

**Cours de Microbiologie Générale**  
**LV342 Cours 3**  
**Écologie microbienne**  
**Interactions avec d'autres organismes**

**Catherine Esnault, Maître de Conférences**

**Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)**

**UFR 927 Sciences de la Vie**

**Licence de Sciences et Technologie**

**Mention Sciences de la Vie L3**

# Écologie microbienne

## Les questions posées :

- **Activités des microorganismes dans l'environnement**
- **Comment ces activités sont mesurées**
- **Description de ces microorganismes**
- **Localisation**
- **Activité permanente ou intermittente**

## Importance de l'écologie microbienne :

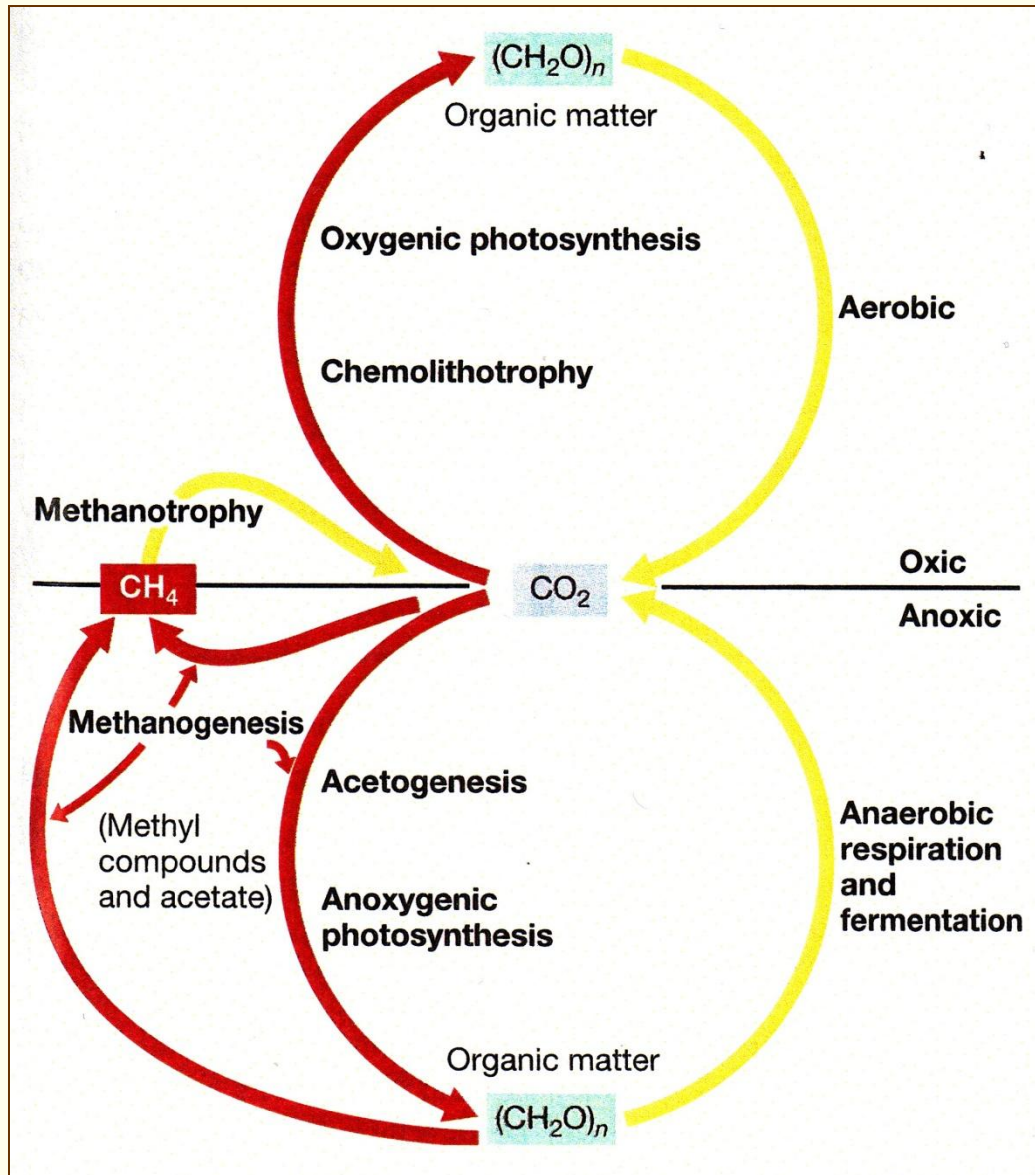
- **Colonisation de tous les écosystèmes par les microorganismes**
- **Activités uniques des bactéries et des archées**
- **Les plus anciens organismes vivants sur la terre :**
  - Âge de la terre : 4.5 milliards d'années
  - Âge des premiers microorganismes : 3.5 milliards d'années
  - Datation dans les stromatolites (roches sédimentaires)

# Les cycles géochimiques

- **Les environnements :**  
eaux douces et marines (hydrosphère),  
air (atmosphère),  
terrestre (lithosphère)  
matière vivante (biosphère)
- **Cycles géochimiques : C, N, O, S, Fe, etc**

- **Le cycle géochimique du Carbone :**  
**Rôle majeur des μorganismes dans la fixation du CO<sub>2</sub> en matière organique dans les 4 environnements (90% de la fixation par les μorg).**
- **Fixation du CO<sub>2</sub> : autotrophie. Schéma suivant : en flèches rouges**

# Le cycle du carbone



# Les voies métaboliques de la fixation du CO<sub>2</sub>

- **cycle de Calvin-Bensam-Bassham.**
  - **Lié à la photosynthèse (phototrophes) : Photosynthèse oxygénique (en présence d'O<sub>2</sub>), anoxygénique (en absence d'O<sub>2</sub>)**
  - **Lié à l'oxydoréduction de composés minéraux (lithotrophes): pouvoir réducteur de minéraux : H<sub>2</sub>S (sources géochimiques), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>, ...**
- **Acétogénèse : H<sub>2</sub> + CoA-SH + CO<sub>2</sub> → acétyl CoA**
- **Cycle d'Arnon-Buchanan : cycle de Krebs tourne à l'envers**
- **Cycle de 3-hydroxy propionate**

