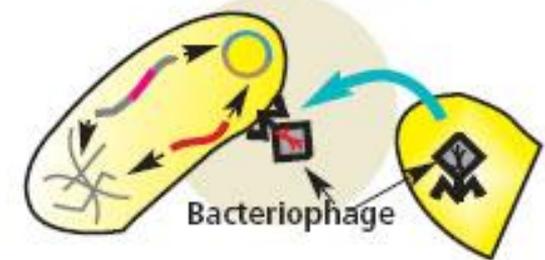
Bacteria acquire new genetic material from the environment

CONJUGATION



It is the process of direct transfer of DNA from one bacterium to another through a protein tube

TRANSDUCTION

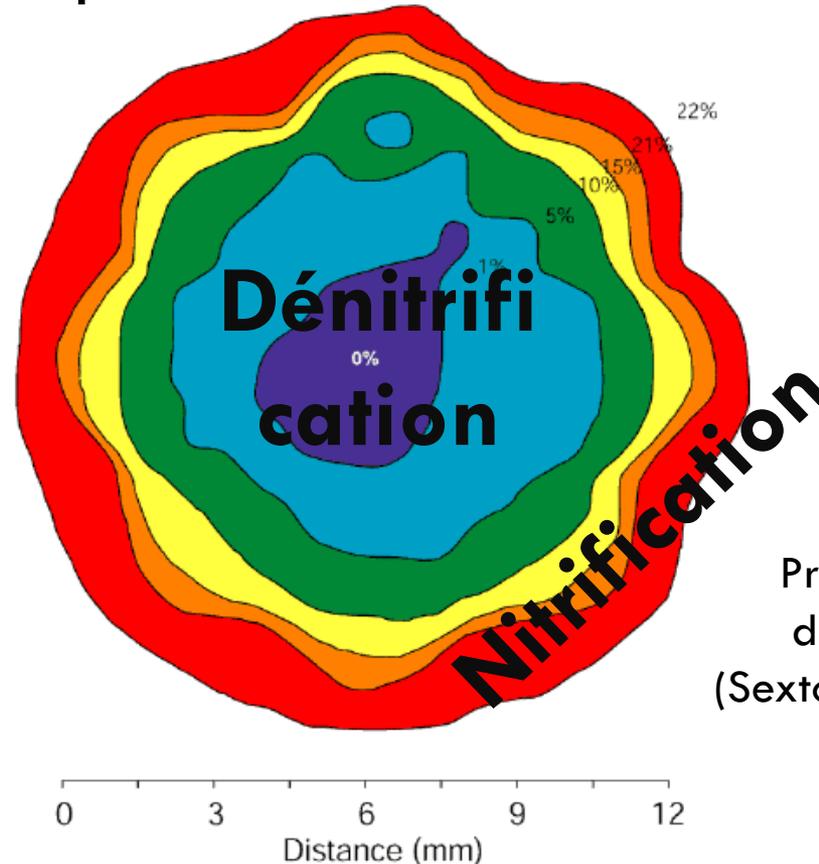
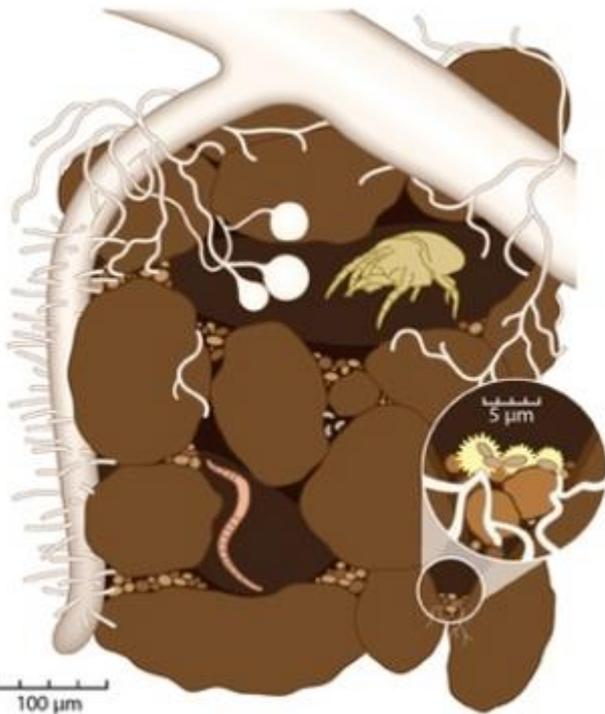


Bacteriophage, viruses that infect bacteria pick up genetic material in the process and pass it on to other bacteria

Dénitrification: régulation

97

- Nitrates comme accepteur d'électrons: absence d'O₂



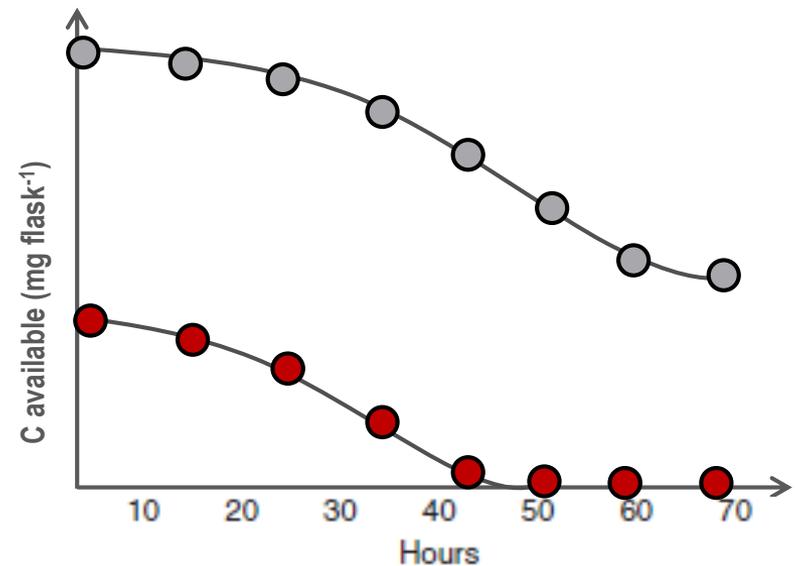
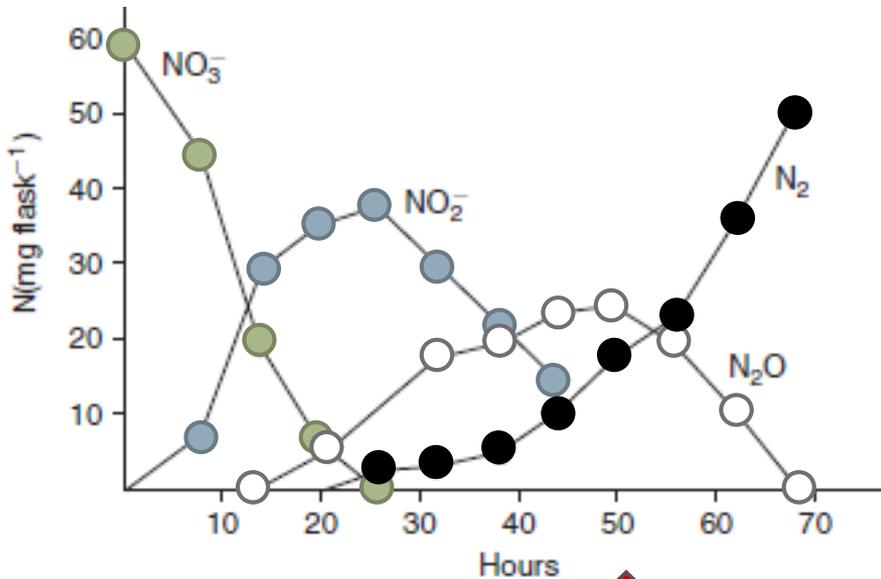
Profil d'O₂ dissout dans un agrégat (Sextone et al., 1985)

L'hétérogénéité du sol est nécessaire!

Dénitrification: régulation

98

- Nitrates comme accepteur d'électrons: absence d' O_2
- Hétérotrophes: suffisamment de C!



C épuisé : émissions de N_2O !!!

Dénitrification: et les Fungi alors?

99



OPEN N₂O production, a widespread trait in fungi

SUBJECT AREAS:
FUNGAL BIOLOGY
GEOCHEMISTRY

Koki Maeda^{1,2}, Aymé Spor², Véronique Edel-Hermann², Cécile Heraud², Marie-Christine Breuil², Florian Bizouard², Sakae Toyoda³, Naahiro Yoshida^{3,4,5}, Christian Steinberg² & Laurent Philippot²

¹NARO, Hokkaido Agricultural Research Center, Dairy Research Division, 1 Hitsujigaoka, Sapporo 062-8555, Japan, ²INRA UMR 1347 Agroécologie, 17 rue Sully, 21065 Dijon Cedex, France, ³Department of Environmental Science and Technology, Tok Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midoriku, Yokohama 226-8502, Japan, ⁴Department of Environmental Chemistry & Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midoriku, Yokohama 226-8502, Japan, ⁵Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Okayama, Meguroku, Tokyo 152-8550, Japan.

