

**UNIVERSITE IBN ZOHR**  
**Faculté des sciences appliquées –Ait**  
**Melloul**



# **Module M34 : Écotoxicologie et Ecosystèmes Aquatiques**

## **Partie II: Ecosystèmes aquatiques**

### *Chapitre 2: Fonctionnement des systèmes aquatiques*

**Pr. Chafia HAJJI**

# Les axes du chapitre

## - Manipulation du réseau trophique

- Chaque espèce peut potentiellement jouer un rôle clé

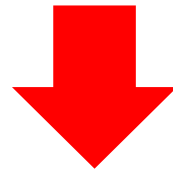
## - Flux d'énergie

- une quantité limitée d'énergie est captée par le vivant et une quantité limitée d'énergie est transmise d'un vivant à l'autre...

## - Flux de matière (ou les cycles biogéochimiques)

- La planète est un endroit « fini ». Peu d'intrants et peu d'extrants. Tout ce RECYCLAGE se passe à un rythme très précis...
  - Carbone
  - Azote
  - Phosphore
  - Molécules de synthèse
  - Exemple de l'eau
  - Bioamplification

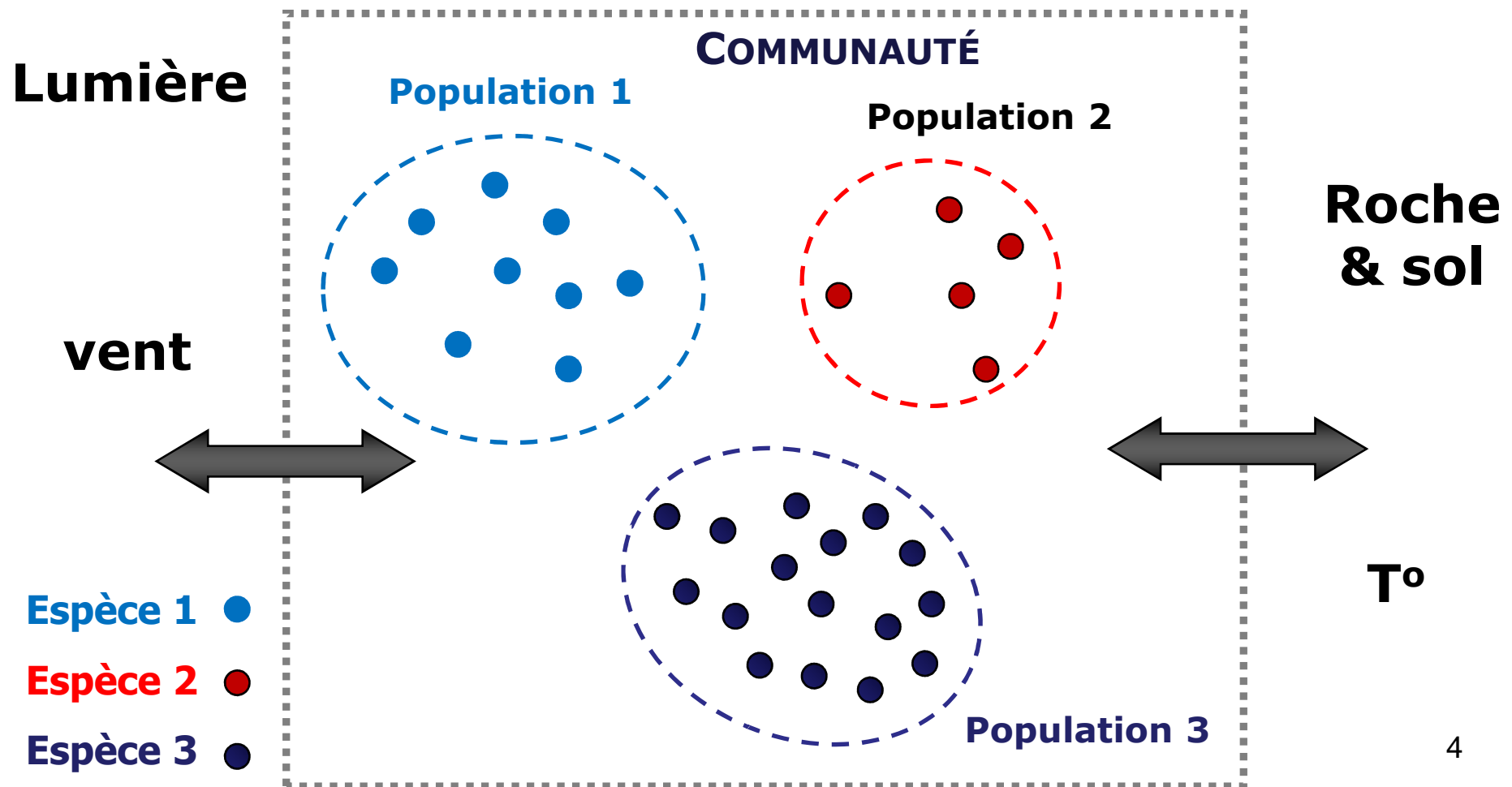
# **Les écosystèmes, des entités dynamiques où l'homme exerce une influence variable : le fonctionnement des écosystèmes**



Dans cette partie, on s'intéresse à l'écologie fonctionnelle, c'est-à-dire la partie de l'écologie qui étudie le fonctionnement des écosystèmes, notamment en envisageant les processus qui s'y déroulent dans le temps.

# UN ÉCOSYSTÈME

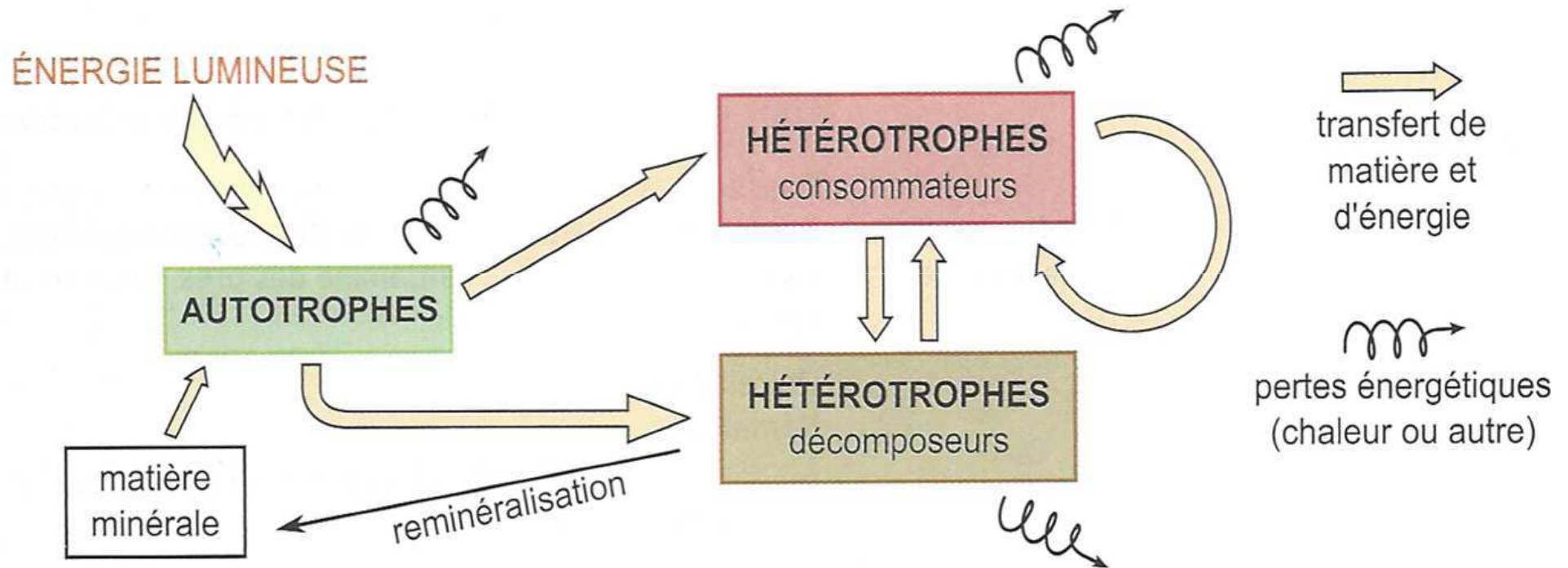
L'ENSEMBLE DES ORGANISMES D'UNE COMMUNAUTÉ VIVANT DANS UNE AIRE DÉFINIE ET INTERAGISSANT AVEC LES FACTEURS ABIOTIQUES QUI L'ENTOURENT.



Les écosystèmes, des entités traversées  
par des **flux de matière et d'énergie**.

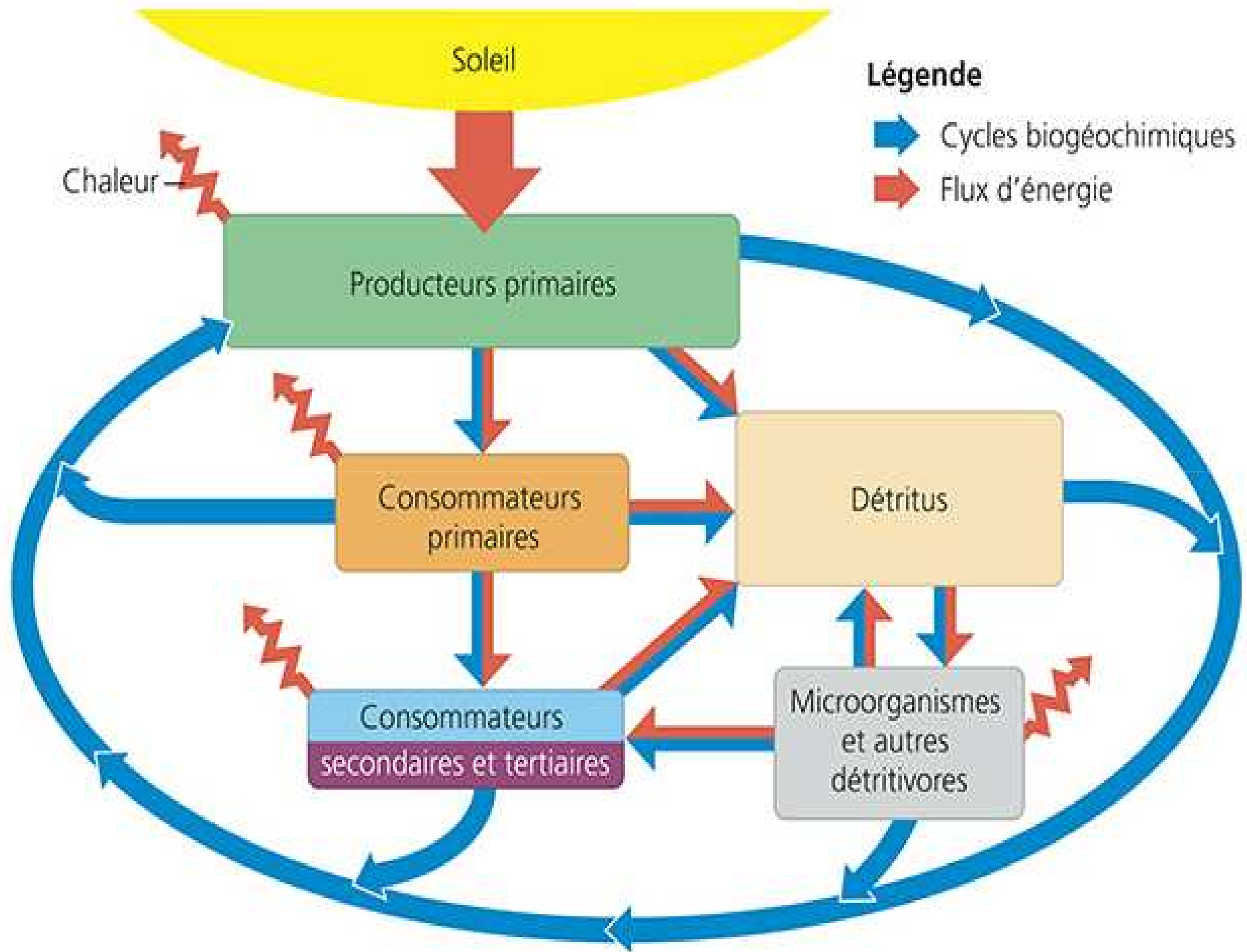
# 1. La structure trophique des écosystèmes

## A. Trois grands types d'organismes : producteurs primaires, consommateurs, décomposeurs



Place des êtres vivants dans un écosystème : la biocénose s'organise en trois ensembles d'espèces qui constituent un réseau de transferts de matière et d'énergie  
(D'après F. Ramade).