## Production de méthane CH<sub>4</sub>

- Activités humaines : consommation de pétrole
- Bactéries méthanogènes : milieux humides
- Archées : tube digestif des ruminants

## Cycle de l'azote : quelques définitions

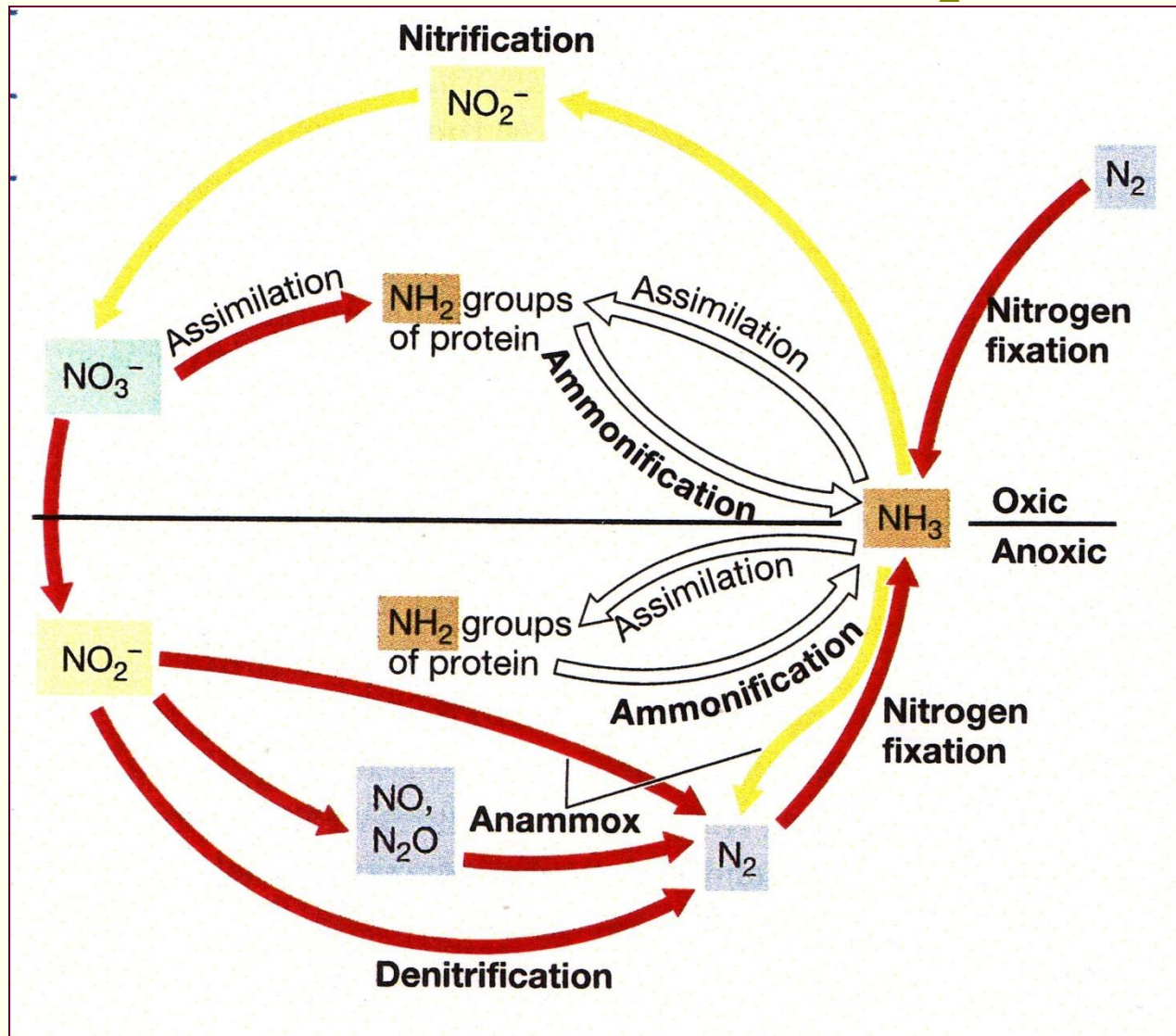
- Réaction dissimilatrice : utilisation du composé comme source d'énergie dans une réaction d'oxydo-réduction
- Réaction assimilatrice : utilisation du composé comme nutriment pour augmenter la bio masse

# Cycle de l'azote : voies métaboliques

- Nitrification : formation de nitrate  $\text{NO}_3^-$  à partir de  $\text{NH}_4^+$
- Dénitrification : formation de  $\text{N}_2$  à partir de  $\text{NO}_3^-$
- Anammox (Anaérobie Ammonium Oxydation) : formation de  $\text{N}_2$  à partir de  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$
- Ammonification : formation de  $\text{NH}_4^+$  à partir de N organique
- Fixation de  $\text{N}_2$  et formation de  $\text{NH}_4^+$  par la nitrogénase