Received
28 September 2014

Accepted
12 March 2015

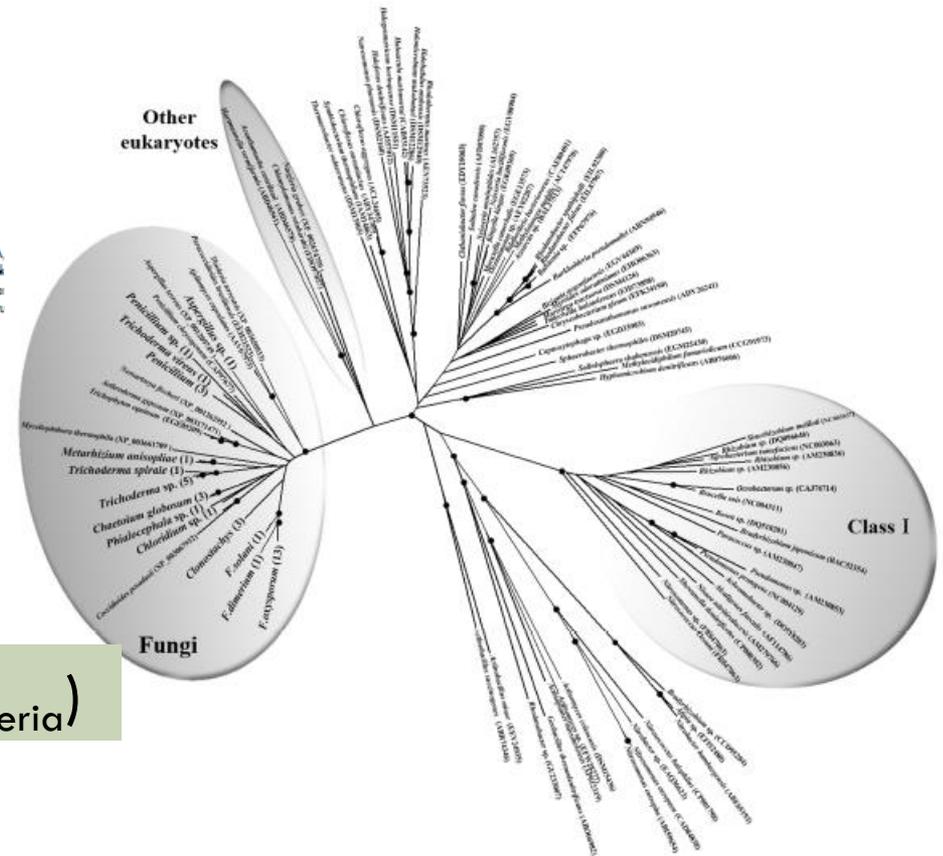
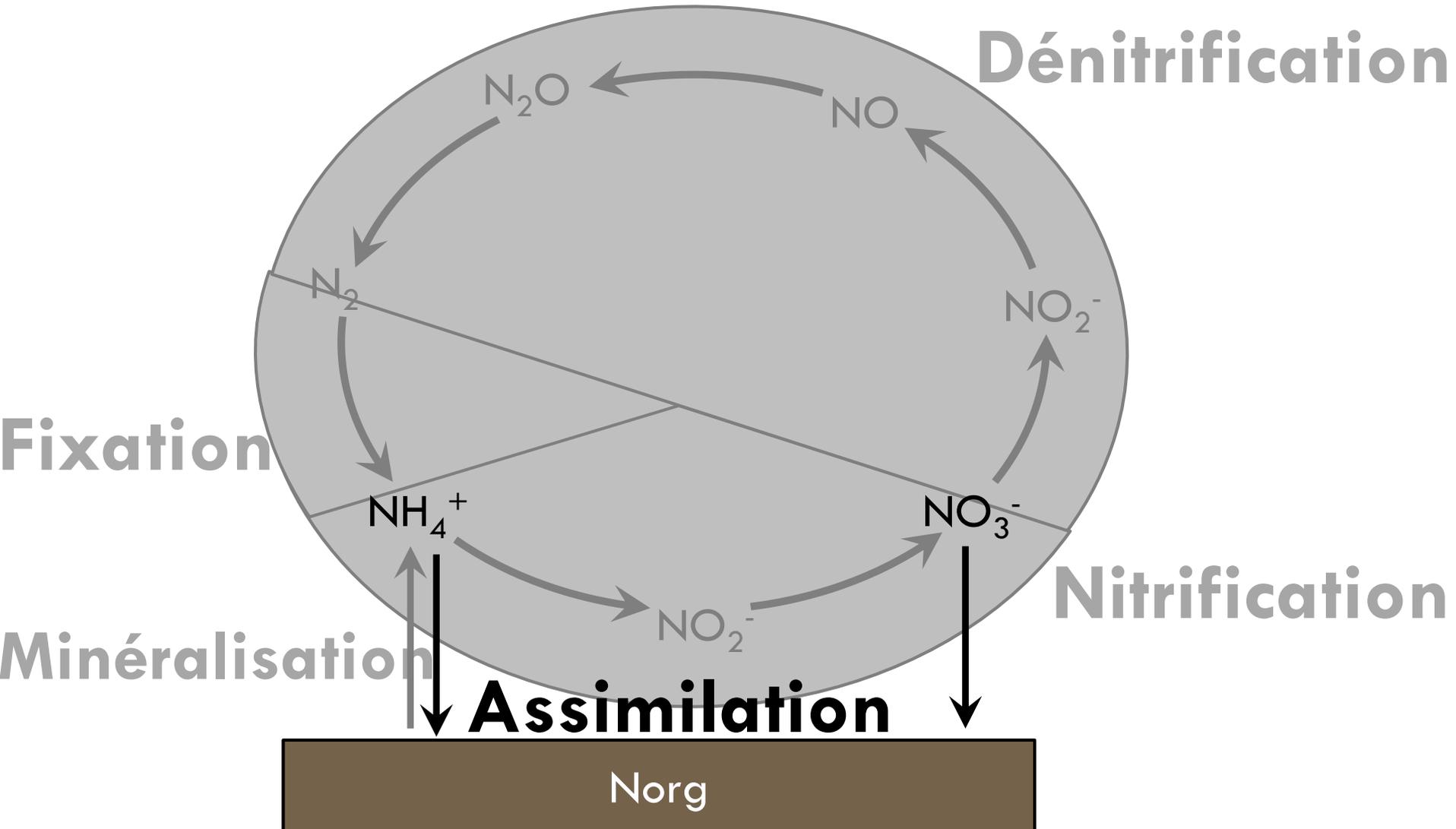


Figure 3 | Neighbour-joining phylogenetic tree of *nirK* amino acid sequences constructed by Clustal W with 1000 bootstrap samplings. Strain names in bold indicate the sequences obtained in this study. The numbers in parentheses indicate the number of the strains. Bootstrap values greater than 75% are indicated as black circles.

$$N_2O_{\text{Fungi}} \leq 18\% (N_2O_{\text{Fungi}} + N_2O_{\text{Bacteria}})$$

Assimilation

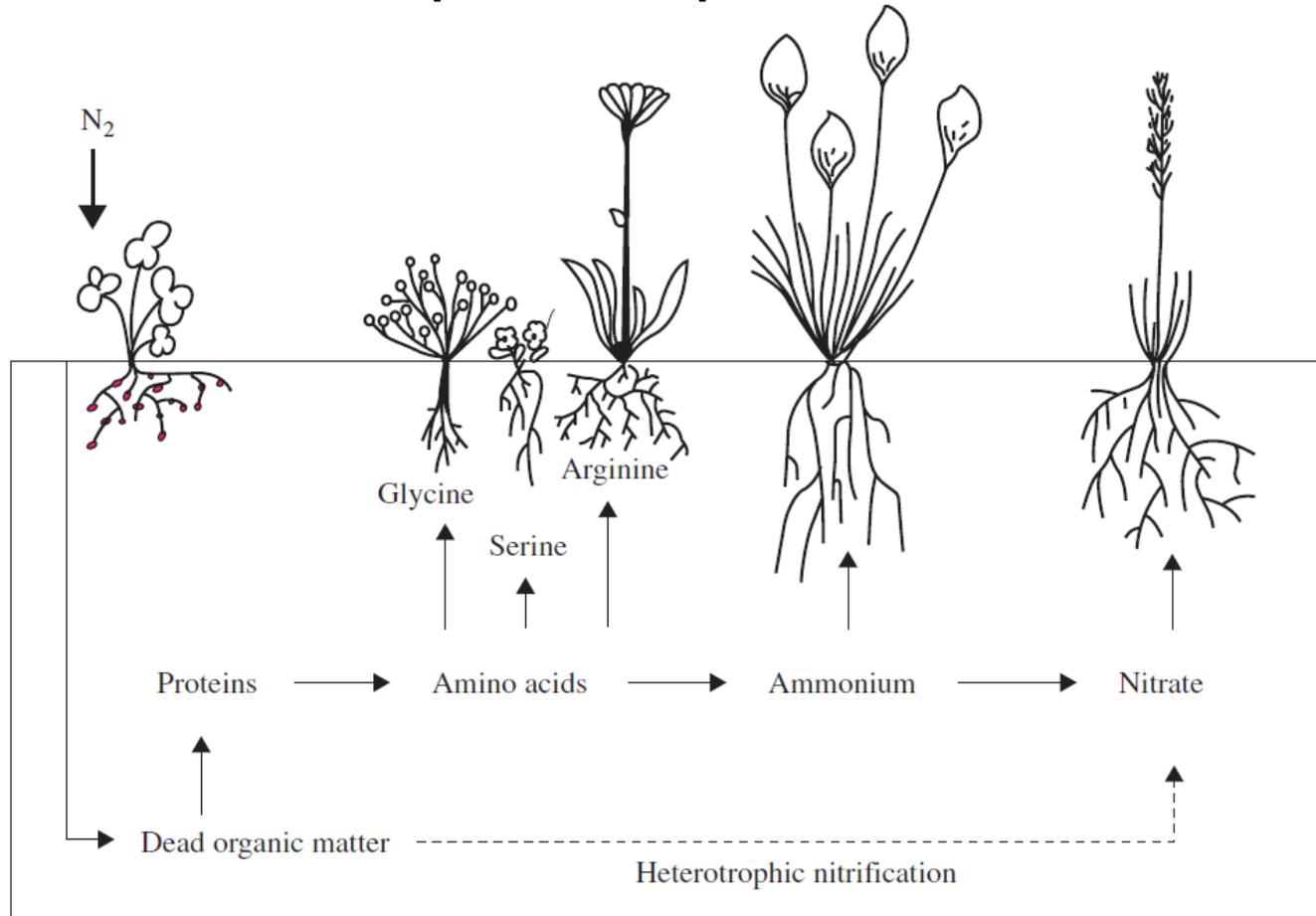
100



Assimilation

101

□ Sources d'azote pour les plantes



Assimilation: symbiose mycorrhizienne

102

- Presque toutes les plantes
- Classification des champignons selon la morphologie