**FIGURE . Les trois grands statuts trophiques dans un écosystème typique.**  
D'après PEYCRU *et al.* (2014)



➤ On peut parler de « **structure** » trophique (*même si cela n'a rien à voir avec une quelconque organisation spatiale*) pour désigner *l'ensemble des liens trophiques (= alimentaires) entre les espèces d'une biocénose et de ses conséquences sur le fonctionnement de l'écosystème*. On distingue trois grands « **statuts** » trophiques principaux : les producteurs primaires, les consommateurs et les décomposeurs (figure précédente).

➤ *La position des organismes (ce qu'ils mangent, par qui ils sont mangés) dans les chaînes trophiques est un facteur écologique.*



## A.1. Les producteurs primaires, organismes autotrophes faisant entrer la matière et l'énergie dans la biocénose

- Les **producteurs primaires** sont les organismes autotrophes qui permettent l'entrée de la matière et d'énergie dans la biocénose en convertissant la matière minérale et l'énergie environnementale en matière organique.

On notera ici que l'entrée de matière et l'entrée d'énergie sont séparées.

- Il s'agit notamment des 'plantes' qui réalisent la photosynthèse mais aussi de diverses Bactéries autotrophes.

## **A.2. Les consommateurs (= producteurs secondaires), organismes hétérotrophes faisant circuler la matière et l'énergie dans la biocénose**

Les producteurs secondaires ou consommateurs sont les organismes hétérotrophes qui s'alimentent à partir d'organismes pré-existants, soit des producteurs primaires (consommateurs primaires = phytophages), soit d'autres producteurs secondaires (consommateurs secondaires = prédateurs au sens strict – plusieurs niveaux possibles, rarement plus de 5).

**On notera ici que l'entrée de matière et l'entrée d'énergie dans ces organismes sont conjointes.**

- ✓ Ce sont essentiellement des Animaux pluricellulaires mais on peut y trouver des organismes unicellulaires.
- ✓ · Notons que les parasites y sont souvent placés « techniquement » puisqu'ils font, d'une certaine façon œuvre de micro-prédation.

### A.3. Les décomposeurs, organismes hétérotrophes qui s'alimentent de déchets organiques produits par d'autres espèces

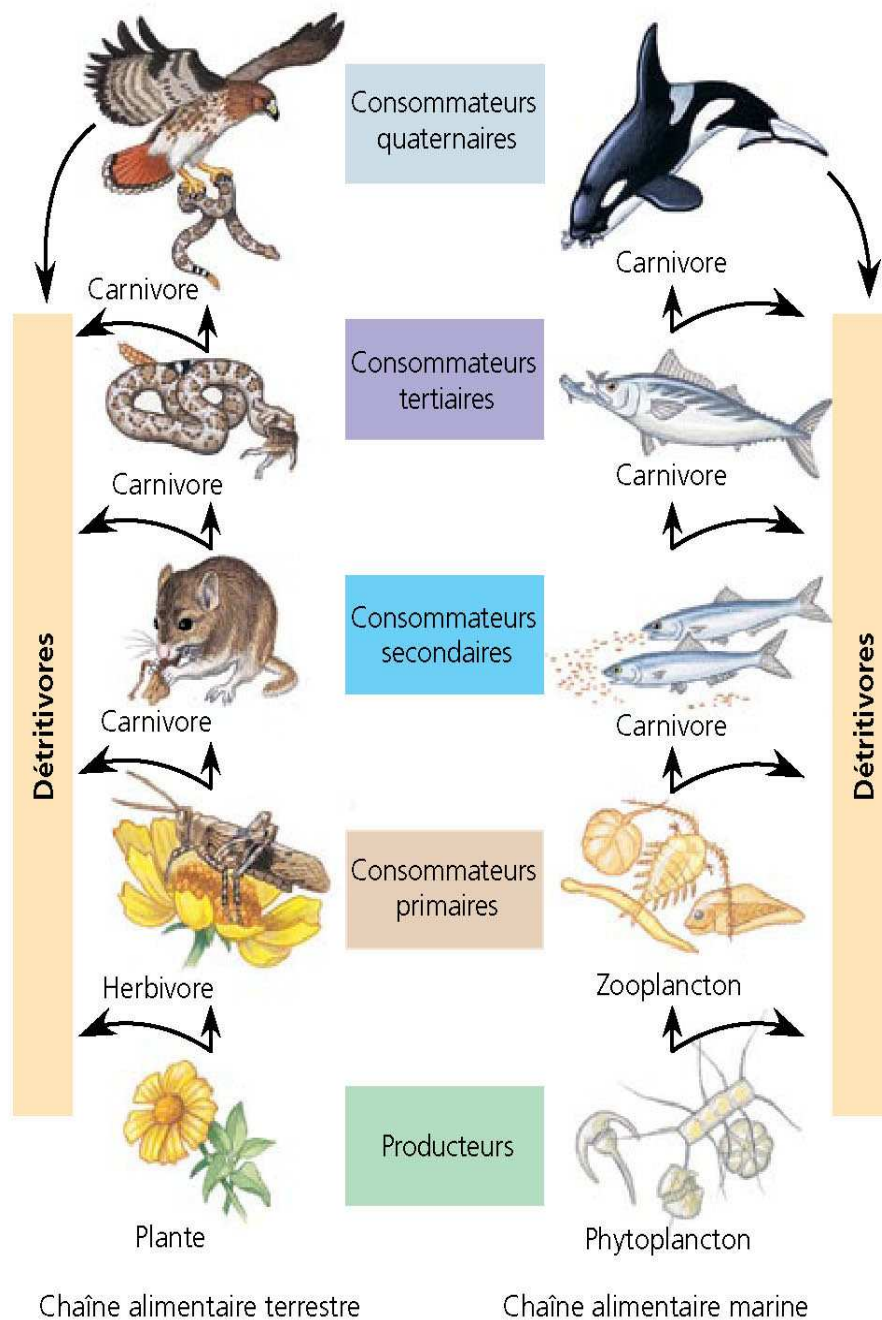
- Les décomposeurs sont les *organismes hétérotrophes qui s'alimentent de déchets de fonctionnement d'autres organismes et/ou d'organismes morts.*
- On y trouve des **Bactéries**, des '**champignons**', de **petits Animaux...**
- *Certains auteurs y placent (mais se discute !) des consommateurs secondaires s'alimentant de décomposeurs.*

# 1. La structure trophique des écosystèmes

## B. Des organismes connectés par des chaînes et des réseaux trophiques

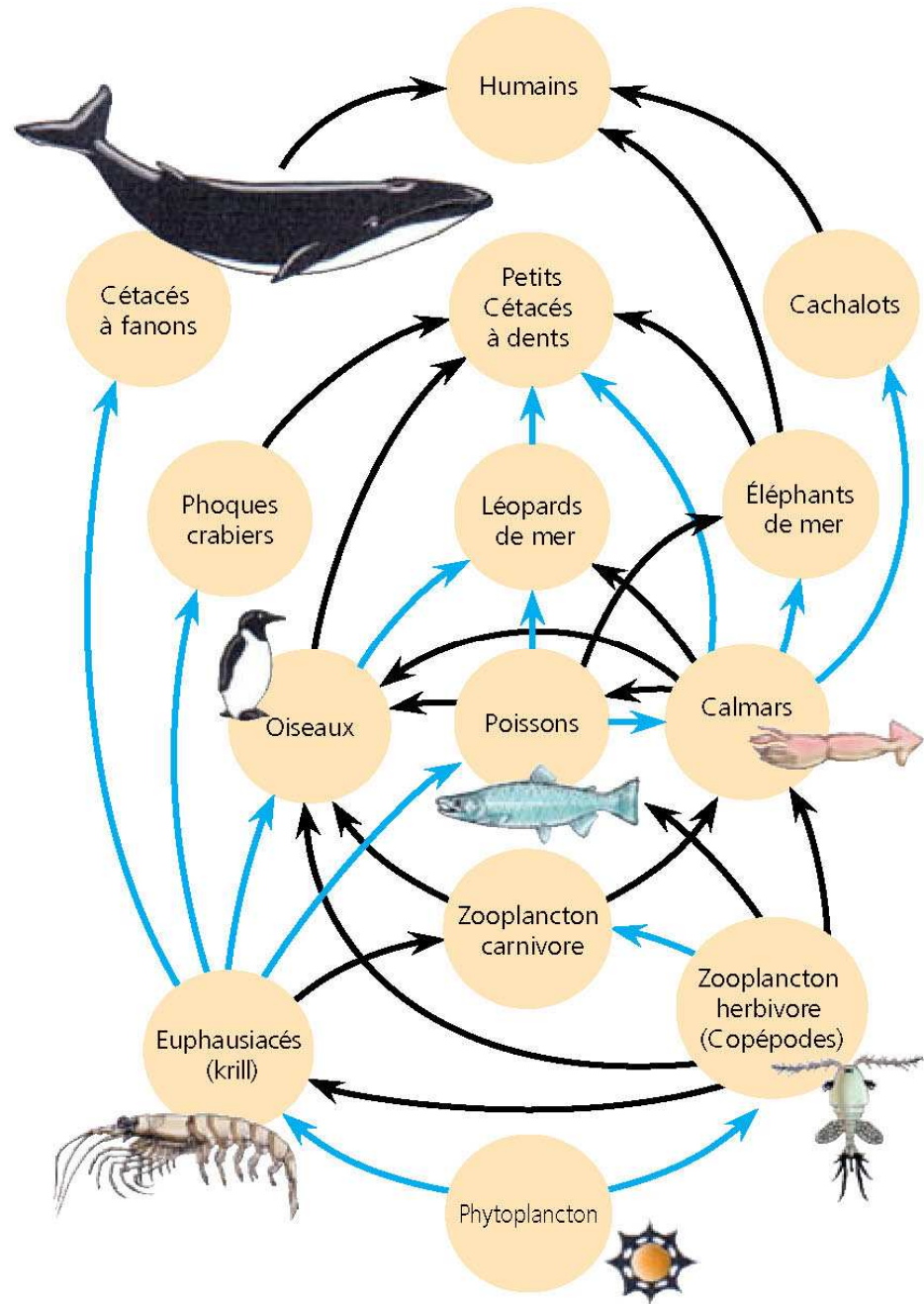
- On appelle **chaîne trophique** une *suite linéaire d'organismes liés par des relations de consommation*.

- On appelle **réseau trophique** un ensemble de chaînes trophiques présentes dans un écosystème ou une partie d'écosystème. Les chaînes trophiques s'y croisent et sont interconnectées, notamment grâce aux espèces polyphages (= qui consomment de multiples autres espèces et pouvant être situées à des niveaux divers de plusieurs chaînes trophiques)



- Les **chaînes alimentaires** sont des représentations simplifiées de « qui mange qui » à l'intérieur d'un écosystème
- Les organismes occupent différents **niveaux trophiques**

- Le **réseau trophique** représente mieux la réalité complexe de « qui mange qui » d'un écosystème
- Il permet aussi de représenter les omnivores



On appelle niveau trophique le *rang qu'occupe une espèce dans une chaîne trophique*.