# Le cycle de l'azote en présence (oxic) ou absence (anoxic) d'O<sub>2</sub>

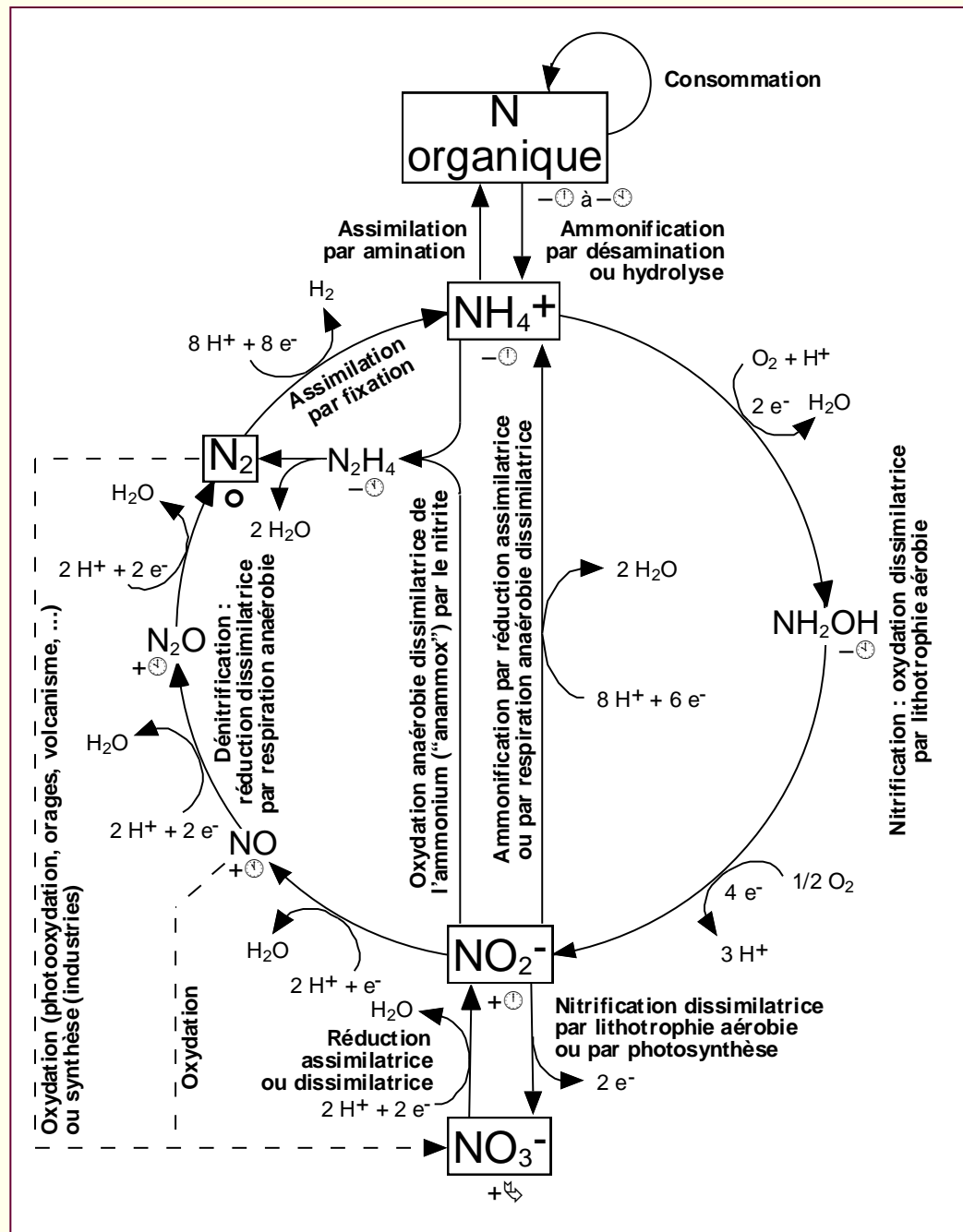


# Quelques exemples de procaryotes dans le cycle de l'azote

## Key Processes and Prokaryotes in the Nitrogen Cycle

Processes	Example organisms
<b>Nitrification</b> ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$ )	
$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$	<i>Nitrosomonas</i>
$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$	<i>Nitrobacter</i>
<b>Denitrification</b> ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ )	<i>Bacillus, Paracoccus, Pseudomonas</i>
<b>N<sub>2</sub> Fixation</b> ( $\text{N}_2 + 8\text{H} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2$ )	
Free-living	
Aerobic	<i>Azotobacter</i> Cyanobacteria
Anaerobic	<i>Clostridium</i> , purple and green bacteria
Symbiotic	<i>Rhizobium</i> <i>Bradyrhizobium</i> <i>Frankia</i>
<b>Ammonification</b> (organic-N $\rightarrow$ $\text{NH}_4^+$ )	Many organisms can do this
<b>Anammox</b> ( $\text{NO}_2^- + \text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2$ )	<i>Brocadia</i>