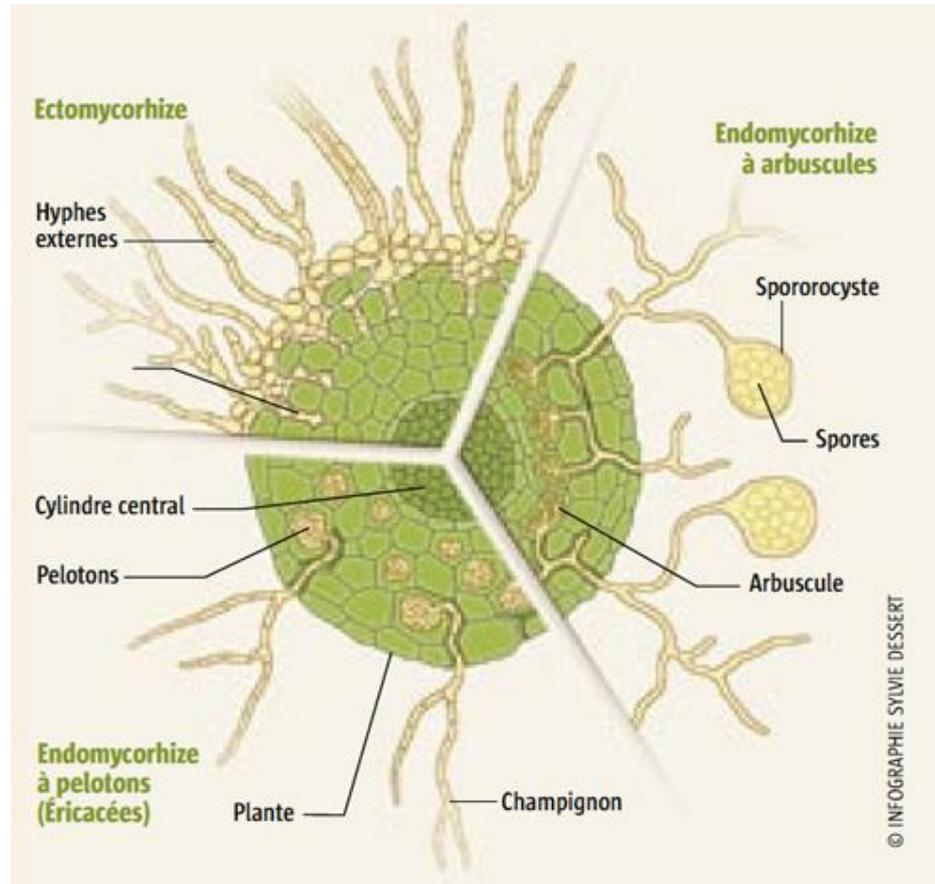
TABLE 10.1 The Classification of Mycorrhizal Associations Based on Fungal Morphology (Modified from Dalpé, 2003)

	Arbuscular		Ecto-	Ectendo-	Arbutoid	Ericoid	Monotropoid	Orchid
Hyphal structures	Arum type	Paris type						
Vesicles	+	+	-	-	-	-	-	-
Arbuscules	+	-	-	-	-	-	-	-
Coils	-	+	-	+	+	+	-	+
Pegs	-	-	-	-	-	-	+	-
Mantle	-	-	+	+	+	-	+	-
Hartig net	-	-	+	+	+	-	+	-
Fungal partners	Glomeromycetes		Zygomycetes, Ascomycetes, Basidiomycetes	Ascomycetes, Basidiomycetes	Basidiomycetes	Ascomycetes	Basidiomycetes	Basidiomycetes
Plant partners	Herbaceous plants, Shrubs, Deciduous trees		Conifer trees, Some shrubs and deciduous trees	Conifer trees, Some shrubs and deciduous trees	Ericales, Pyrolaceae	Ericales, Bryophytes	Monotropaceae	Orchidaceae

Assimilation: symbiose mycorrhizienne

103

- Presque toutes les plantes
- Classification selon la morphologie



Assimilation: symbiose mycorhizienne

104

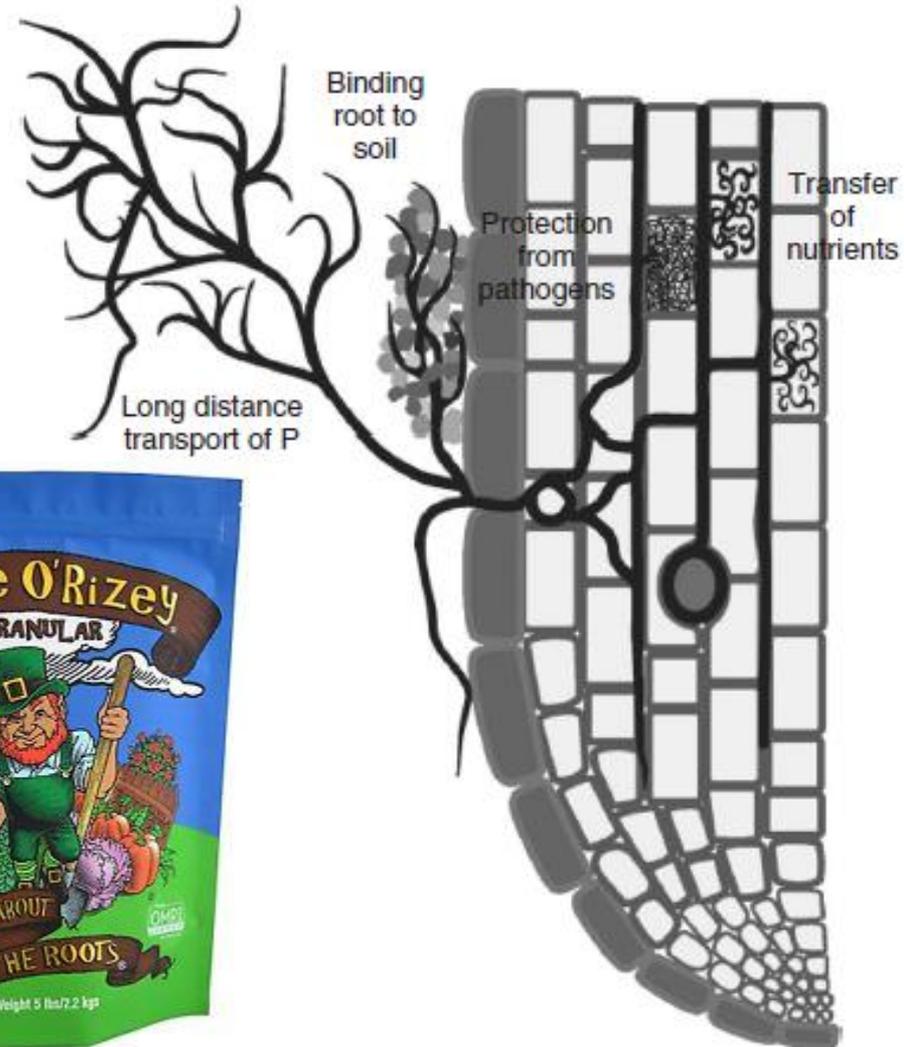
- Presque toutes les plantes
- Classification selon la morphologie
- Mécanisme reconnaissance – infection – colonisation variable (mycelium ou hyphe ou spore)

Assimilation: symbiose mycorhizienne

105

Les hyphes prélèvent les nutriments plus efficacement:

- Surface
- Distance
- Mécanisme

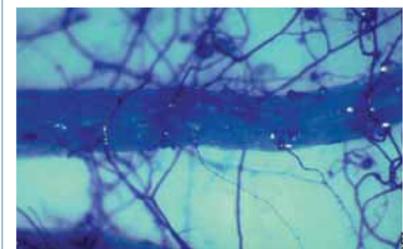


Mycorhizes

Un axe de recherche pour réduire l'apport d'engrais

95% des plantes bénéficient d'une association avec des champignons du sol en formant des mycorhizes. Cette symbiose, qui concerne également les plantes cultivées, décuple leur volume d'exploration du sol et optimise l'absorption d'éléments nutritifs. Certaines pratiques culturales peuvent faciliter la mycorhization. L'Inra développe en outre des programmes de recherche pour inoculer les cultures à grande échelle, une voie qui pourrait réduire considérablement l'apport d'engrais de synthèse.