### ■ **LE NIVEAU TROPHIQUE:**

- Niveau regroupant les espèces qui partagent la même source de nourriture et d'énergie.

**QUEL EST LE NIVEAU TROPHIQUE SUR LEQUEL  
REPOSENT TOUS LES AUTRES NIVEAUX DE  
L'ÉCOSYSTÈME?**

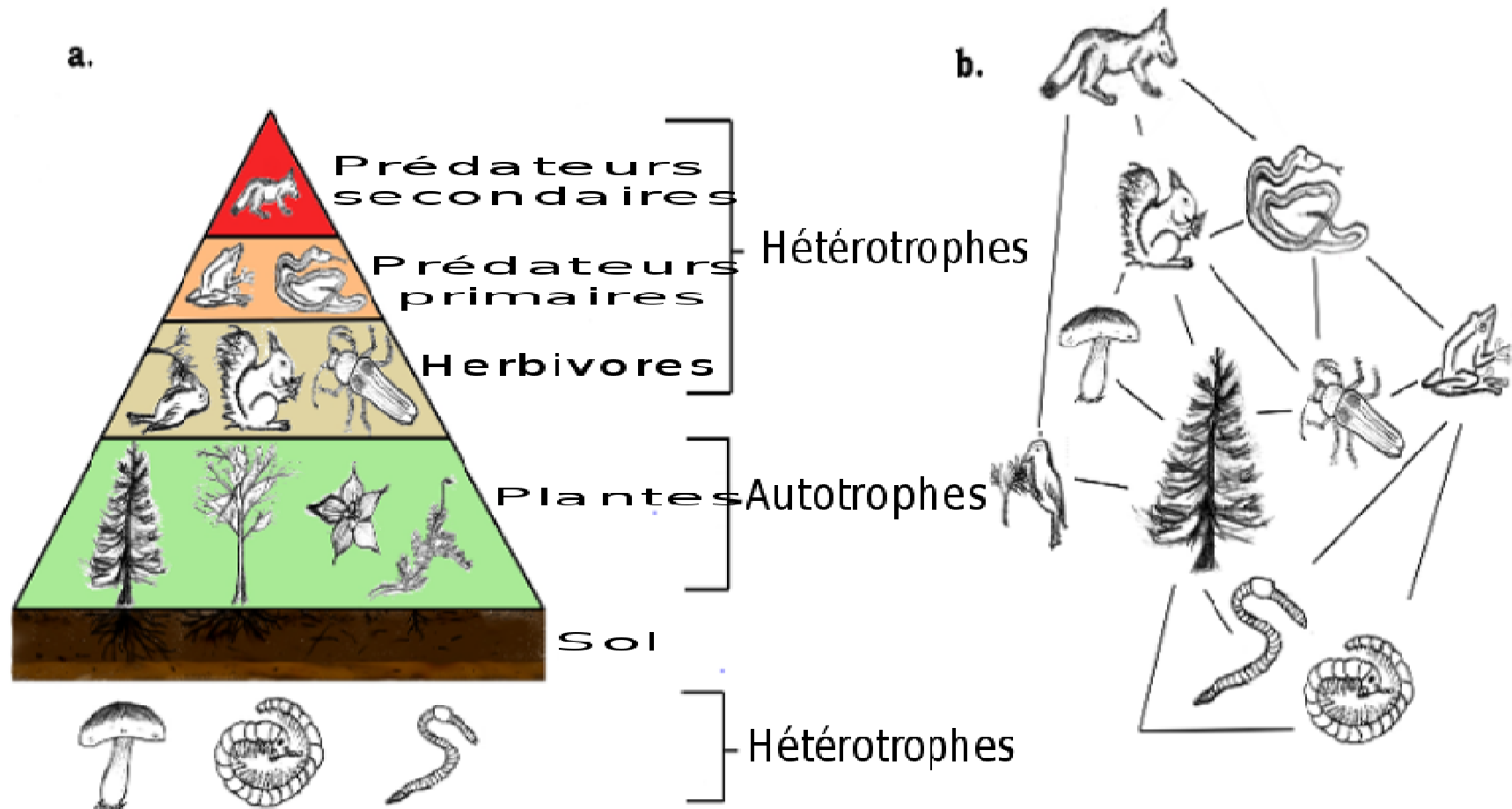
**DIFFÉRENCIER AUTOTROPHE ET  
HÉTÉROTROPHE ??**

➤ La **pyramide écologique** est une forme de représentation graphique pour indiquer des rapports entre différentes catégories d'espèces correspondant à différents **niveaux trophiques**. Le premier maillon est les **décomposeurs**, puis les plantes **autotrophes**, les herbivores, les prédateurs primaires et les prédateurs secondaires, voire les prédateurs tertiaires (**superprédateurs**).

➤ Il en existe trois catégories : **pyramide des nombres**, **pyramide des biomasses** et **pyramide des énergies**.

➤ Si cet outil visuel est pratique, il est simplificateur et ne rend pas compte de la complexité des **réseaux trophiques** qui s'accroît avec le degré d'ancienneté et d'évolution des écosystèmes.



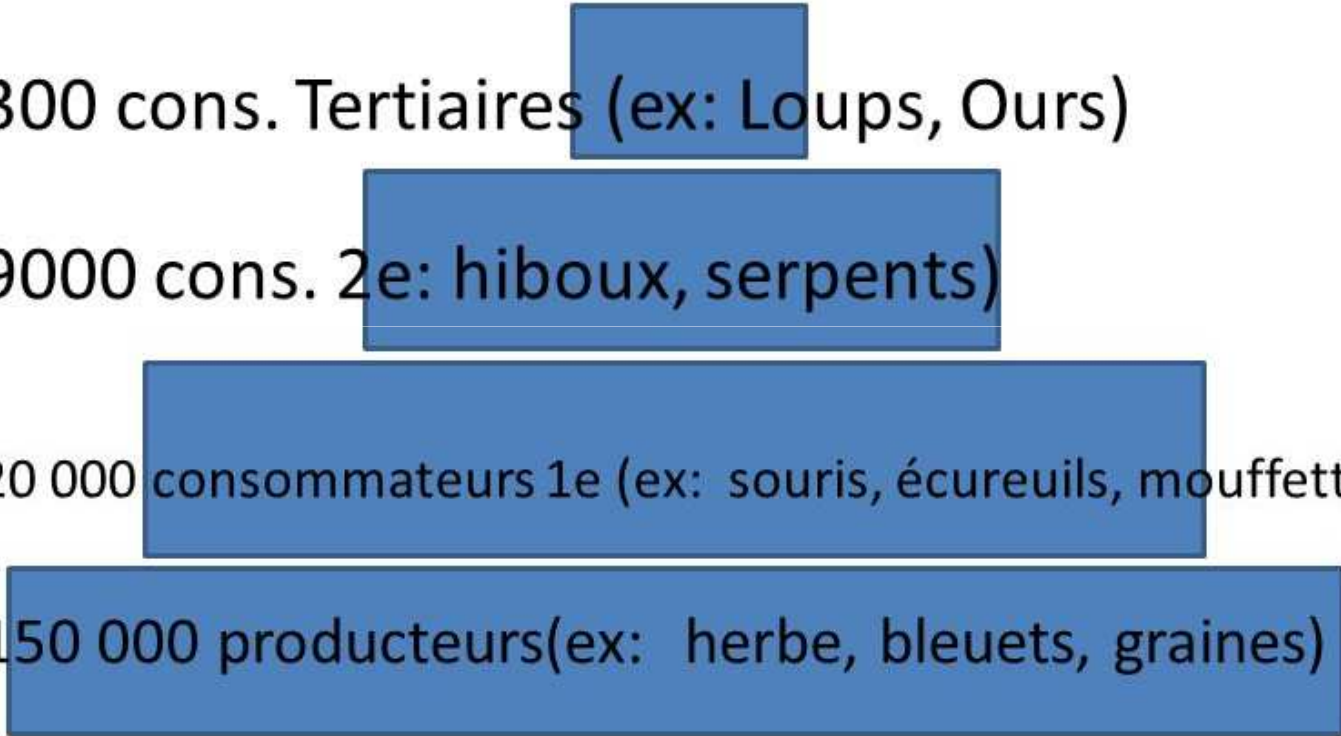


Deux représentations rendant compte du fonctionnement d'un écosystème : pyramide écologique (a) et réseau trophique (b).

# La pyramide des nombres

- La pyramide des nombres montre le nombre d'individus à chaque niveau trophique d'un écosystème.
- Ce pyramide est d'habitude plus grand en bas, et moins grand en haut, parce que d'habitude les prédateurs sont plus grands que leurs proies, alors ils mangent plusieurs proies par jour
- (ex: Un chat peut manger plusieurs souris par jour.) Une pyramide de nombres peut être plus petit en bas s'il contient un grand producteur.

## Exemple: Pyramide de Nombre

- 
- 300 cons. Tertiaires (ex: Loups, Ours)
  - 9000 cons. 2e: hiboux, serpents)
  - 20 000 consommateurs 1e (ex: souris, écureuils, mouffettes)
  - 150 000 producteurs(ex: herbe, bleuets, graines)

# **La pyramide de la biomasse**

- **La pyramide de la biomasse montre la masse totale des organismes à chaque niveau trophique d'un écosystème. Ces pyramides sont aussi d'habitude plus large en bas.**

# Exemple: Pyramide de Biomasse

- 200kg cons. Tertiaires (ex: Loups, Ours)
- 8000kg cons. 2e: hiboux, serpents)
- 42 000 kg consommateurs 1e (ex: souris, écureuils, mouffettes)
- 900 000kg producteurs(ex: herbe, bleuets, graines)

# La pyramide de l'énergie

- La pyramide de l'énergie montre le montant d'énergie à chaque niveau trophique d'un écosystème. Ces pyramides sont TOUJOURS plus large en bas, puisqu'un niveau trophique ne pourrait jamais recevoir plus d'énergie que le niveau dessous lui contient.

# Exemple: Pyramide de l'énergie



## **2. Les flux (= transferts) et les pertes (= la dissipation) d'énergie dans les réseaux trophiques**

### **A- Notions de flux trophique, de perte d'énergie, de biomasse et d'assimilation**

Le passage de matière et d'énergie (par consommation) d'un niveau trophique à un autre s'appelle un flux trophique ou transfert trophique. L'unité est souvent le kJ (parfois le kcal).

#### **L'équivalence matière / énergie en écologie**

On notera que, dès lors qu'il y a **consommation**, les **transferts de matière** et les **transferts d'énergie** se superposent puisque l'énergie transférée l'est par le biais de la matière organique consommée.



- L'énergie présente dans un niveau trophique inférieur non transférée au niveau supérieur sera considéré comme une perte d'énergie.
- On appelle **biomasse** la masse (généralement exprimée en poids sec) d'une espèce vivante ou d'un ensemble d'espèces dans un écosystème.

La biomasse est *souvent exprimée en unité de masse par unité de surface (exemple : masse de Fougère par ha de forêt)*, ce qui est en réalité rigoureusement une **densité de biomasse**.

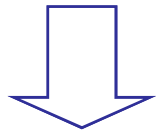
- On parlera d'**assimilation** pour désigner la matière et l'énergie effectivement transformées en biomasse lors du franchissement d'un niveau trophique.