# Cycle azote poly de cours



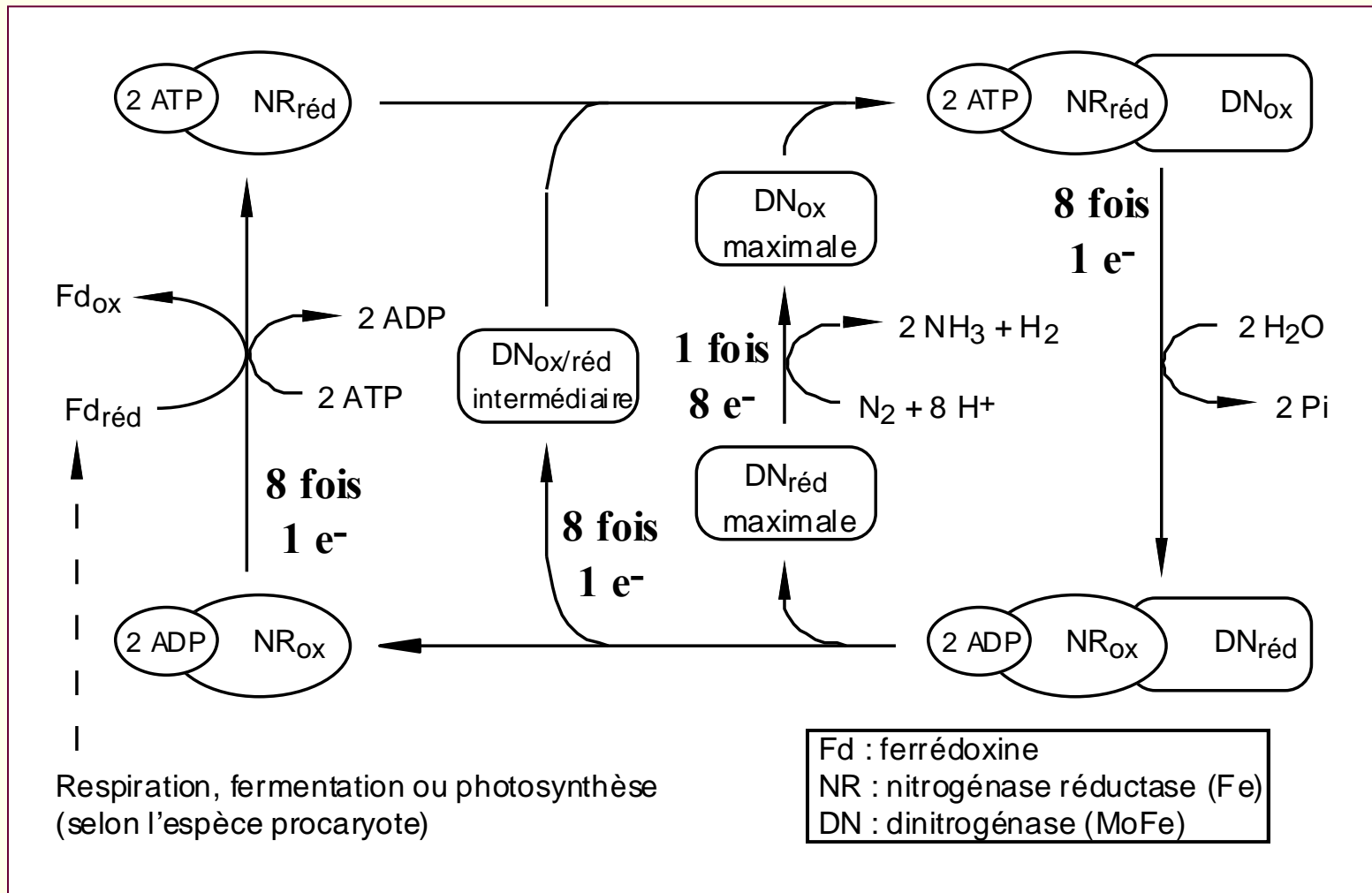
# Les organismes fixateurs d'azote

- Première sélection (Beijerinck): milieu dépourvu de toute source d'N autre que gazeux+ O<sub>2</sub>: *Azotobacter*.
- Uniquement procaryotes.
- Aérobie ou anaérobie stricts « libres »
- Aérobie symbiotiques:
  - Légumineuses (*Rhizobium*)
  - Aulnes (*Frankia*)
  - Herbes tropicales (*Azospirillum*)
  - Fougères: *Azolla* (*Anabena*)

# La nitrogénase

- La réaction:
  - $\text{N}_2 + 8\text{H}^+ + 16 \text{ATP} \rightarrow 2 \text{NH}_3 + \text{H}_2 + 16 \text{ADP} + 16\text{P}_i$
- Analyse de la réaction:
  - Deux protéines Fe-S: la nitrogénase (dimérique); la dinitrogène réductase (tétramérique) Mo cofacteur additionnel.
  - La nitrogénase est réduite soit par une ferrédoxine soit par une flavodoxine
  - Elle cède son électron à la dinitrogène réductase
  - La réduction implique 8 transferts d'électron
  - Les produits intermédiaires restent associés à la dinitrogène réductase

# Le cycle de la nitrogénase



# Caractéristiques de la nitrogénase

- L'ADP inhibe la réaction:
  - Inconvénient pour l'étude in vitro
  - « rôle » physiologique
- La production d'H<sub>2</sub>
- Effet de l'ammoniac
- L'effet de l'oxygène
- Protection de la nitrogénase contre l'oxygène
  - Cas des anaérobies stricts
  - Cas des aérobies stricts
    - Hyperoxygénation
    - Barrière de diffusion
    - Protection conformationnelle
  - Cas des symbiotes

# Protection contre l'O<sub>2</sub>: *Anabaena* et les hétérocystes

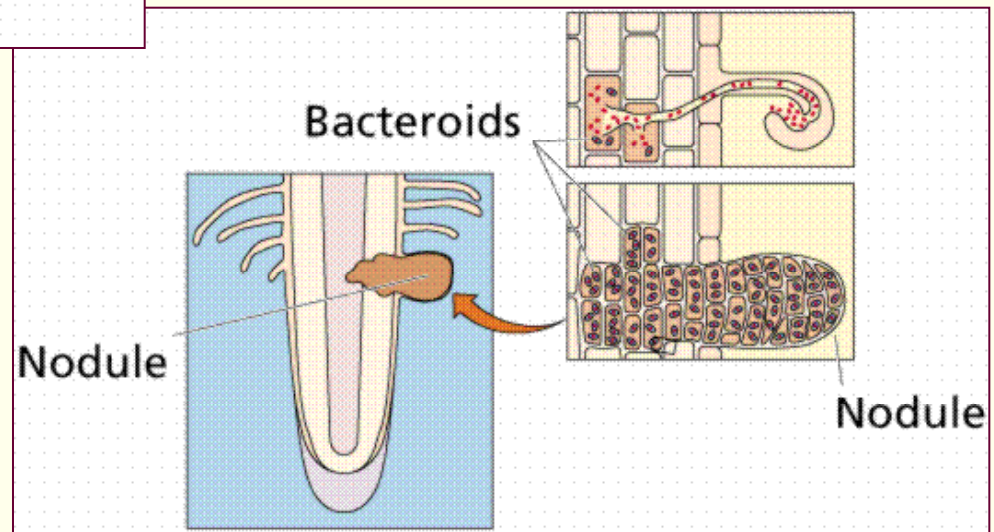
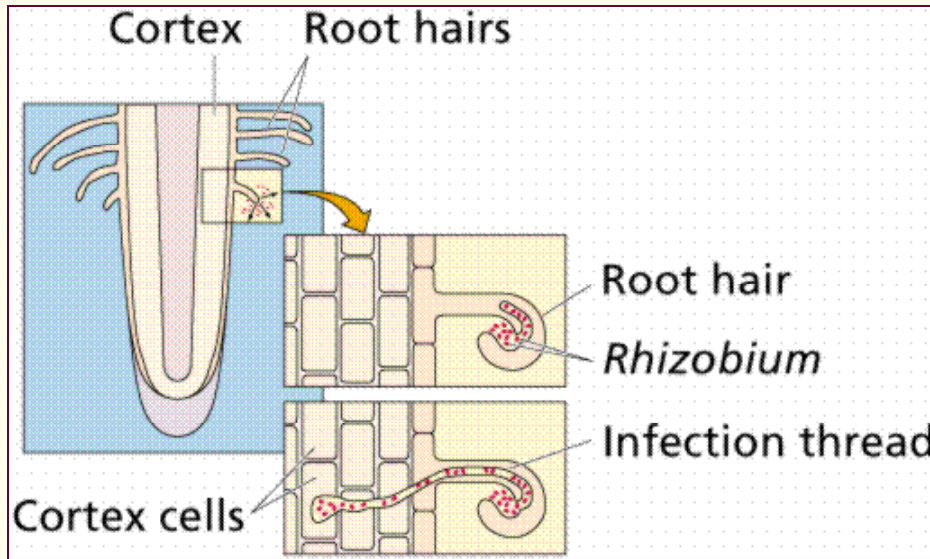