« **I**l est rare de trouver dans la nature une plante sans mycorhize, plantes cultivées y compris, déclare Silvio Gianinazzi, directeur de recherche émérite du CNRS travaillant à l'Inra, et spécialiste de ce sujet. Cette association entre une plante et un champignon concerne près de 95 % des végétaux. » Partenariat « gagnant-gagnant » apparu au cours



La mycorhization, symbiose entre les racines d'une plante et le mycélium d'un champignon, permet à la plante de prolonger le rayon de prospection des racines et de puiser les éléments nutritifs dans un plus grand volume de sol.

de l'évolution, la mycorhization permet notamment à la plante de compenser son absence de mobilité par une symbiose entre ses racines et le mycélium du champignon. Celui-ci lui permet de prolonger le rayon de prospection des racines et de puiser ainsi les éléments nutritifs dans un plus grand volume de sol. Bien qu'elle soit ancienne, la capacité à former des mycorhizes s'est maintenue au cours du temps pour les plantes comme pour les champignons, qui ont conservé à notre époque les systèmes de compatibilité qui rendent possible cette association. « Les mycorhizes participent à la fertilité biologique des sols. Même dans les sols très pauvres et dégradés, nous en décelons toujours une petite quantité. Il est rare de trouver un sol totalement dépourvu de mycorhizes,

arrière est difficile, explique Silvio Gianinazzi. Nos pratiques agricoles ont malheureusement tendance à leur être défavorables. Ainsi, les molécules utilisées à l'encontre des agents pathogènes des cultures ont aussi une action néfaste (non désirée) sur la microflore bénéfique, créant ainsi un vide qui sera reco-



« Nous estimons que les engrais minéraux pourraient être réduits d'un tiers à un quart selon les types de sols et la nature des cultures si la mycorhization était pleinement valorisée », confie Silvio Gianinazzi, spécialiste des mycorhizes.

lonisé par des espèces indésirables, et notamment des agents pathogènes... » Les sols nus se montrent également défavorables, ainsi que les rares espèces végétales non mycorhizées, la betterave et le colza, deux cultures qui réduisent le pool de mycorhizes de la parcelle si elles reviennent trop régulièrement. En revanche, les couverts intermédiaires révèlent une action positive sur les mycorhizes, et notamment les légumineuses.

Des apports d'engrais réduits d'un tiers !

« Le monde vivant d'un sol offre de nombreux bénéfices à l'agriculture, bien qu'ils ne soient pas toujours mesurés à leur juste valeur, souligne le chercheur. Dans le nouveau contexte dicté par le Grenelle de l'environnement mais aussi dans une recherche de fonctionnement à long terme de nos systèmes agricoles, nous avons tout intérêt à orienter nos efforts de recherche vers

rendu par la flore et la faune du sol. Nous estimons que les engrais minéraux pourraient être réduits d'un tiers à un quart selon les types de sols et la nature des cultures si la mycorhization était pleinement valorisée », ajoute

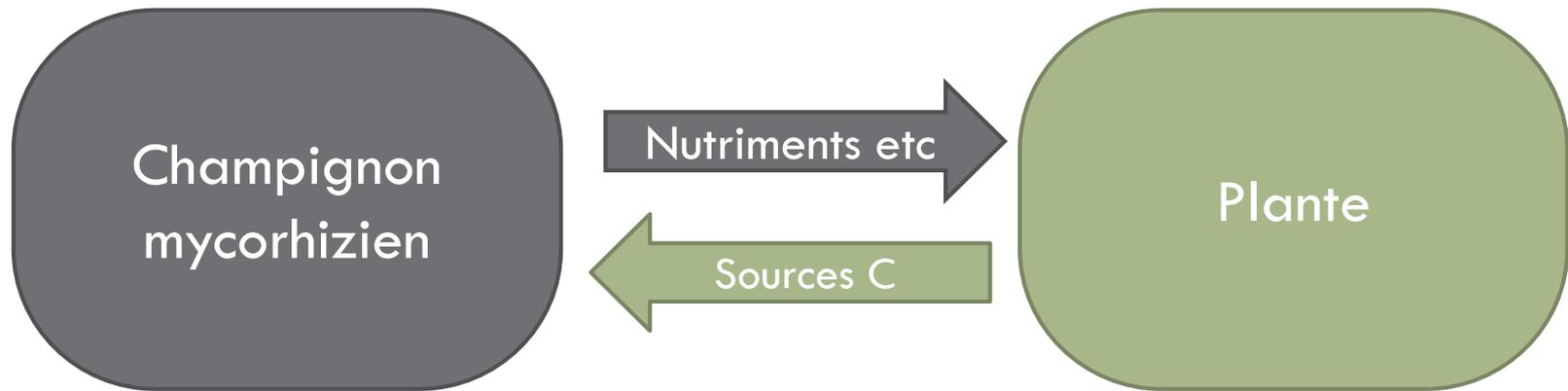
patate douce révèlent en outre une augmentation des teneurs en sucres et en bêta-carotène sur des cultures mycorhizées, soit une amélioration significative de leur qualité alimentaire, une application qui pourrait également concerner d'autres cultures.

L'Inra de Dijon est à la recherche d'un financement pour lancer un programme de recherche qui vise à terme à la production massive de spores de champignons mycorrhizogènes, de manière à pouvoir les formuler sous une forme adaptée aux grandes cultures : enrobage de graines, dispersion par irrigation... « Alors que la production d'inoculum par multiplication de mycorhizes au niveau racinaire peut s'avérer rentable sur des cultures horticoles ou pérennes comme la vigne ou des vergers, pour les grandes cultures nous devons trouver un inoculum qui nous permette d'intervenir sur de grandes surfaces. Or, les investissements financiers sont encore limités en ce domaine », regrette le chercheur. D'autres pays comme l'Inde et la Chine développent activement des recherches en ce sens afin de trouver des alternatives aux intrants de synthèse, trop onéreux pour leur population agricole. « Ces pays pourraient être en mesure de nous donner des leçons à l'avenir... », souligne Silvio Gianinazzi. Il existe un réel potentiel dans cette direction, mais nous sommes encore loin de pouvoir proposer des applications pratiques en grandes cultures. Il revient à la recherche de proposer des alternatives nouvelles aux agriculteurs mais nous sommes nous aussi soumis à des schémas traditionnels de fonctionnement. Le monde du vivant a beaucoup à nous apporter. C'est une voie d'avenir qui mériterait qu'on y consacre davantage de moyens dès à présent », conclut le chercheur.

C. MILOU

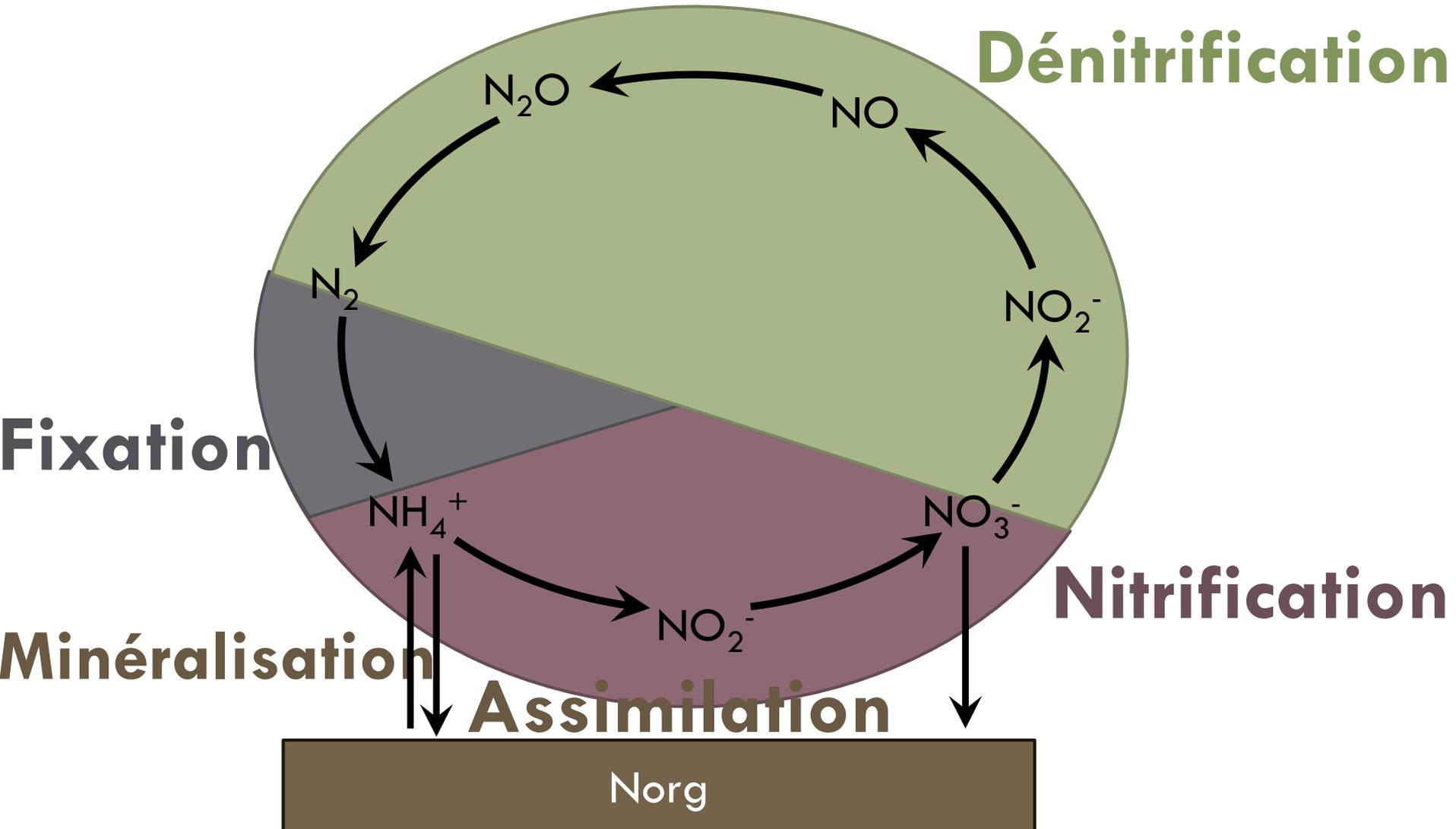
Assimilation: symbiose mycorhizienne

107



Cycles de C et N sont connectés!