## **2. Les flux (= transferts) et les pertes (= la dissipation) d'énergie dans les réseaux trophiques**

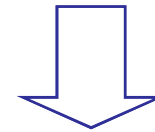
### **FLUX ET CONSERVATION DE L'ÉNERGIE AU SEIN DE L'ÉCOSYSTÈME**

**RIEN NE SE PERD, RIEN NE SE CRÉE,  
TOUT SE TRANSFORME ! (*LAVOISIER*)**

**La quantité d'énergie  
totale ne change pas**



**Une partie de l'énergie se  
dissipe sous forme de  
chaleur**

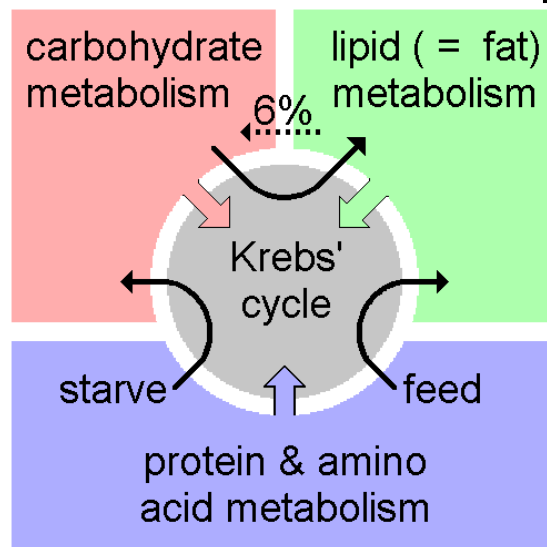


**Une partie de l'énergie est  
contenue dans les  
molécules organiques**

# FLUX DE L'ÉNERGIE, SOUS QUELLE FORME?

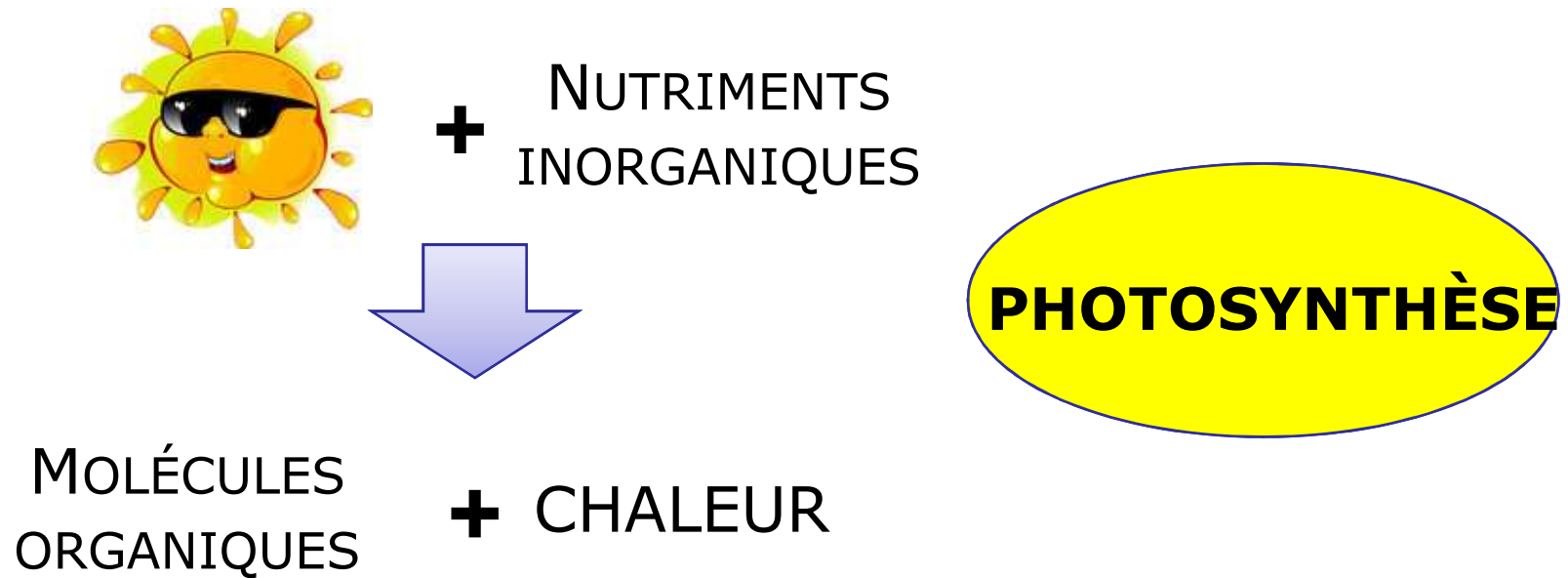
Quelle sont les sources d'**énergie** qui permettent la **VIE** sur Terre?

- Deux processus qui permettent de transformer l'énergie:
  - La photosynthèse
  - La respiration cellulaire



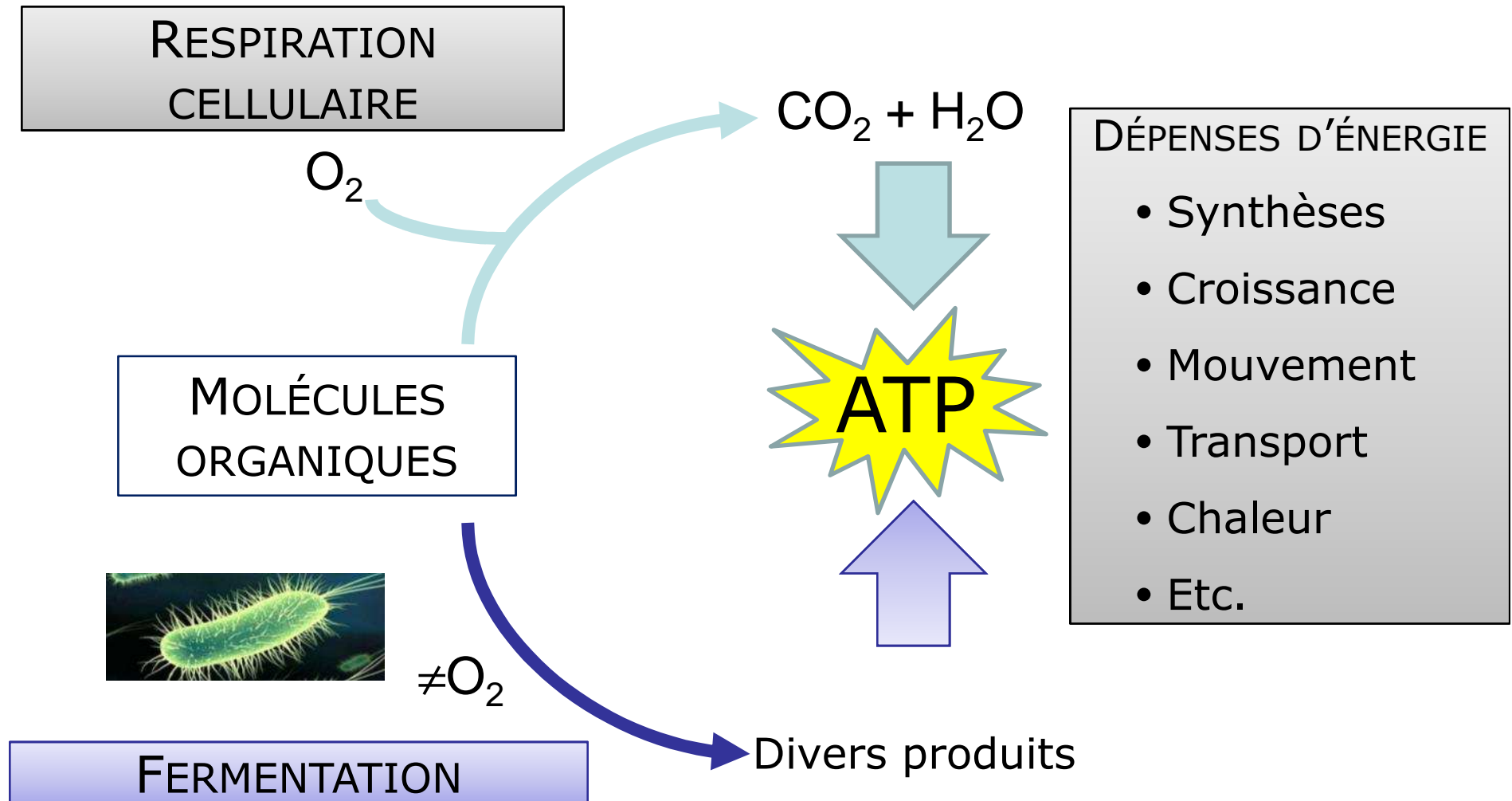
# FLUX DE L'ÉNERGIE

## LA PRODUCTION D'ÉNERGIE PAR LE VIVANT



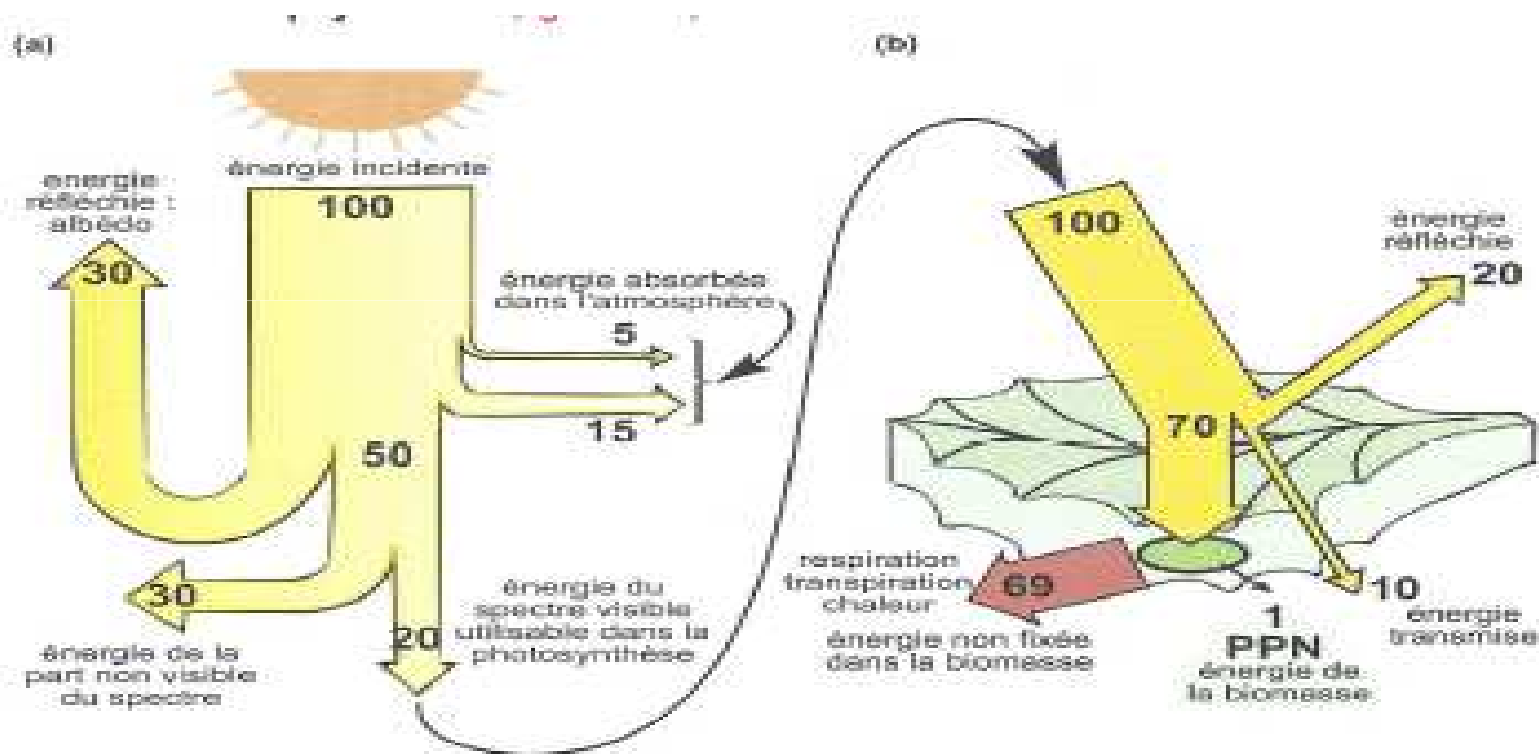
# FLUX DE L'ÉNERGIE

## LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PAR LE VIVANT



## 2. Les flux (= transferts) et les pertes (= la dissipation) d'énergie dans les réseaux trophiques

### B- Entrées et pertes de matière et d'énergie chez les producteurs primaires



De l'énergie solaire à la biomasse des producteurs primaires.