# Les étapes de la formation du nodule sur la racine d'une plante de la famille des Fabacées (1)

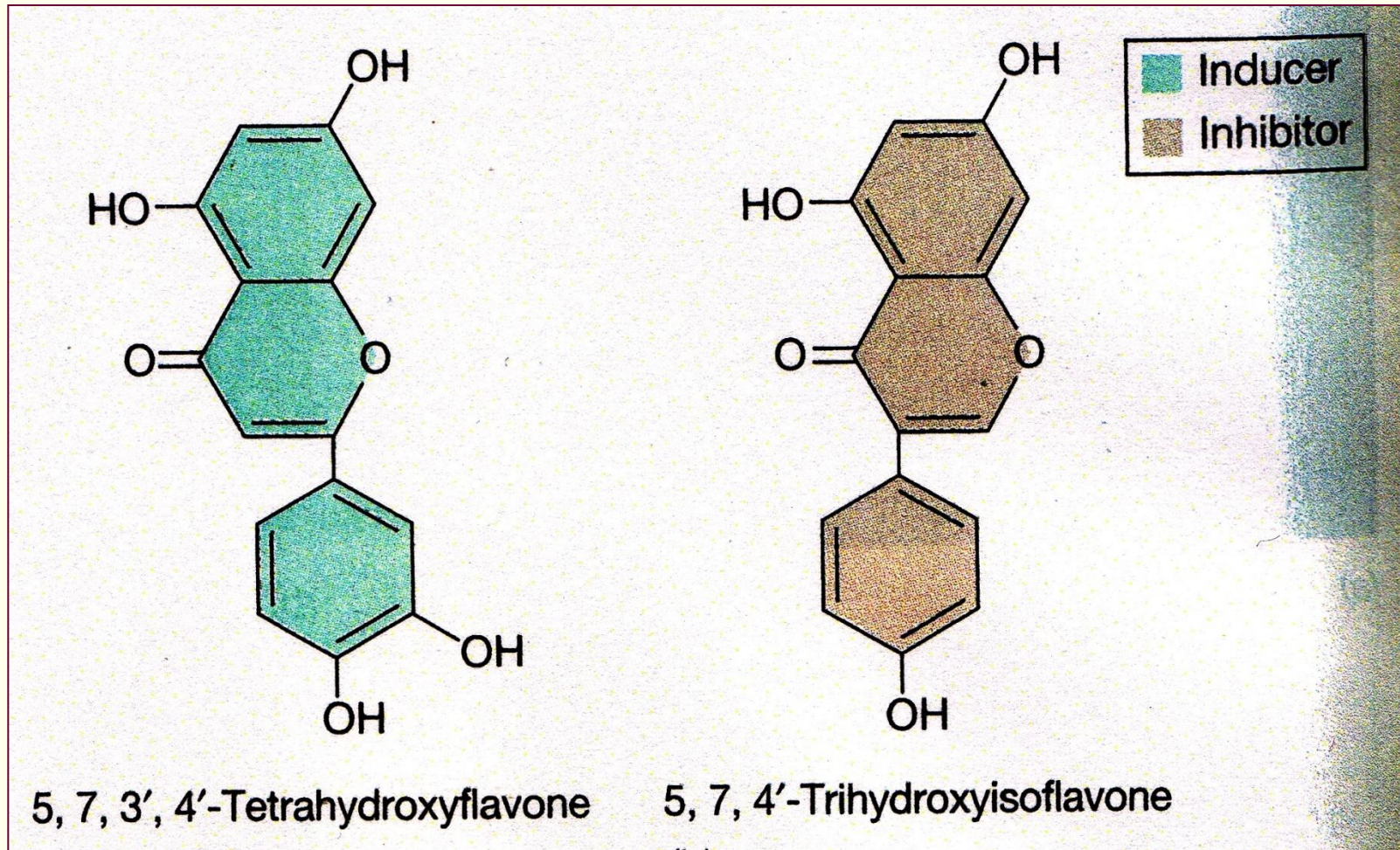
- Reconnaissance réciproque; attachement de la bactérie
- Excrétion de facteurs de nodulation par la bactérie
- Invasion de la radicelle par la bactérie
- Migration jusqu'à la racine
- Formation des bactéroïdes: fixation de  $N_2$
- Division des bactéries et des cellules de la plante: formation du nodule.