108



Cycle de N et Environnement

109

Forme azotée	Source	Vecteur	Impacts
Nitrate	Nitrification Fertilisation Perturbations de la nitrification	Eaux souterraines	Pollution de l'eau potable Eutrophisation
Ammonium	Fertilisant Déchets animaux	Ruissellement Atmosphère	Pollution de l'eau potable Eutrophisation
N ₂ O	Sous-produit de dénitrification (nitrification et anammox)	Atmosphère	Gaz à effet de serre Destruction de l'ozone
NO	Sous-produit de dénitrification (nitrification et anammox)	Atmosphère	Ozone
N organique dissout	Sous-produit de décomposition	Ruissellement Eaux souterraines	Eutrophisation

Question 1: QCM

110

- Quel processus de fixation d'azote est favorisé dans un sol pauvre en matière organique?
 - A: fixation libre
 - B: fixation symbiotique

Question 2: vrai ou faux ?

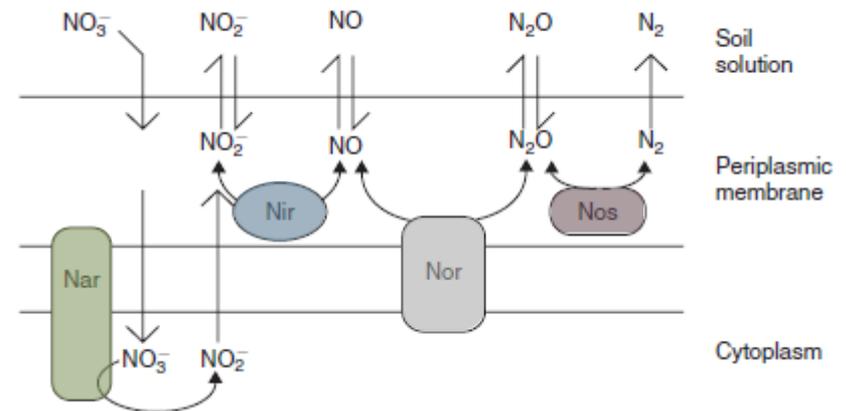
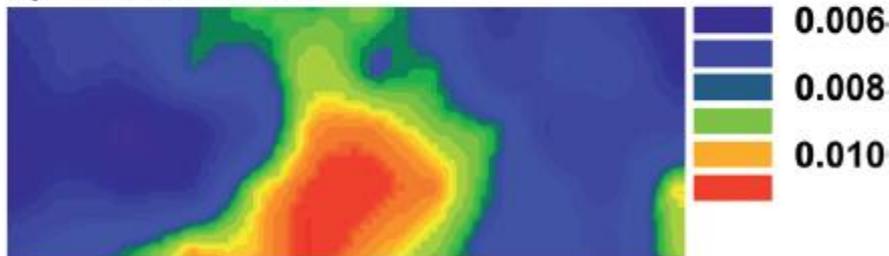
111

- Les zones rouges de cette parcelle seront propices à de fortes émissions de N_2O .

A) *nosZ/narG*



B) *nosZ/16S rRNA*



Mapping field-scale spatial patterns of size and activity of the denitrifier community (Philippot et al., 2009)

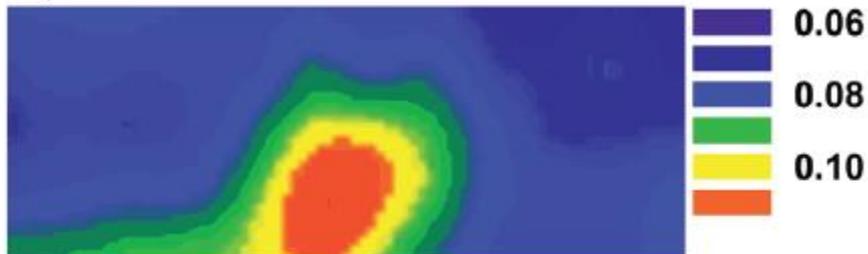
Question 2: vrai ou faux ?

112

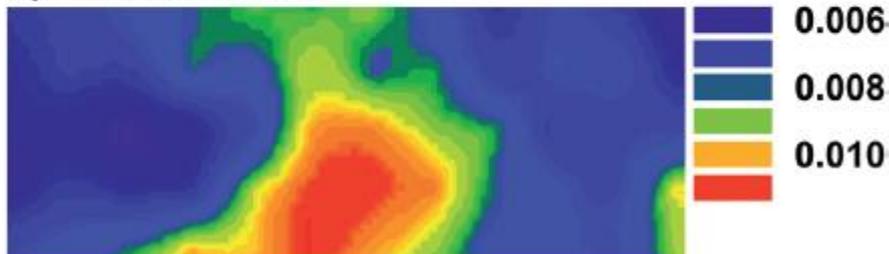
- Les zones rouges de cette parcelle seront propices à de fortes émissions de N_2O .

Faux!

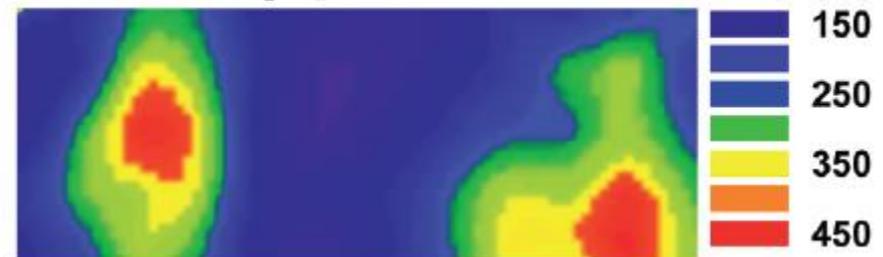
A) *nosZ/narG*



B) *nosZ/16S rRNA*



B) Potential N_2O production



Mapping field-scale spatial patterns of size and activity of the denitrifier community (Philippot et al., 2009)

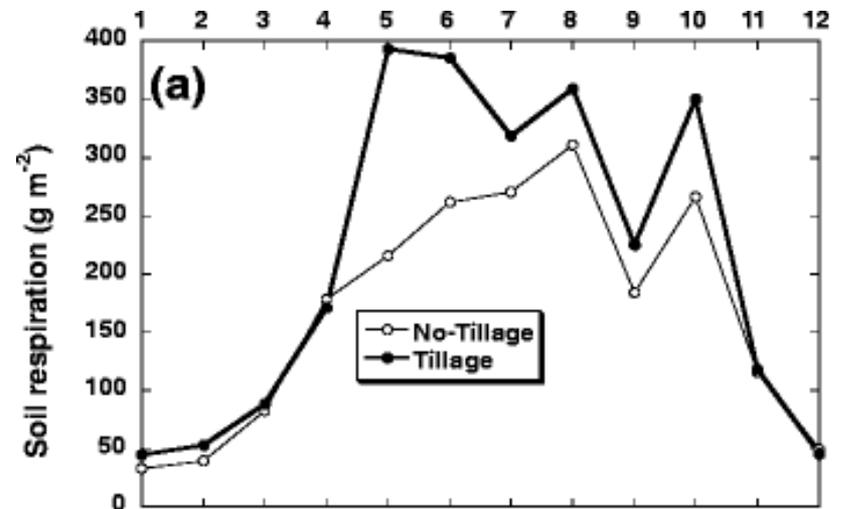
Question 3: QCM

113

□ Quel peut être l'impact du non-labour sur la vitesse de minéralisation de la matière organique?