(a) Modifié d'après Barbraud ; (b) inspiré de Faurel.

**▲ FIGURE 136bis. Entrée et pertes d'énergie au niveau des producteurs primaires.**

Les données sont exprimées en indice (référence : indice 100).

D'après PEYCRU et al. (2014).

## **B.1. Des entrées (dissociées) de matière et d'énergie d'origine abiotique : lumière et matière minérale**

Les **producteurs primaires** sont caractérisés par les entrées suivantes (figure précédente) :

- **Entrée d'énergie** dans l'organisme : origine abiotique (lumière solaire)
- **Entrée de matière** dans l'organisme : origine abiotique (matière minérale)

### **Qu'est-ce que la production ?**

En écologie, la production est l'accumulation de biomasse ou d'énergie dans un écosystème ou dans un ensemble d'organismes.

On l'exprime généralement en **unité de masse (ou d'énergie) par une unité de surface par unité de temps** (exemples : kg par ha par an ou kJ par ha par an)

# Qu'est-ce que la productivité ?

Le mot peut avoir deux sens :

- 1. **Synonyme de production** (même si beaucoup d'auteurs bricolent des définitions semblant différentes, concrètement les deux termes désignent la même chose dans la majeure partie des utilisations).
- 2. **Rapport production annuelle / biomasse** ; c'est alors un rendement qui s'exprime dans une unité qui est l'inverse du temps, le plus souvent en  $\text{an}^{-1}$ .

L'inverse de la productivité (sens 2) (**vitesse de renouvellement de biomasse ou turn-over** : biomasse/productivité) désigne le temps que met un réservoir de biomasse à se renouveler ; ce temps sera d'autant plus faible que la productivité est élevée.



## Qu'est-ce que la production primaire ?

Il s'agit de l'assimilation de biomasse ou d'énergie dans les écosystèmes par les organismes autotrophes (ou une partie des autotrophes de l'écosystème)

- ☐ Soit complète (production primaire brute PPB)
- ☐ Soit considérée après les pertes par respiration (production primaire nette PPN = PPB – R).

$$\text{PPN} = \text{PPB} - \text{R}$$

**PPN (production primaire nette) = PPB (Production primaire brute = énergie assimilée par photosynthèse) – R (énergie perdue par métabolisme notamment respiration)**

**ÉNERGIE PRODUIT PAR LA  
PHOTOSYNTHÈSE  
PPB**

—

**ÉNERGIE UTILISÉE POUR  
LE MÉTABOLISME  
 $R_a$**

**PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE NETTE (PPN)**



**Énergie disponible  
pour le niveau trophique supérieur**

## **B.2. Des pertes de matière et d'énergie (plutôt conjointes) par chaleur, transpiration et respiration**

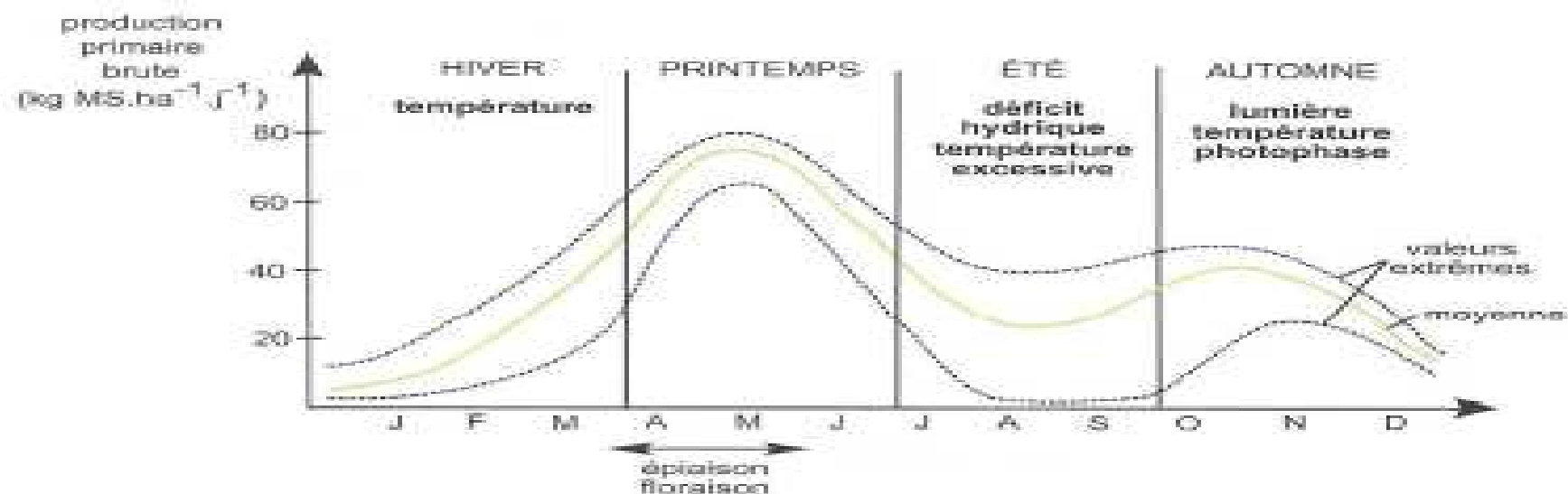
Les producteurs primaires sont caractérisés par les pertes suivantes :

- ☐ Pertes de matière + d'énergie non fixées dans la biomasse = non assimilées :
  - o chaleur,
  - o transpiration,
- ☐ Pertes de matière + d'énergie préalablement assimilées :
  - o CO<sub>2</sub> respiratoire (et autres voies métaboliques dissipatives)

## **B.3. Une influence déterminante des rythmes saisonniers (contrôlant notamment l'apport de lumière) et de l'intervention humaine (pouvant augmenter l'apport de matière par fertilisation)**

Citons deux paramètres d'importance dans le contrôle de la production primaire :

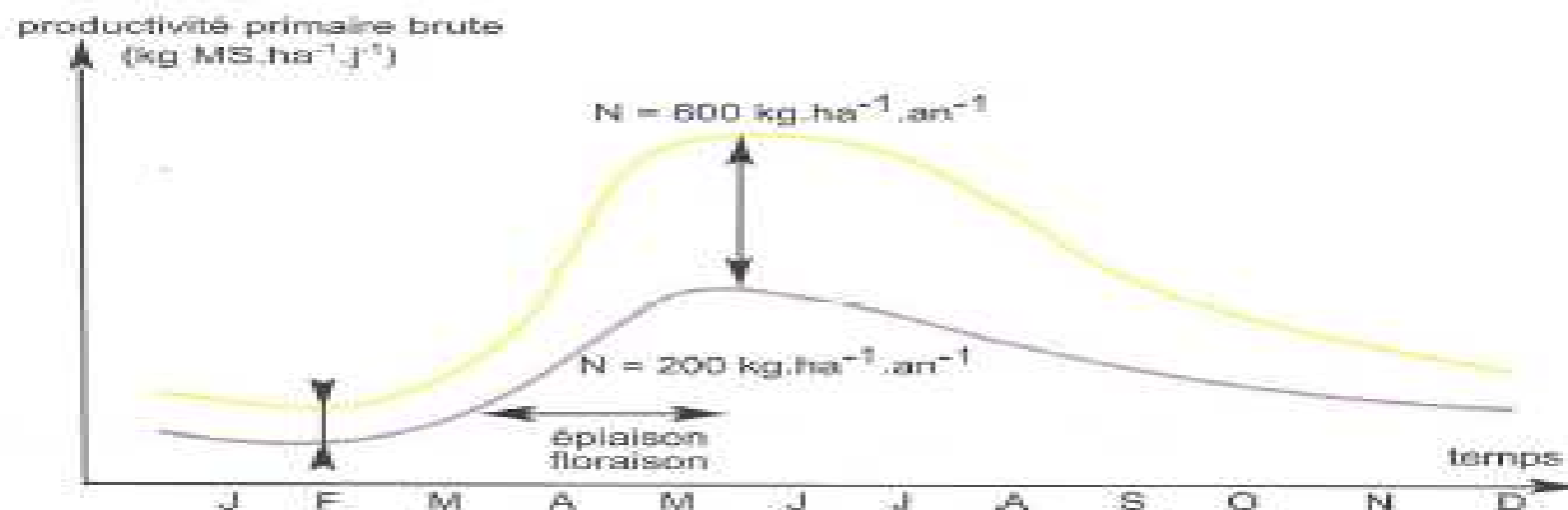
- ☐ Les variations saisonnières montrant clairement un lien positif entre ensoleillement / température et production ;
- ☐ Les apports artificiels d'engrais par l'homme qui majorent la production



Productivité primaire brute d'une prairie au cours d'une année  
(modifié d'après un document INA-PG département AGER 2003).

MS : matière sèche ; épiaison : moment où l'inflorescence se dégage de la gaine de la dernière feuille ;  
floraison : mise en place de fleurs fonctionnelles.

**▲ FIGURE 137. Variation saisonnière de la production primaire brute d'une prairie.**  
D'après PEYCRU et al. (2014).



Influence des apports d'azote sur la productivité prairiale  
(modifié d'après un document INA-PG département AGER 2003).

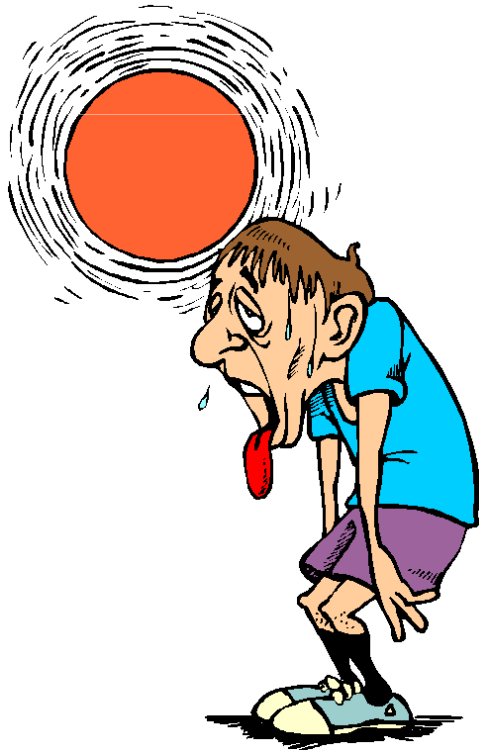
**▲ FIGURE 138. Impact de la fertilisation azotée sur la production primaire brute d'une prairie.**  
D'après PEYCRU et al. (2014).

# PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE

## LES FACTEURS LIMITANTS

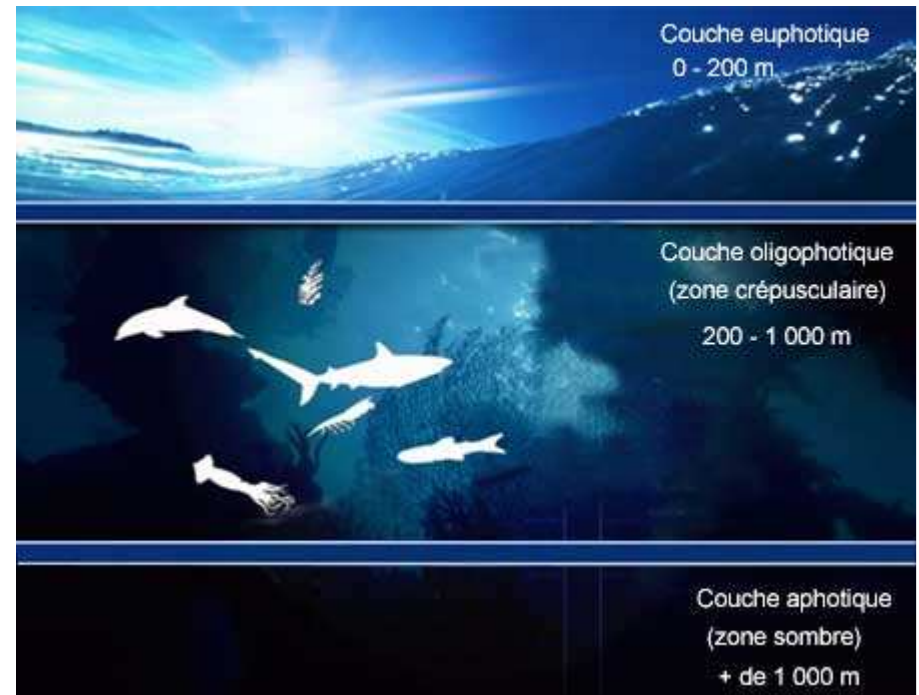
### ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES

- La température
- L'humidité



### ÉCOSYSTÈMES MARINS

- Lumière
- Les nutriments
  - Azote et phosphore



# FLUX DE L'ÉNERGIE

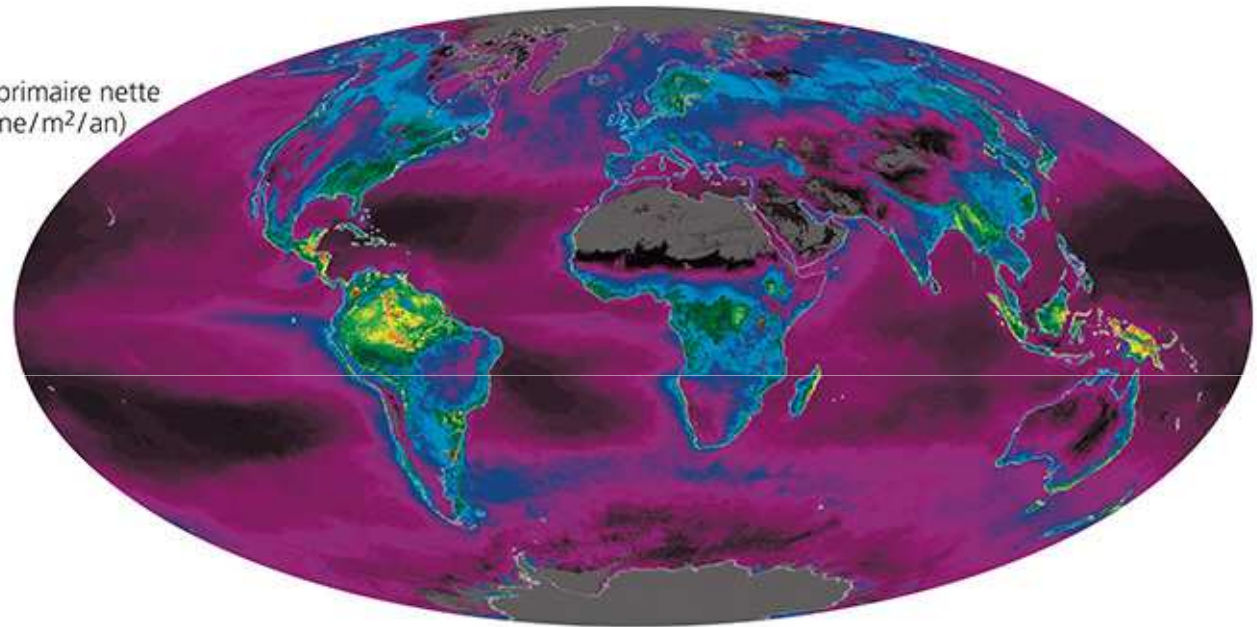
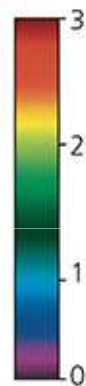
## PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE NETTE MONDIALE

► **Figure 55.6** La productivité primaire nette mondiale.

La carte est produite à partir de données satellitaires, comme la quantité de lumière absorbée par la végétation. On remarque que les régions terrestres tropicales présentent le taux de productivité le plus élevé (les zones jaunes et rouges).

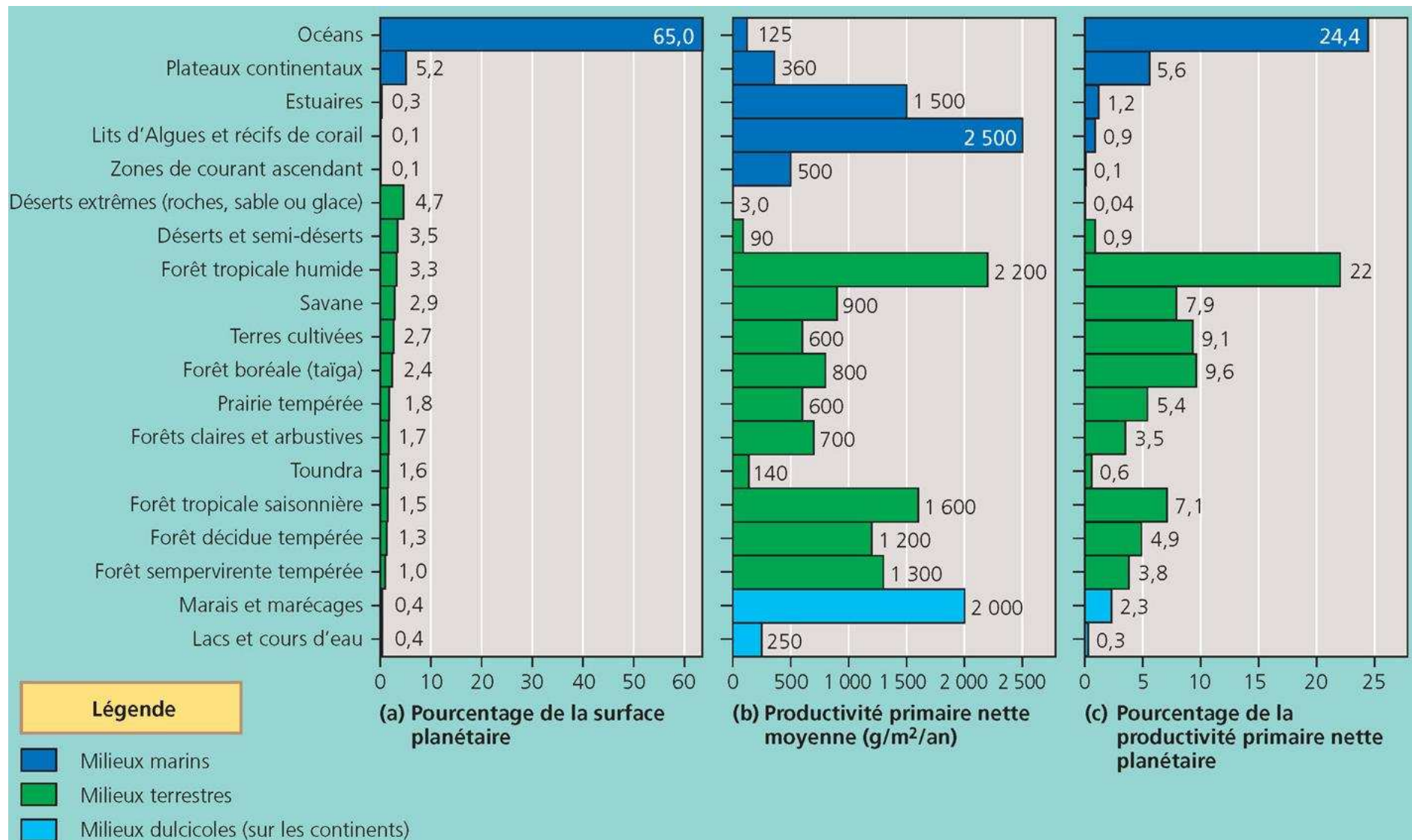
**?** Cette carte mondiale reflète-t-elle avec justesse l'importance de certains habitats très productifs, comme les milieux humides, les récifs coralliens et les zones côtières? Expliquez votre réponse.

Productivité primaire nette  
(kg de carbone/m<sup>2</sup>/an)



©ERPI, tous droits réservés.

# Production primaire planétaire





## **2. Les flux (= transferts) et les pertes (= la dissipation) d'énergie dans les réseaux trophiques**

B- Entrées et pertes de matière et d'énergie chez les  
producteurs secondaires (= consommateurs)

Les organismes ici concernés sont fondamentalement hétérotrophes

I = énergie ingérée

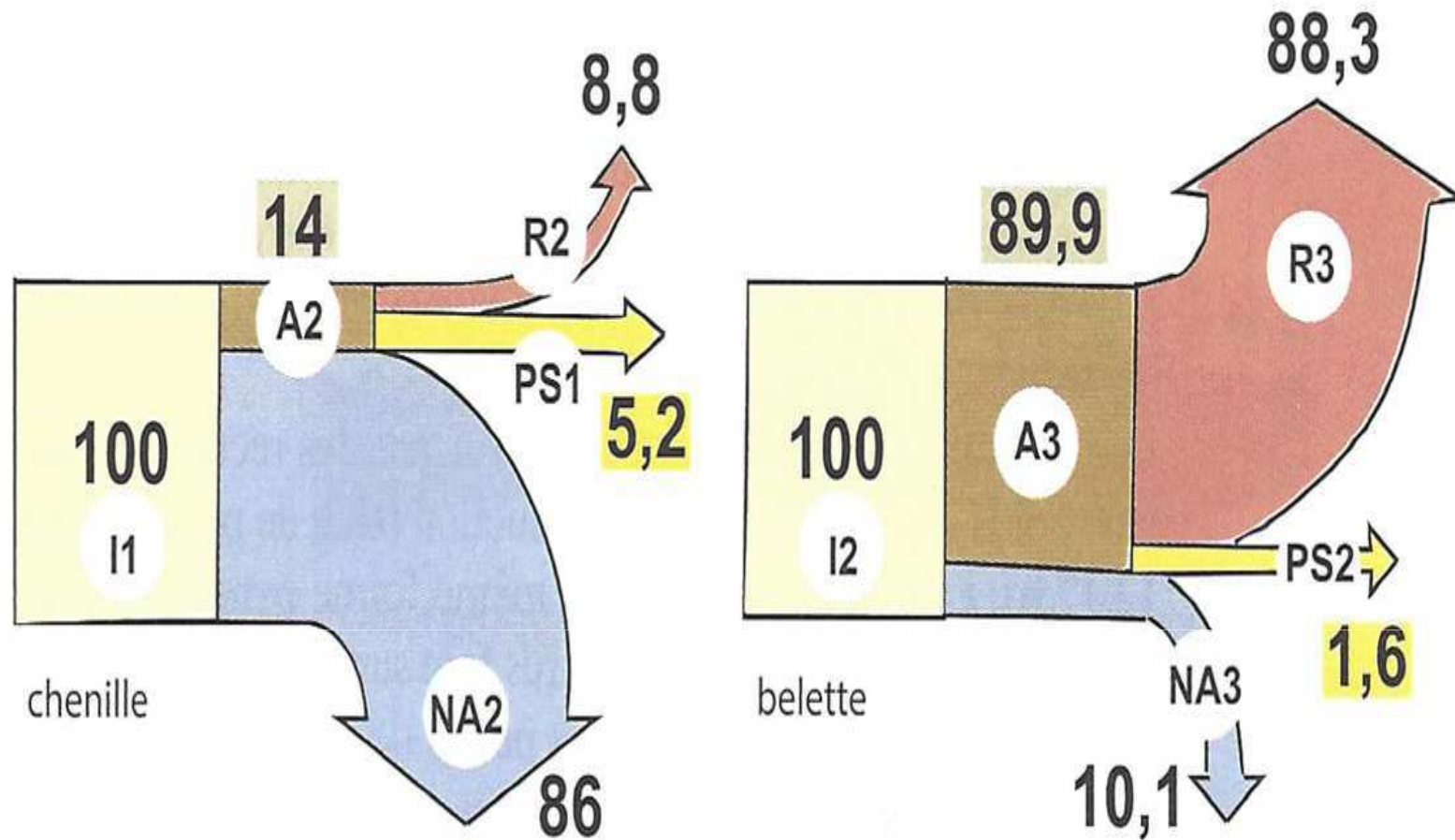
A = énergie assimilée

NA = énergie non assimilée (= fèces)

R = énergie perdue par métabolisme (respiration,  
urines)

PS = production secondaire





Rendements écologiques d'une belette (carnivore endotherme) et d'une chenille (herbivore ectotherme) (D'après Barbault).