# Les étapes de la formation du nodule sur la racine d'une plante de la famille des Fabacées (2)

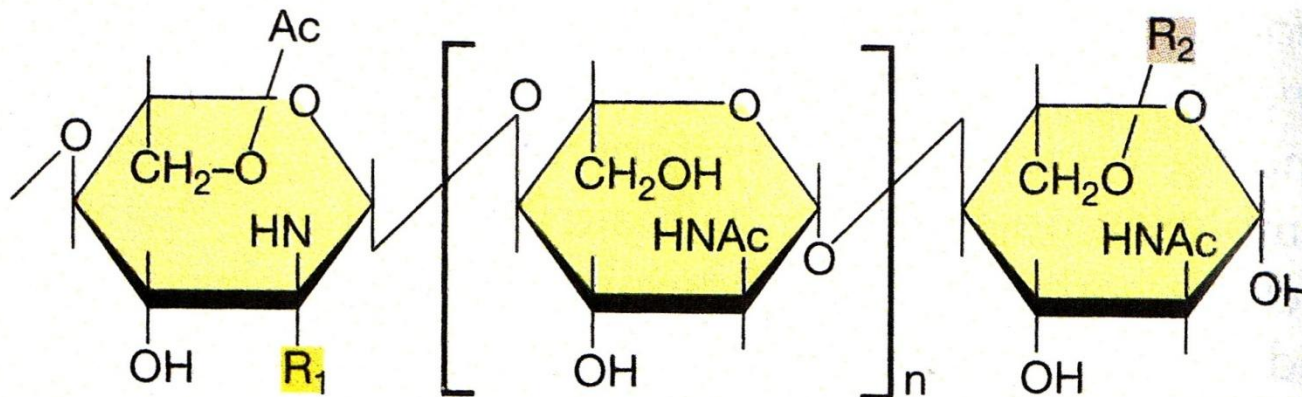


# Dialogue moléculaire : les flavonoïdes

## Signal de la plante vers les bactéries



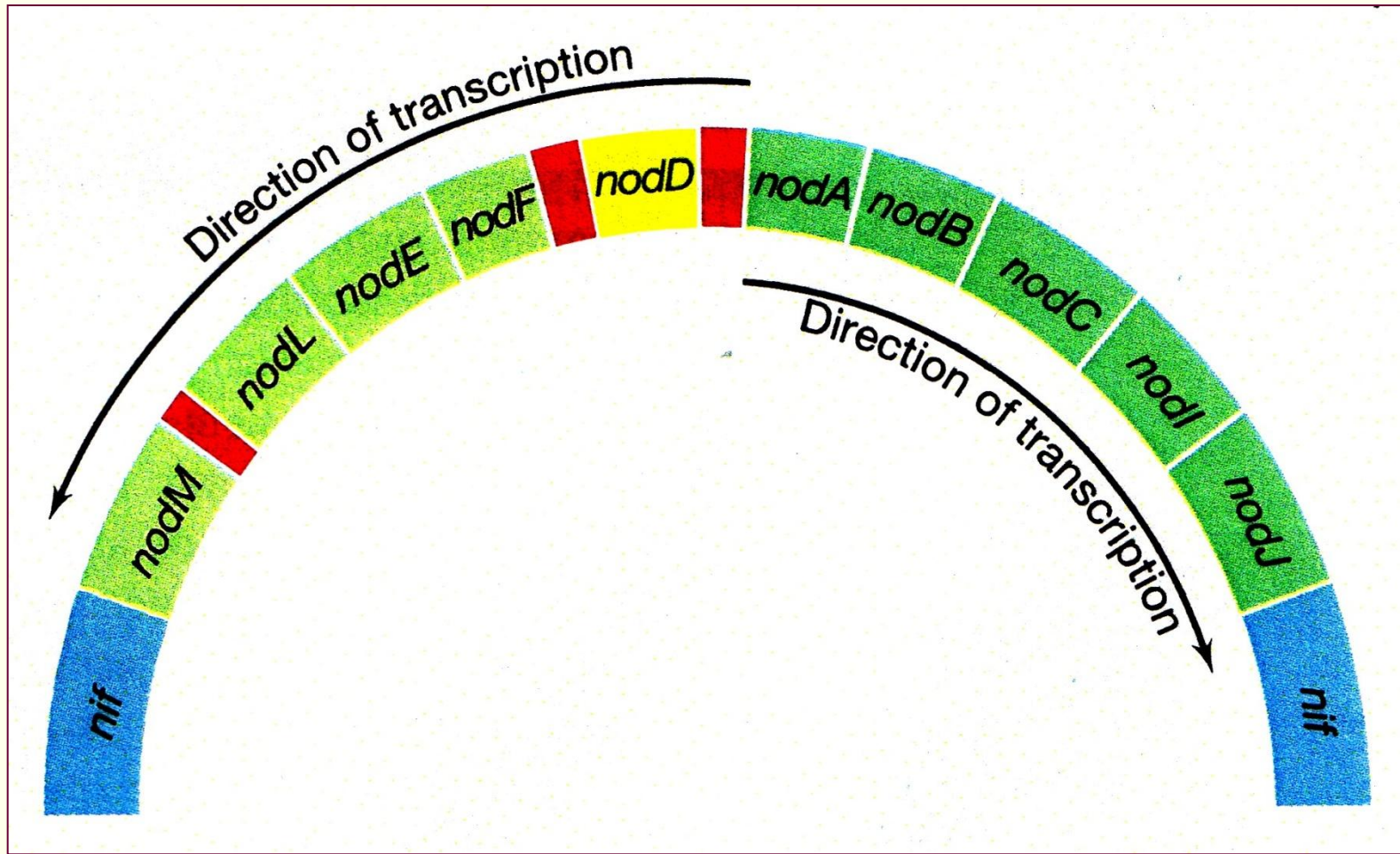
# Structure des facteurs nod : signal des bactéries vers la plante



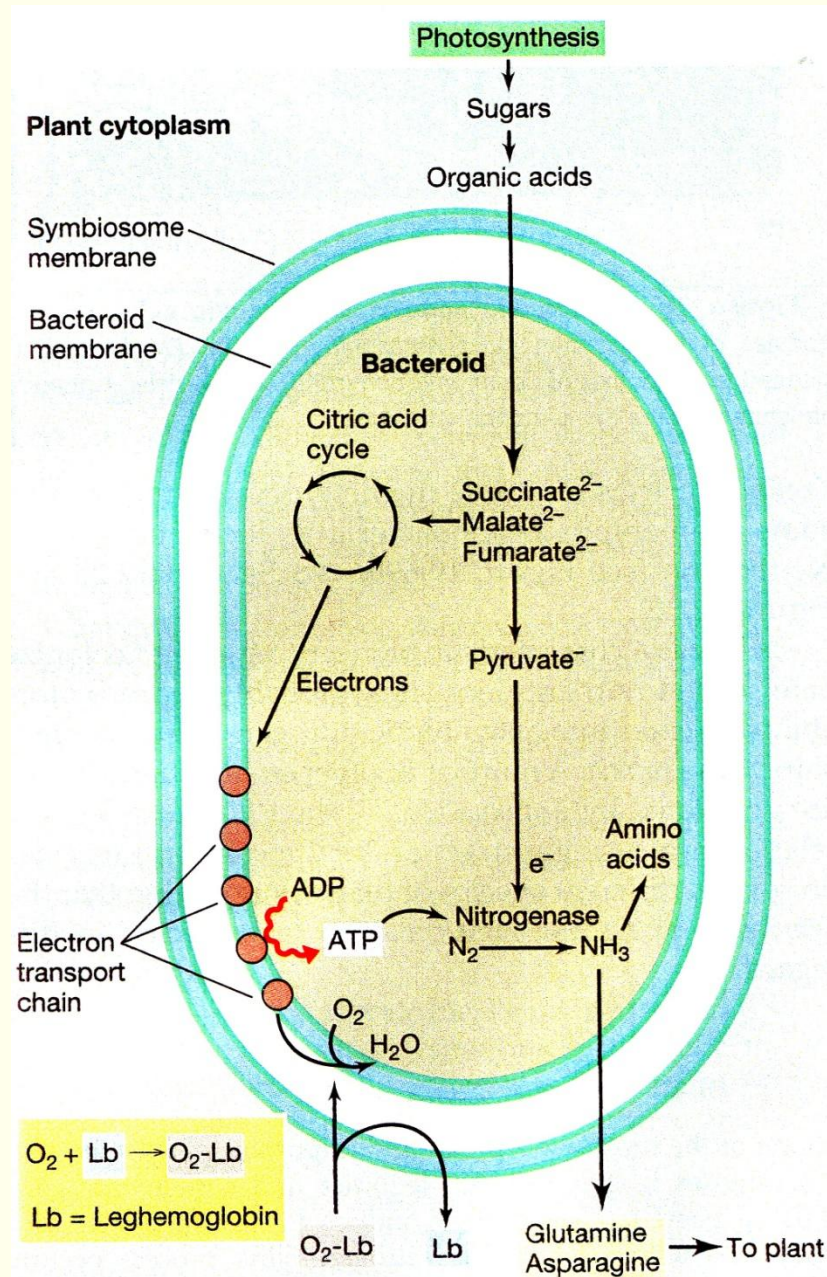
(a)