□ A: accélération

□ B: décélération



Plan du cours

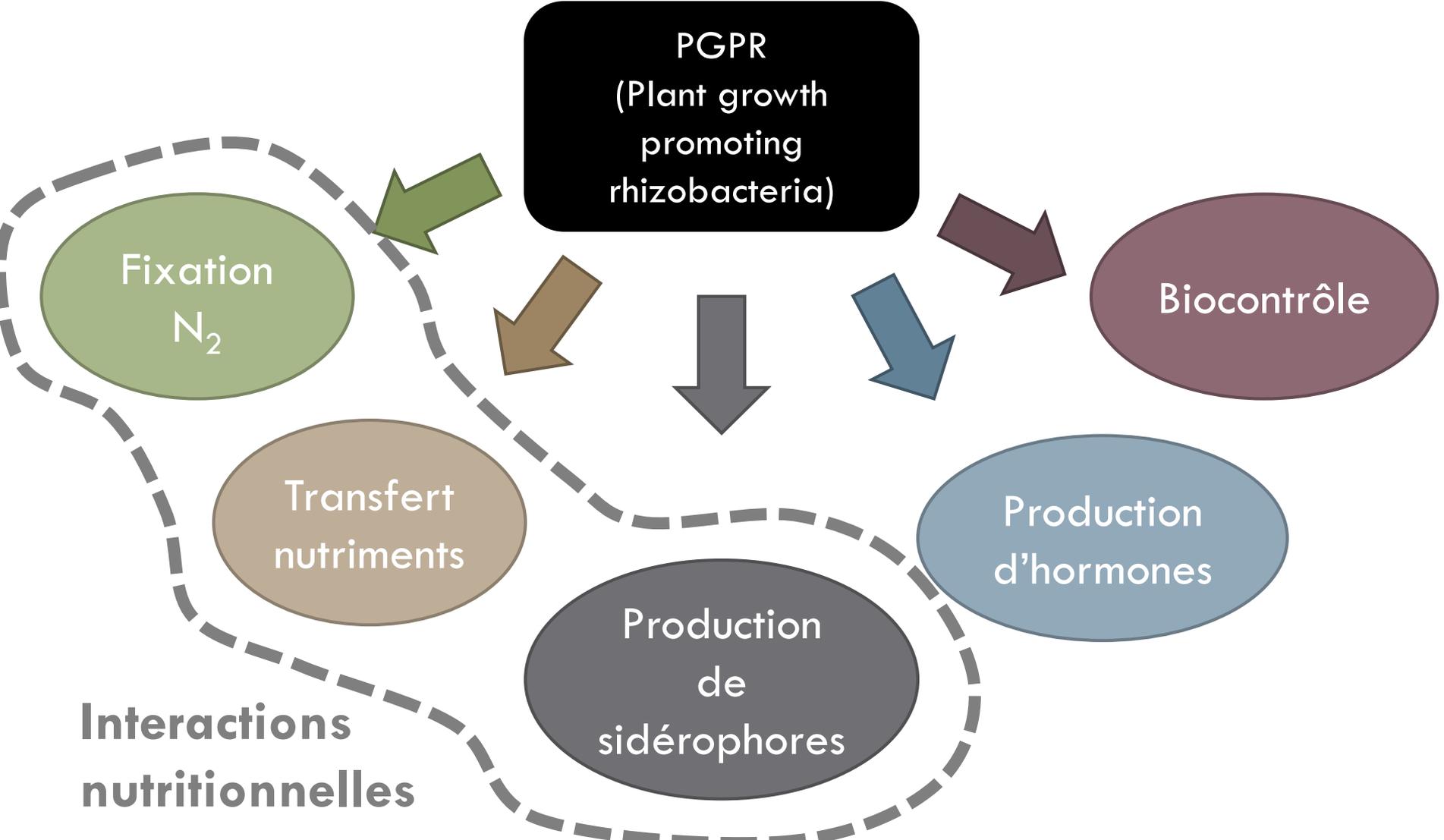
Introduction: écologie microbienne & sol

I. Le cycle du C

II. Le cycle de N

**III. Interactions micro-
macroorganismes**

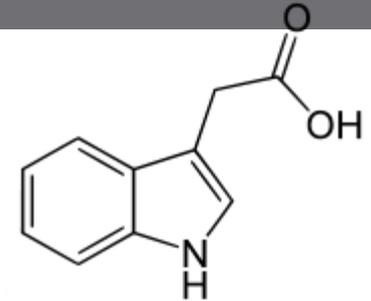
Les PGPR



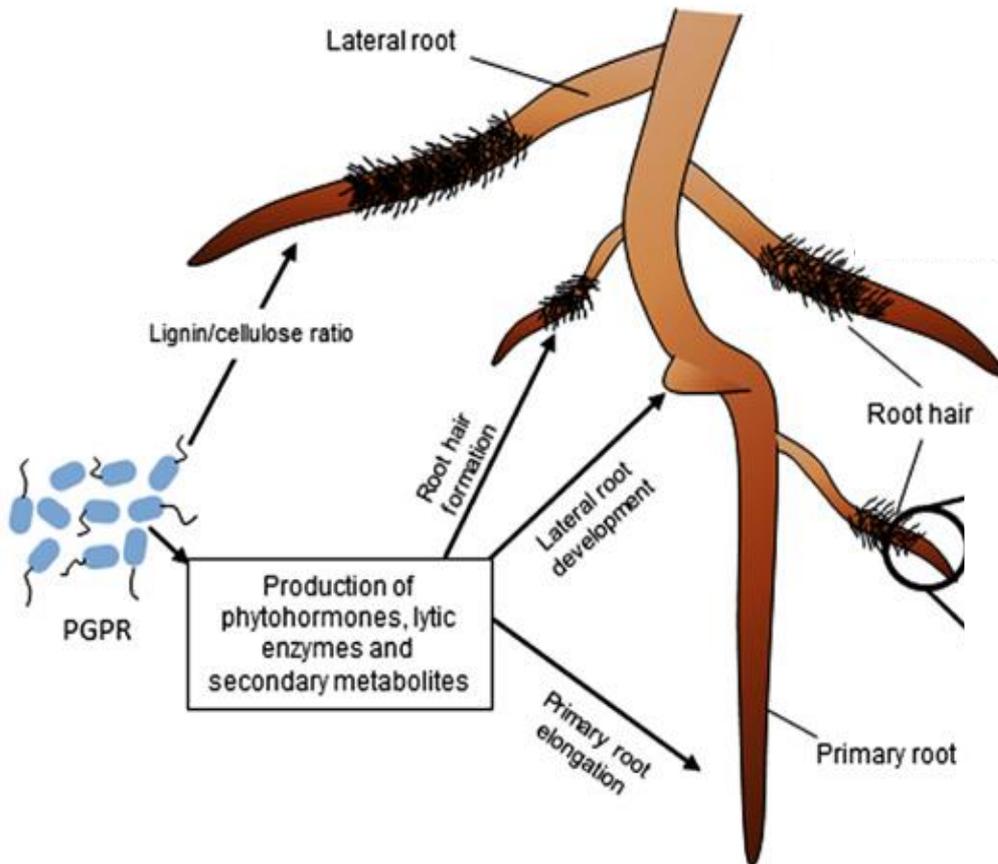
PGPR: Production microbienne de phytohormones

116

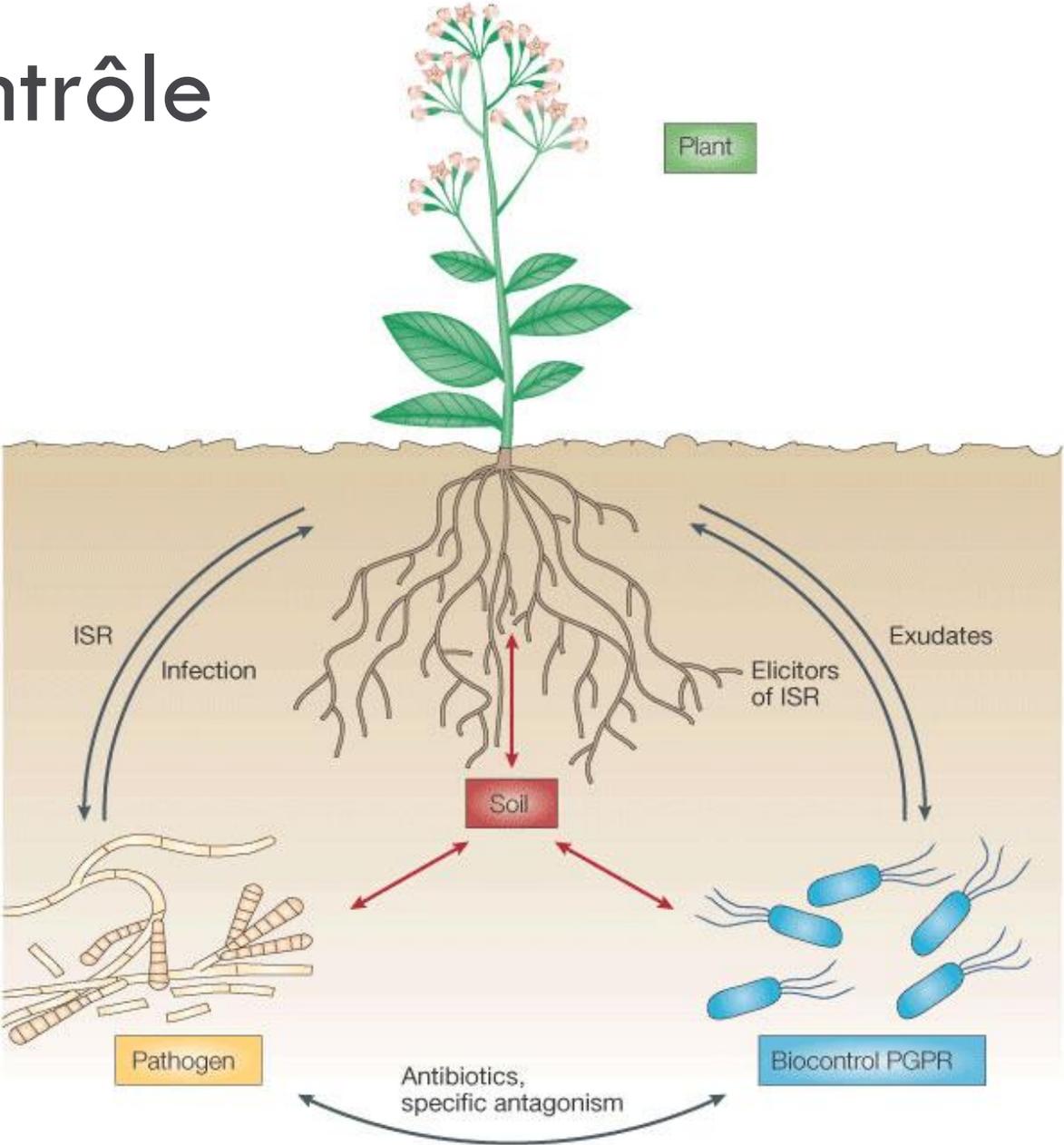
- Auxines (IAA), gibberelins, cytokinines



IAA: indole-3-acetic acid



PGPR: Biocontrôle



PGPR: Biocontrôle

Table 4.3: Antagonistic fungi and bacteria included in Annex 1 of Directive 91/414/EEC and authorised at national level for the biological control of soil-borne diseases in several European countries. (Up to date March 2010)

Microorganism	Target
<i>Coniothyrium minitans</i> CON/M91-08	<i>Sclerotinia minor</i> , <i>S. sclerotiorum</i>
<i>Gliocladium catenulatum</i> J1446	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> MA 342	Seed and soil-borne pathogens of cereals
<i>Pythium oligandrum</i> M1	Main soil-borne pathogens and some foliar pathogen
<i>Streptomyces</i> K61 (formerly <i>S. griseoviridis</i> K61)	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>Trichoderma asperellum</i> ICC012 (formerly <i>T. harzianum</i> ICC012)	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>T. asperellum</i> T11 (formerly <i>T. viride</i> T-25)	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>T. asperellum</i> TV1 (formerly <i>T. viride</i> TV1)	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>T. atroviride</i> T-11 (formerly <i>T. harzianum</i>)	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>T. gamsii</i> ICC080 (formerly <i>T. viride</i> ICC080)	Wide range of fungal soil-borne pathogens
<i>T. harzianum</i> T-22	Wide range of fungal soil-borne pathogens

Bactéries pathogènes

119



Figure 26.26 *Agrobacterium*. *Agrobacterium*-caused tumor on a *Kalanchoe* sp. plant.