Les valeurs encadrées en marron et en jaune représentent respectivement les rendements d'assimilation et écologique. Les indices affectant les abréviations prennent en compte les niveaux trophiques, C1 pour la chenille et C2 choisi par exemple pour la belette.

➤ La **productivité secondaire** est définie comme le taux auquel les consommateurs d'un écosystème (herbivores, carnivores) convertissent l'énergie chimique de leur nourriture en leur propre biomasse. Au sein d'une chaîne alimentaire, la productivité décline fortement à chaque transfert d'énergie entre les différents niveaux de la hiérarchie trophique, principalement du fait de la dissipation d'une partie de l'énergie chimique en chaleur.

➤ Il en découle logiquement que l'énergie chimique accumulée en biomasse par la productivité primaire n'est pas convertie entièrement en productivité secondaire : les processus d'alimentation et de digestion ne sont pas efficaces à 100 %.

Les producteurs secondaires sont caractérisés par les entrées suivantes :

➤ Entrée d'énergie + de matière (en même temps !) dans l'organisme : origine biologique (matière vivante).

Les producteurs secondaires sont caractérisés par les pertes suivantes :

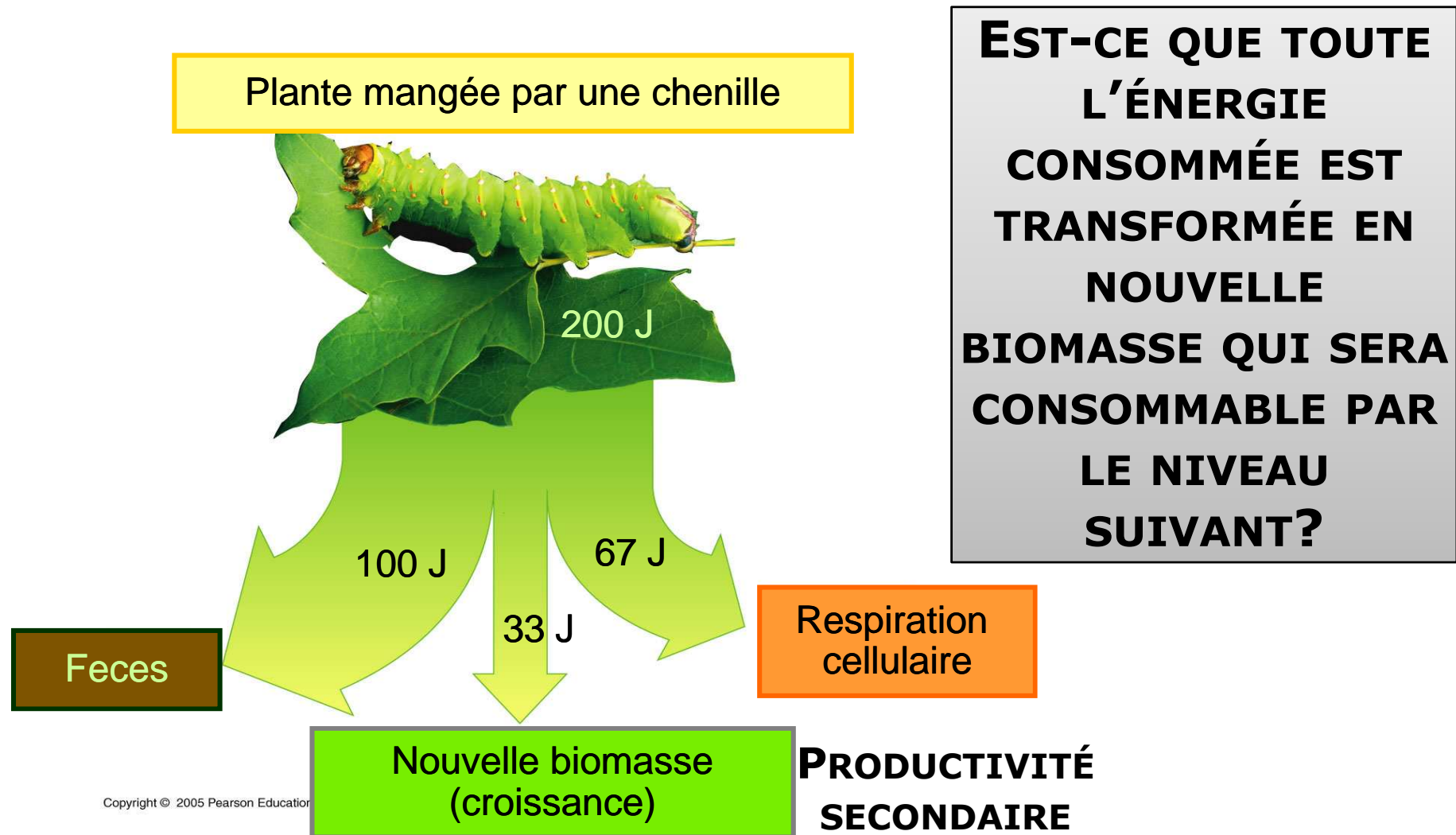
➤ Pertes de matière + d'énergie (non fixé dans la biomasse = non assimilé) :

- o Chaleur (dissipation importante chez un homéotherme),
- o transpiration,

➤ Pertes de matière + d'énergie préalablement assimilées :

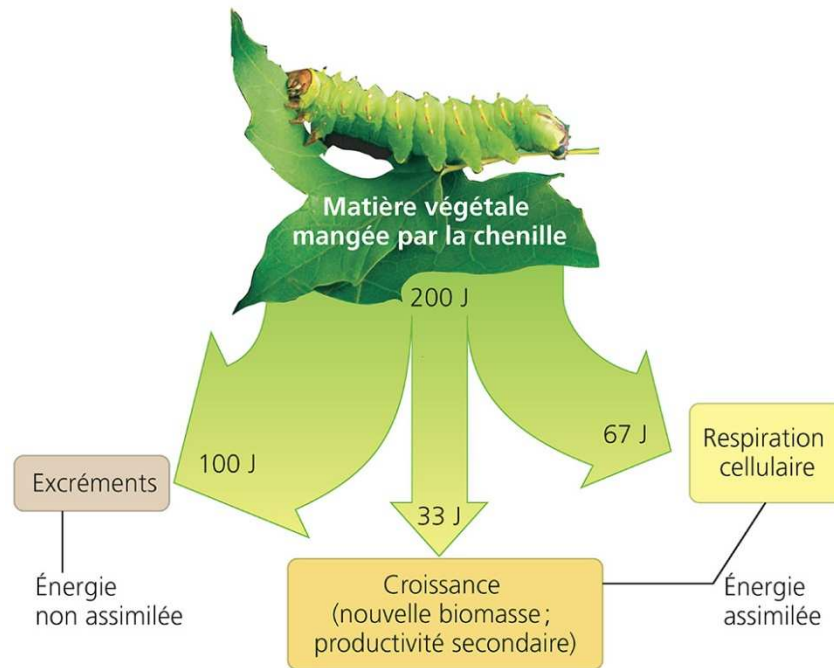
- o CO<sub>2</sub> respiratoire
- o Déchets azotés et ioniques (dans les urines)

# FLUX DE L'ÉNERGIE ET LA PRODUCTION SECONDAIRE



# Rendement écologique: un exemple

Supposons un minuscule écosystème où seuls poussent une plante et une chenille...



▲ **Figure 55.10** La répartition de l'énergie dans un niveau de chaîne trophique.

- Productivité nette de la plante: 200 J/an
- Productivité nette de la chenille: ?? J/an?
- Rendement écologique de la chenille = ?? %

# Une efficacité des flux dont il est possible de rendre compte en calculant des rendements

Divers rendements permettent de rendre compte de l'efficacité des transferts de matière et d'énergie.

$$\text{Rendement d'exploitation} = \frac{\text{Ingestion de nourriture}}{\text{Production de proies}}$$

$$\text{Rendement d'assimilation} = \frac{\text{Assimilation}}{\text{Ingestion}}$$

$$\text{Rendement de production nette} = \frac{\text{Production (croissance et reproduction)}}{\text{Assimilation}}$$

$$\begin{aligned}\text{Rendement de production brute} &= \text{Rendement d'assimilation} \times \text{Rendement de production nette} \\ &= \frac{\text{Production}}{\text{Ingestion}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rendement écologique} &= \text{Rendement d'exploitation} \\ &\quad \times \text{Rendement d'assimilation} \\ &\quad \times \text{Rendement de production nette} \\ &= \frac{\text{Production de consommateurs}}{\text{Production de proies}}\end{aligned}$$

➤ On définit alors le rendement écologique (efficacité) entre deux niveaux trophiques comme le rapport entre la productivité nette du niveau supérieur et celle du niveau inférieur.

➤ L'efficacité est d'environ 10 % (part de l'énergie réellement convertie en biomasse lors du transfert). Selon l'écosystème, on estime que les variations vont de 5 % à 20 %. On appelle producteur secondaire un être vivant qui fabrique sa matière organique à partir de la matière organique produite par d'autres êtres vivants.