Species	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
<i>Sinorhizobium meliloti</i>	C16:2 or C16:3	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<i>Rhizobium leguminosarum</i> biovar <i>viciae</i>	C18:1 or C18:4	H or Ac

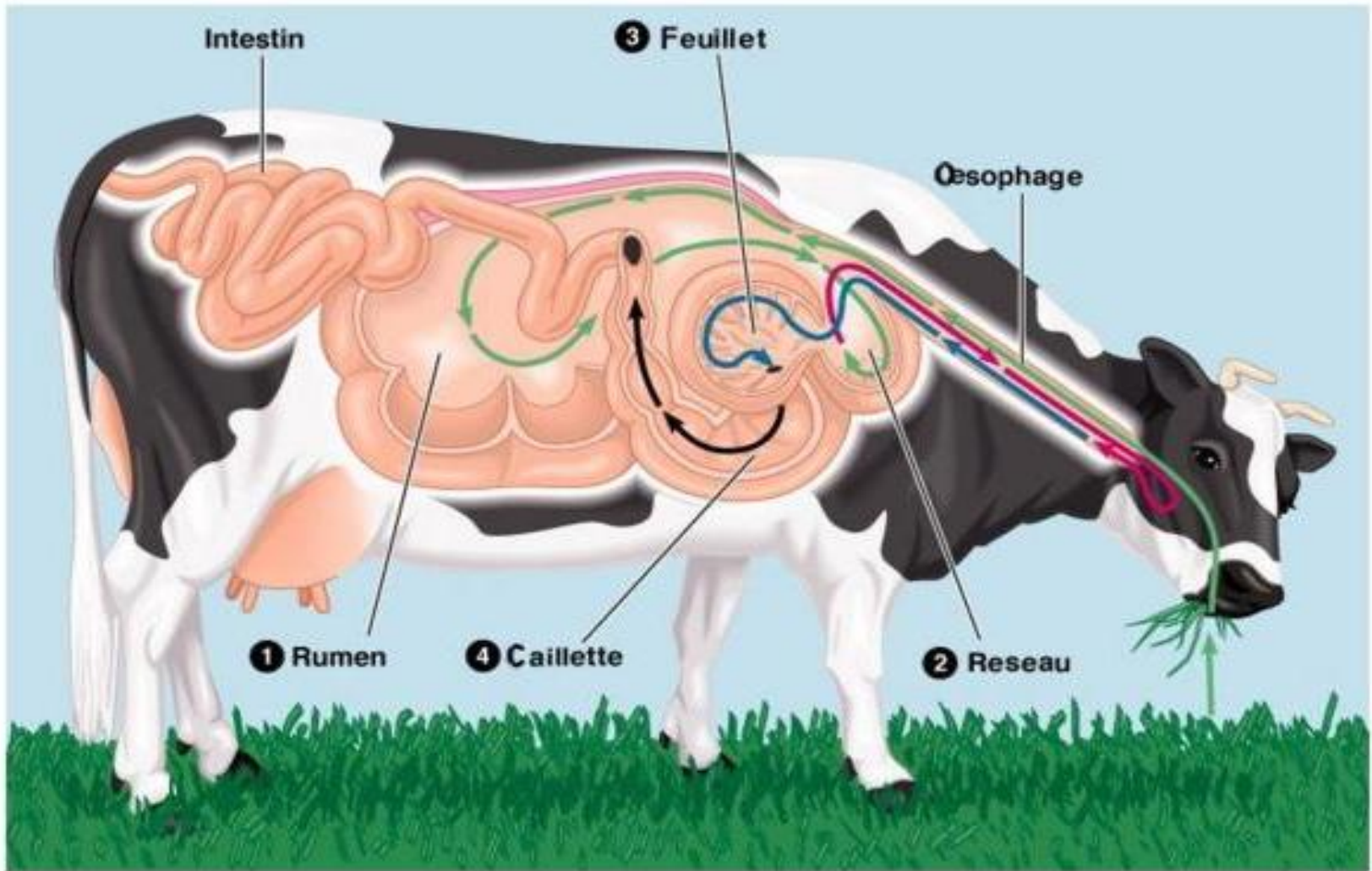
# Dialogue moléculaire: les gènes nod sur le génome de la bactérie