Champignons pathogènes

120

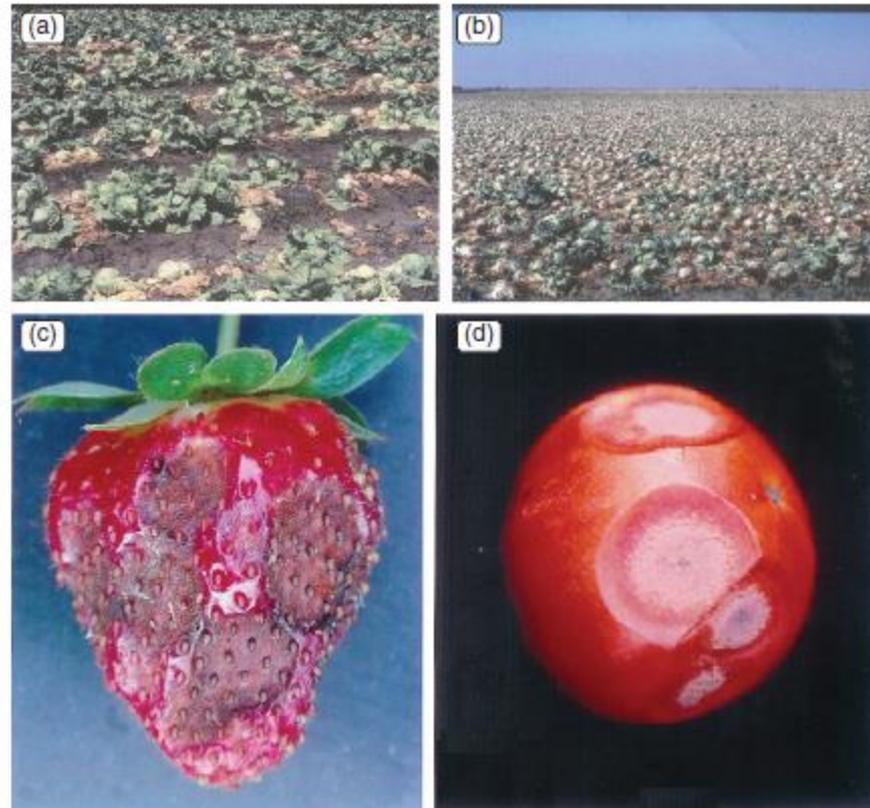


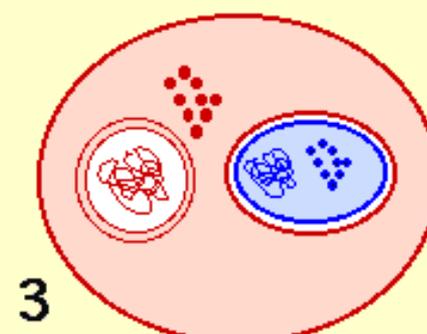
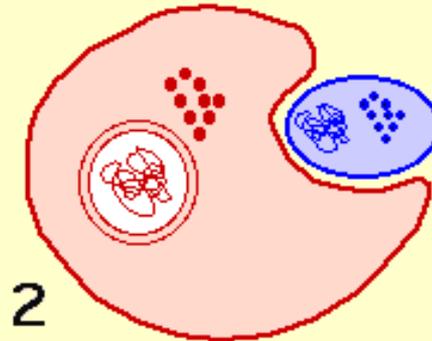
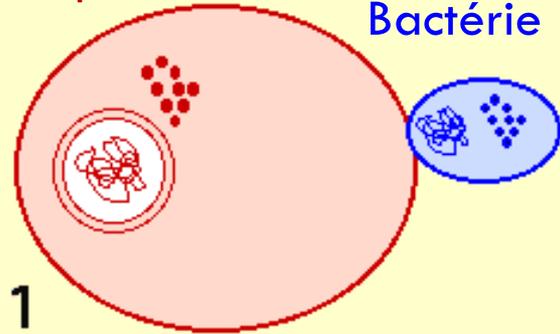
Figure 12 Early (a) and later (b) stages of lettuce infection with the ascomycete *Sclerotinia sclerotiorum* that resulted in total loss of the lettuce crop. (c) Strawberry and (d) tomato fruit showing, at first, lesions and later total rotting following infection of the fruit by the ascomycete *Colletotrichum* as the fruits approach maturity. Photos: (a) and (b) courtesy of KV Subbarao, University of California, Salinas; (c), L Legard; (d), RJ MacGovern, both University of Florida. Reproduced from Agrios GN (2005) *Plant Pathology*, 5th edn. Burlington, MA: Elsevier/Academic Press, (a) and (b) p. 271, (c) p. 490, (d) p. 489.

Interaction & évolution: endosymbiose

121

Cellule eucaryote
primitive

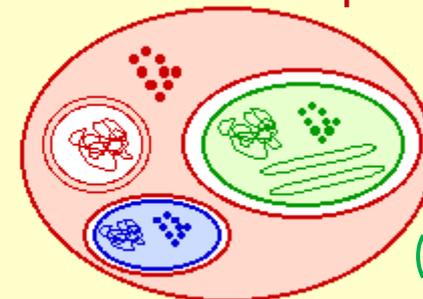
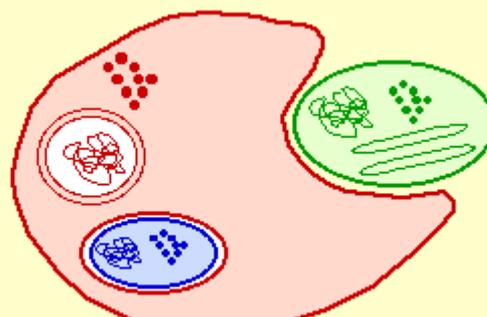
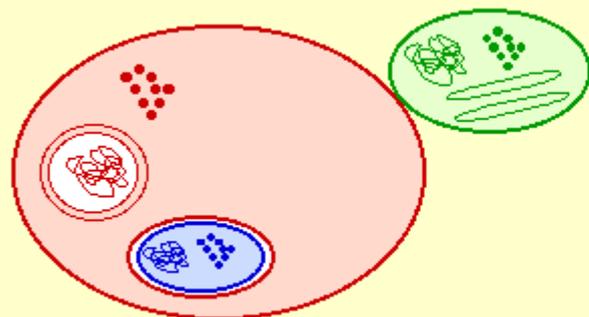
Bactérie



Mitochondrie
(respiration)