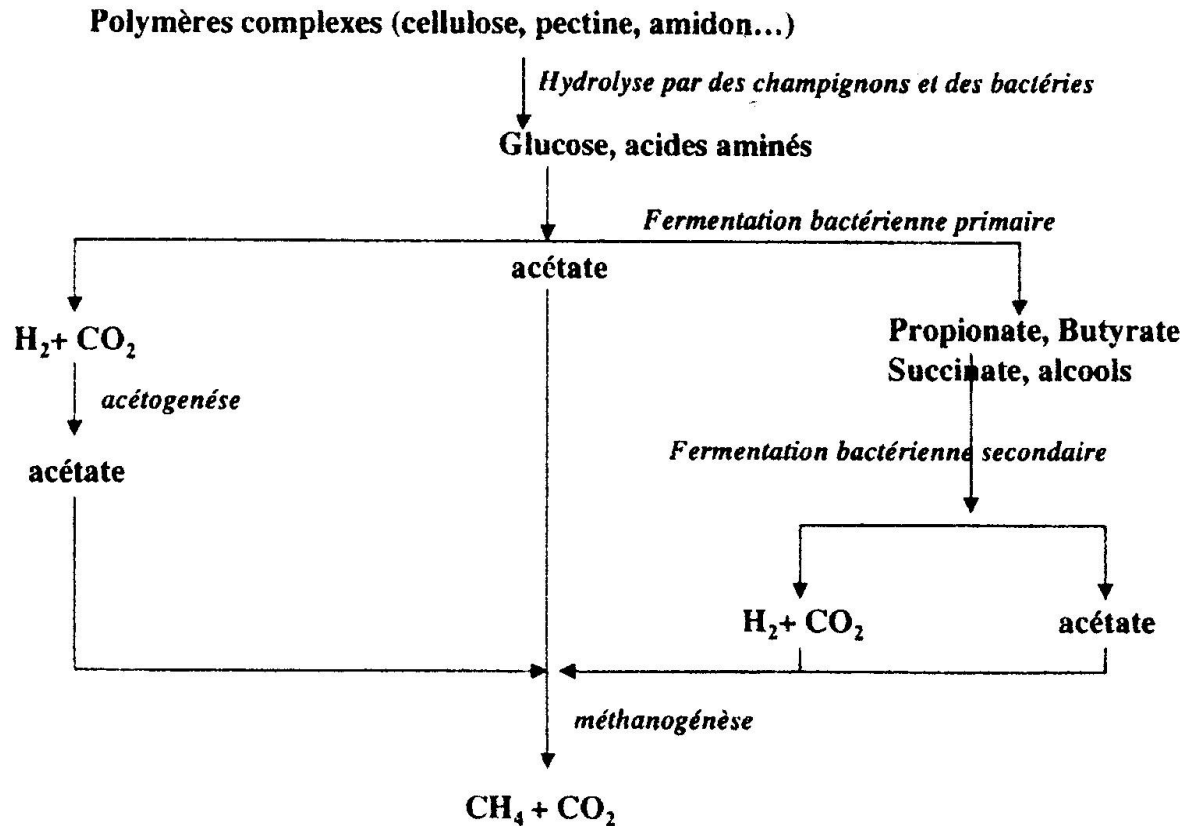
# Le bactéroïde dans les cellules de plante



# Oh la vache !



## Réactions qui se déroulent dans le rumen



Réactions se déroulant dans le rumen

- Propionate et butyrate directement absorbés par le ruminant
- H<sub>2</sub> peut aussi être produit par les champignons anaérobies
- Le cas du méthane



# Production de méthane

Principales réactions intervenant dans la conversion anoxygène des composés organiques en méthane CH<sub>4</sub>

Réaction type	Substrats	Produits	ΔG <sup>0</sup> kJ/mol Conditions standard	ΔG kJ/mol Conditions réelles
Fermentation du glucose en acétate, H <sub>2</sub> , et CO <sub>2</sub>	Glucose + 4 H <sub>2</sub> O	2 acétate + 2 HCO <sub>3</sub> + 4 H <sup>+</sup> + 4 H <sub>2</sub>	- 207	-319
Fermentation du glucose en butyrate, H <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub>	Glucose + 2 H <sub>2</sub> O	Butyrate + 2 HCO <sub>3</sub> + 3 H <sup>+</sup> + 2 H <sub>2</sub>	- 254	- 284
Fermentation du butyrate en acétate et H <sub>2</sub>	Butyrate + 2 H <sub>2</sub> O	2 acétate + H <sup>+</sup> + 2 H <sub>2</sub>	+ 48	- 17
Fermentation du propionate en acétate et H <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub>	Propionate + 3 H <sub>2</sub> O	acétate + HCO <sub>3</sub> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub>	+ 76	- 35
Fermentation du benzoate en acétate, H <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub>	Benzoate + 6 H <sub>2</sub> O	3 acétate + CO <sub>2</sub> + 2 H <sup>+</sup> + 3 H <sub>2</sub>	+ 46	- 18
Méthanogénèse à partir de H <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub>	4 H <sub>2</sub> + HCO <sub>3</sub> + H <sup>+</sup>	CH <sub>4</sub> + 3 H <sub>2</sub> O	-136	-32
Méthanogénèse à partir de acétate	Acétate + H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub>	- 31	- 25
Acétogénèse à partir de H <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub>	4 H <sub>2</sub> + 2 HCO <sub>3</sub> + H <sup>+</sup>	Acétate + 4 H <sub>2</sub> O	- 105	- 7

Conditions standard : solutés 1M, gaz 1 atm.

Conditions réelles : acides gras 1mM, HCO<sub>3</sub> 20 mM, Glucose 10 μM, CH<sub>4</sub> 0.6 atm, H<sub>2</sub> 0.1 atm

H<sub>2</sub> produit par les fermentations est aussitôt consommé par la méthanogénèse et acétogénèse : donc la concentration de H<sub>2</sub> est faible et les conditions réelles conduisent à un ΔG négatif, donc à une réaction possible

# Flore du rumen

Catégorie	Cellules/mL	Nombre de genres	Caractéristiques principales
Bactéries	$10^{10}$ à $10^{11}$	$\geq 50$	En majorité Gram - et anaérobies strictes
Archaea	$10^7$ à $10^9$	5	Méthanogènes (anaérobies strictes)
Protozoaires	$10^4$ à $10^6$	$\geq 25$	Saprozoïtes et ciliés
Champignons	$10^3$ à $10^5$	5	Anaérobies stricts

- La majorité des ciliés est anaérobie stricte. Les ciliés peuvent consommer les bactéries et contribuent à l'alimentation du bovin
- Les champignons (ex: *Neocallimastix*) sont dépourvus de mitochondries et possède un organelle: l'hydrogénosome, possédant une double membrane et producteur d' $H_2$