Cellule eucaryote
hétérotrophe

Bactérie
photosynthétique

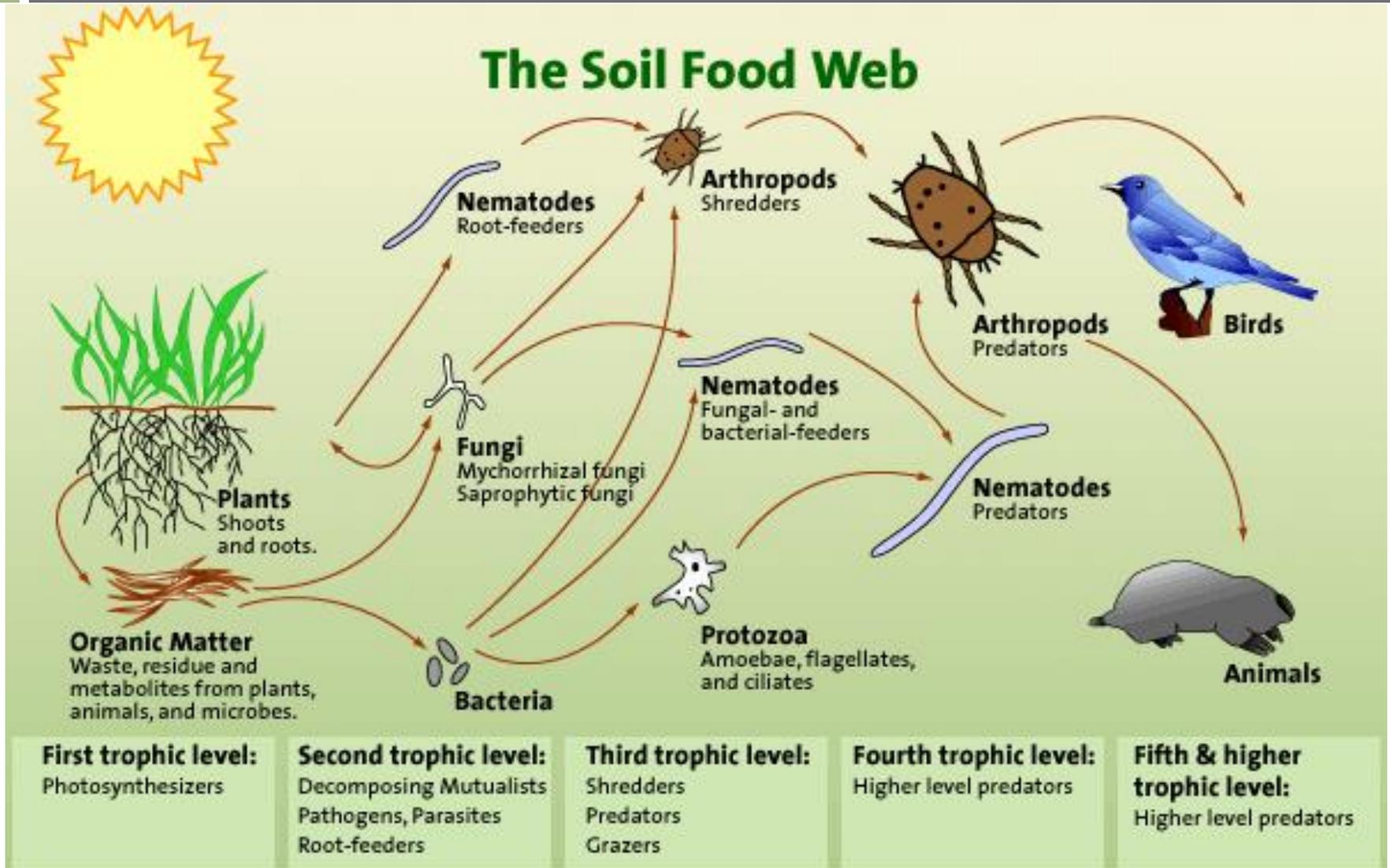


Cellule eucaryote
phototrophe

Chloroplaste
(photosynthèse)

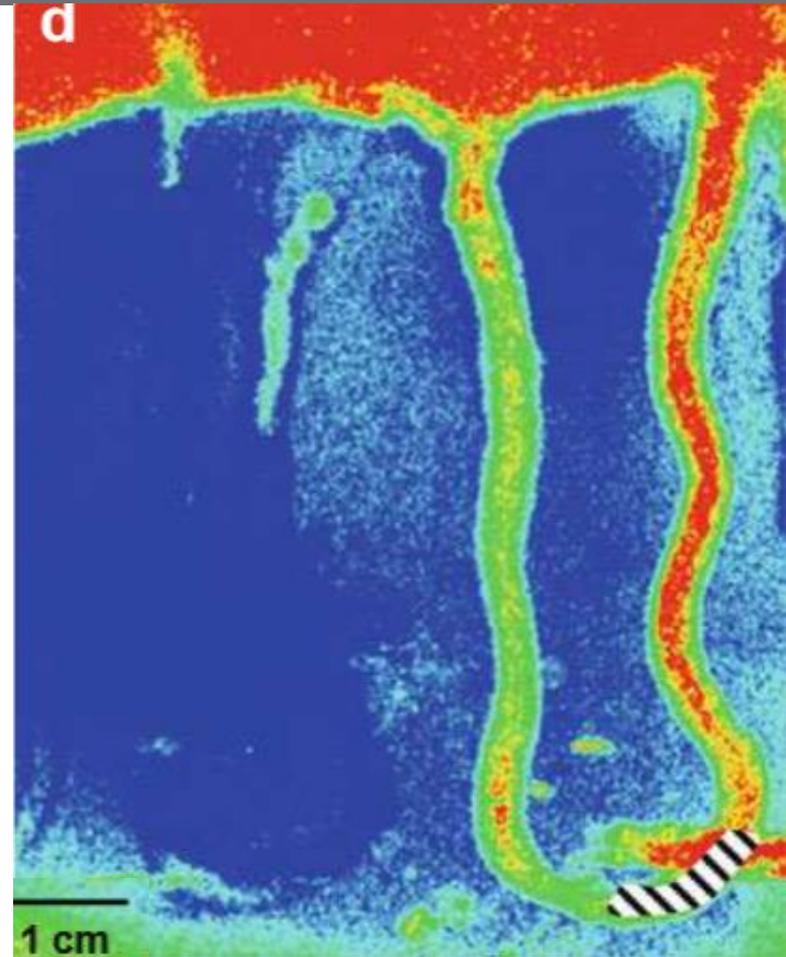
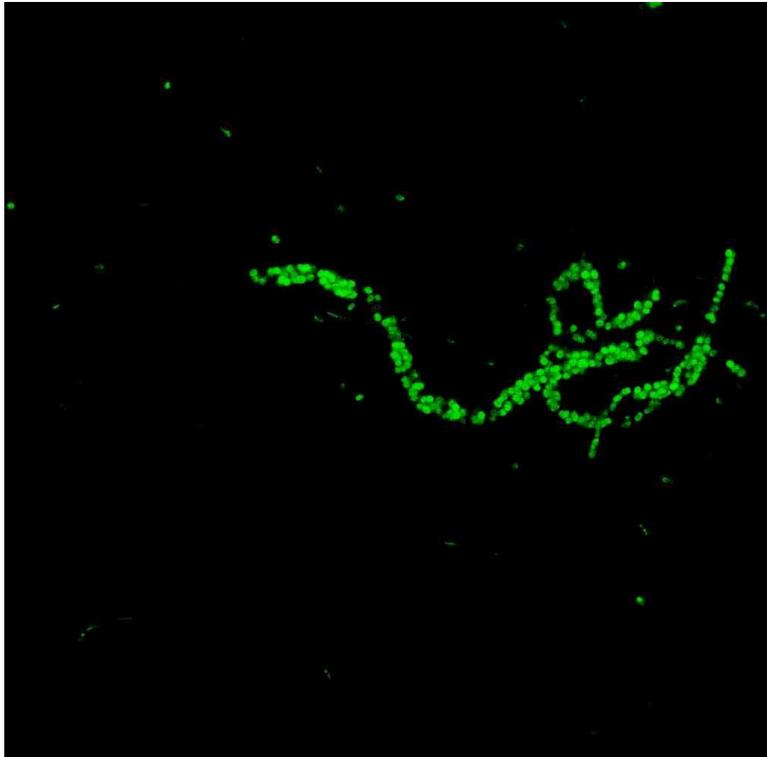
Interactions micro - macroorganismes

122



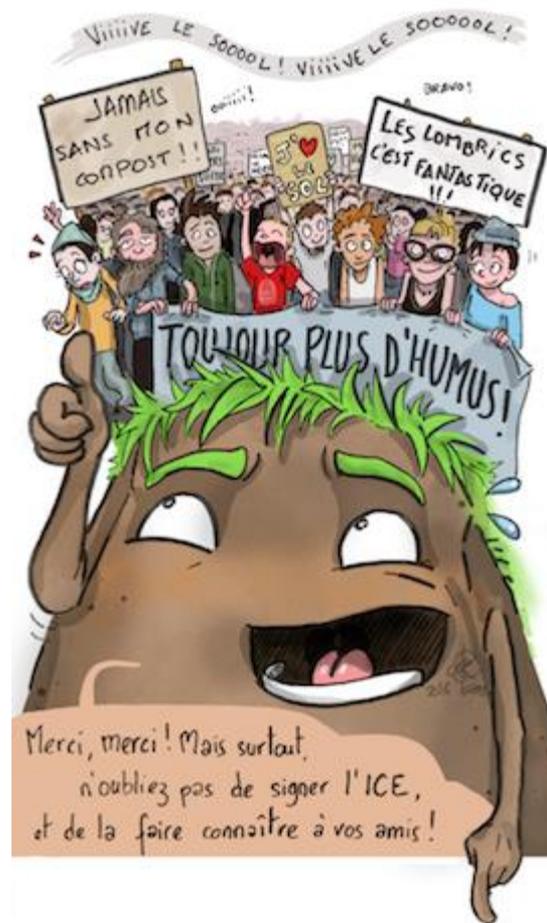
Interactions micro - macroorganismes

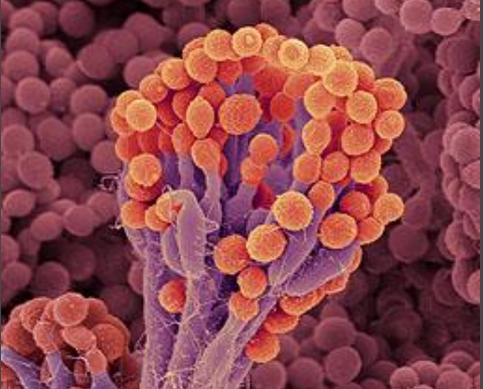
123



Pischedda, L, Cuny, P, Esteves, JL, Poggiale, JC and Gilbert, F. Spatial oxygen heterogeneity in a *Hediste diversicolor* irrigated burrow. (2012). *Hydrobiologia*, vol. 680 (n° 1). pp. 109-124.

IL Y A PLUS D'ÊTRES VIVANTS
DANS UNE CUILLÈRE DE SOL QU'IL
N'Y A D'HUMAINS SUR TERRE!





DES QUESTIONS ???

→ FORUM MOODLE

Maialen BARRET, MCF INPT-ENSAT