## Flux d'énergie: mathématiques

- Productivité nette (PN):

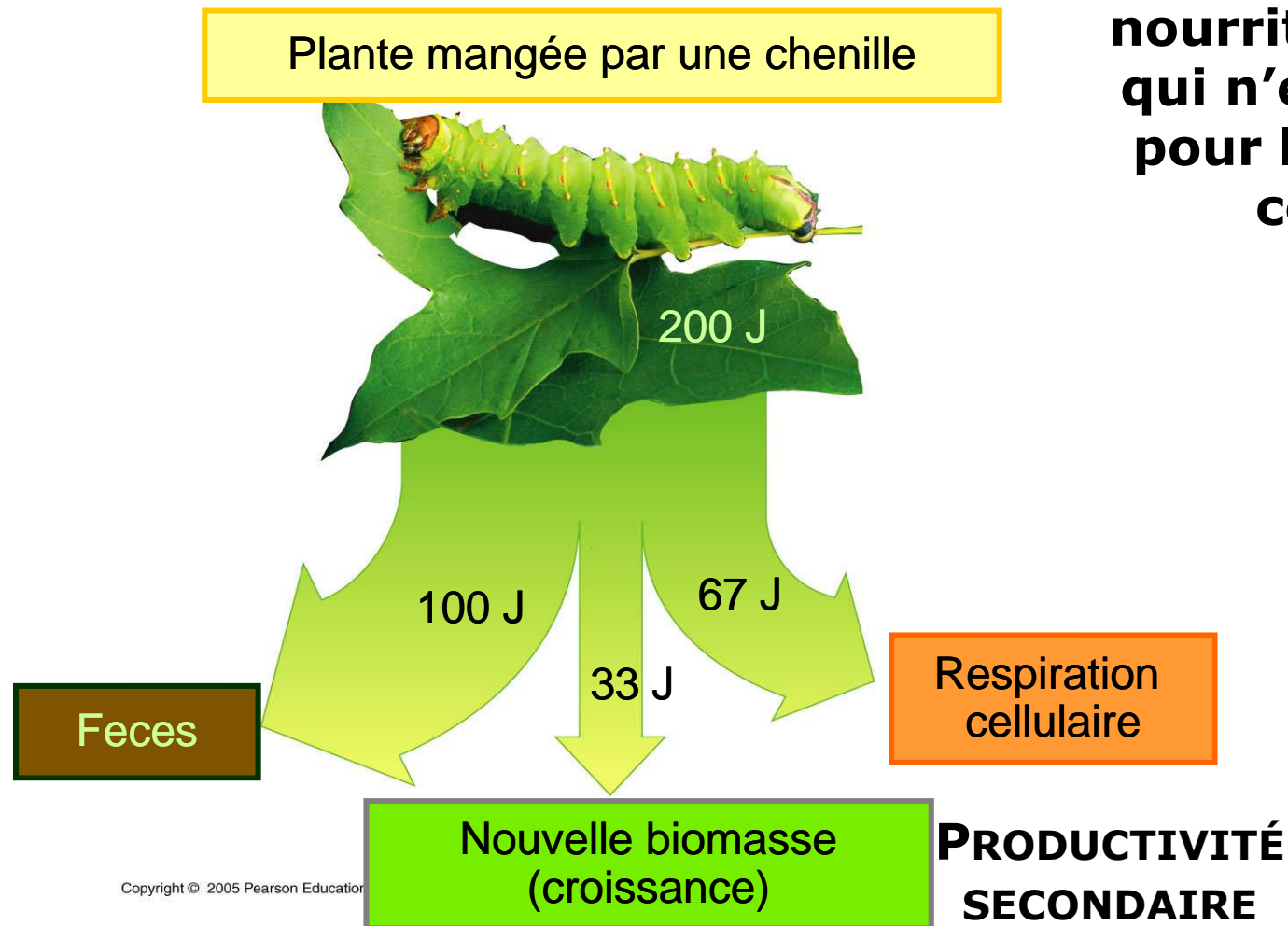
changement de biomasse / surface (ou volume) / temps

- Efficacité ou (rendement) écologique (%):

$(\text{PN niveau supérieur} / \text{PN niveau inférieur}) \times 100$

ex:  $(\text{PN carnivores} / \text{PN herbivores}) \times 100$

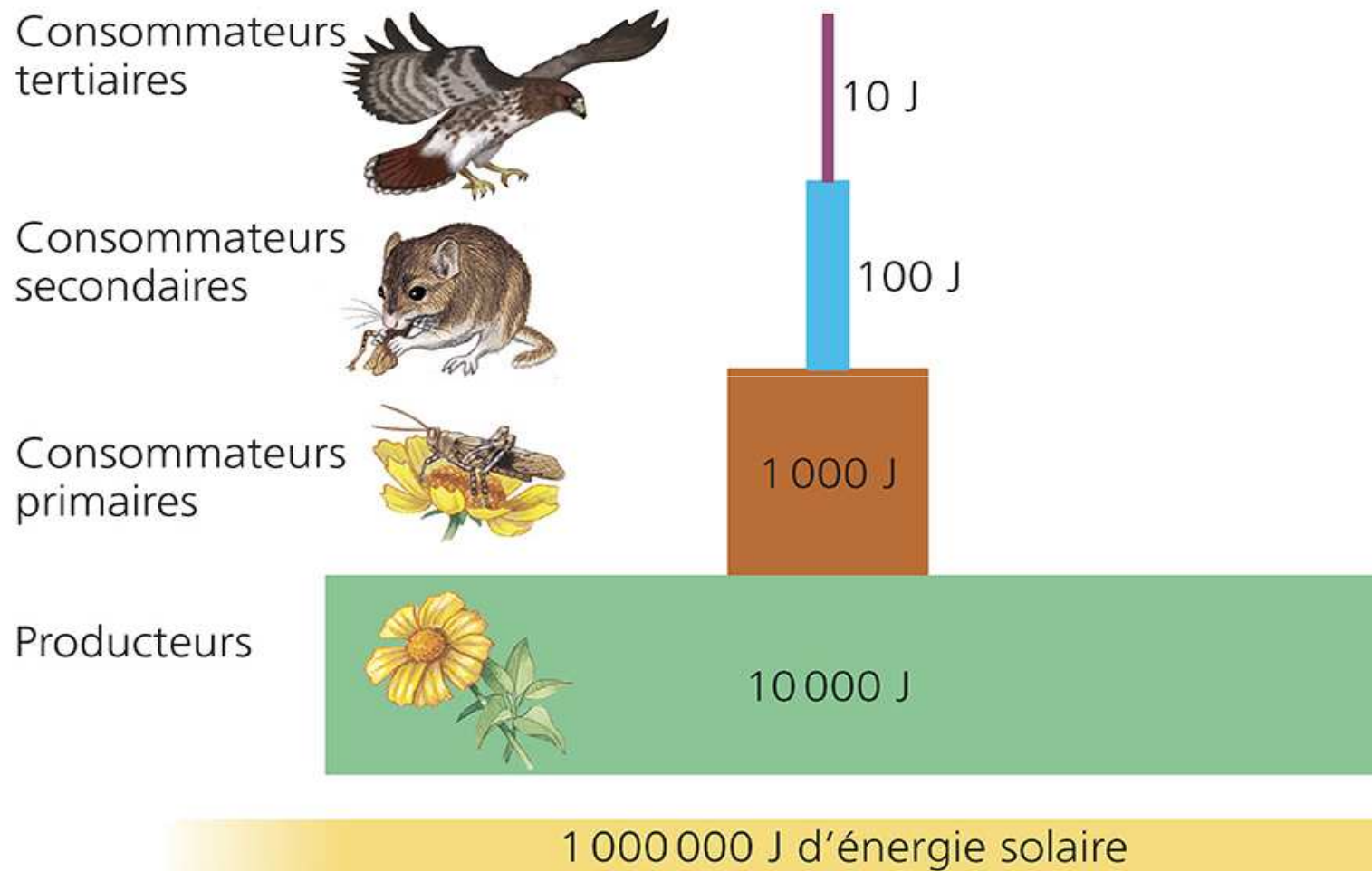
# FLUX DE L'ÉNERGIE ET L'EFFICACITÉ ÉCOLOGIQUE



% d'énergie dans la  
nourriture assimilée  
qui n'est pas utilisé  
pour la respiration  
cellulaire.



# FLUX DE L'ÉNERGIE L'EFFICACITÉ TROPHIQUE



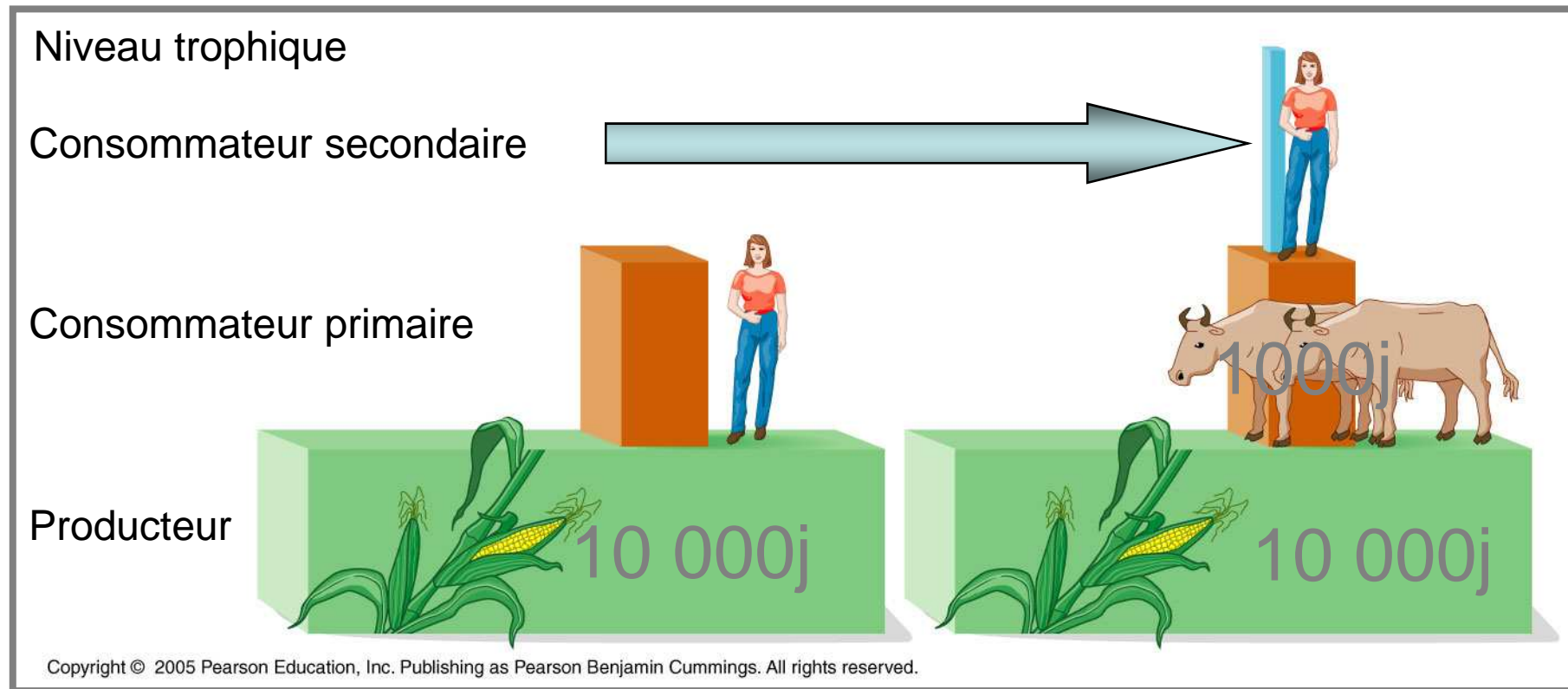
▲ **Figure 55.11** Une pyramide théorique de productivité nette.

# FLUX DE L'ÉNERGIE

## PYRAMIDE DE PRODUCTIVITÉ

- **L'efficacité trophique** est le % d'énergie produite par un niveau trophique qui est transféré à un autre
- Entre 5 et 20% habituellement
- La pyramide de production = perte d'énergie à chaque transfert dans le réseau trophique

# FLUX DE L'ÉNERGIE : MANGER DE LA VIANDE, EST-CE EFFICACE?



10

PERSONNES

1 PERSONNE

RENDEMENT (%) =

Productivité niveau sup / productivité niveau inf X

# **FLUX DE LA MATIÈRE**

## **LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES**

- **CYCLES DES NUTRIMENTS DANS L'ÉCOSYSTÈME**
  - Composantes biotiques et abiotiques
- **RECYCLAGE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES**

**RÔLE ESSENTIEL DES  
DÉCOMPOSEURS  
(DÉTRITIVORES)**

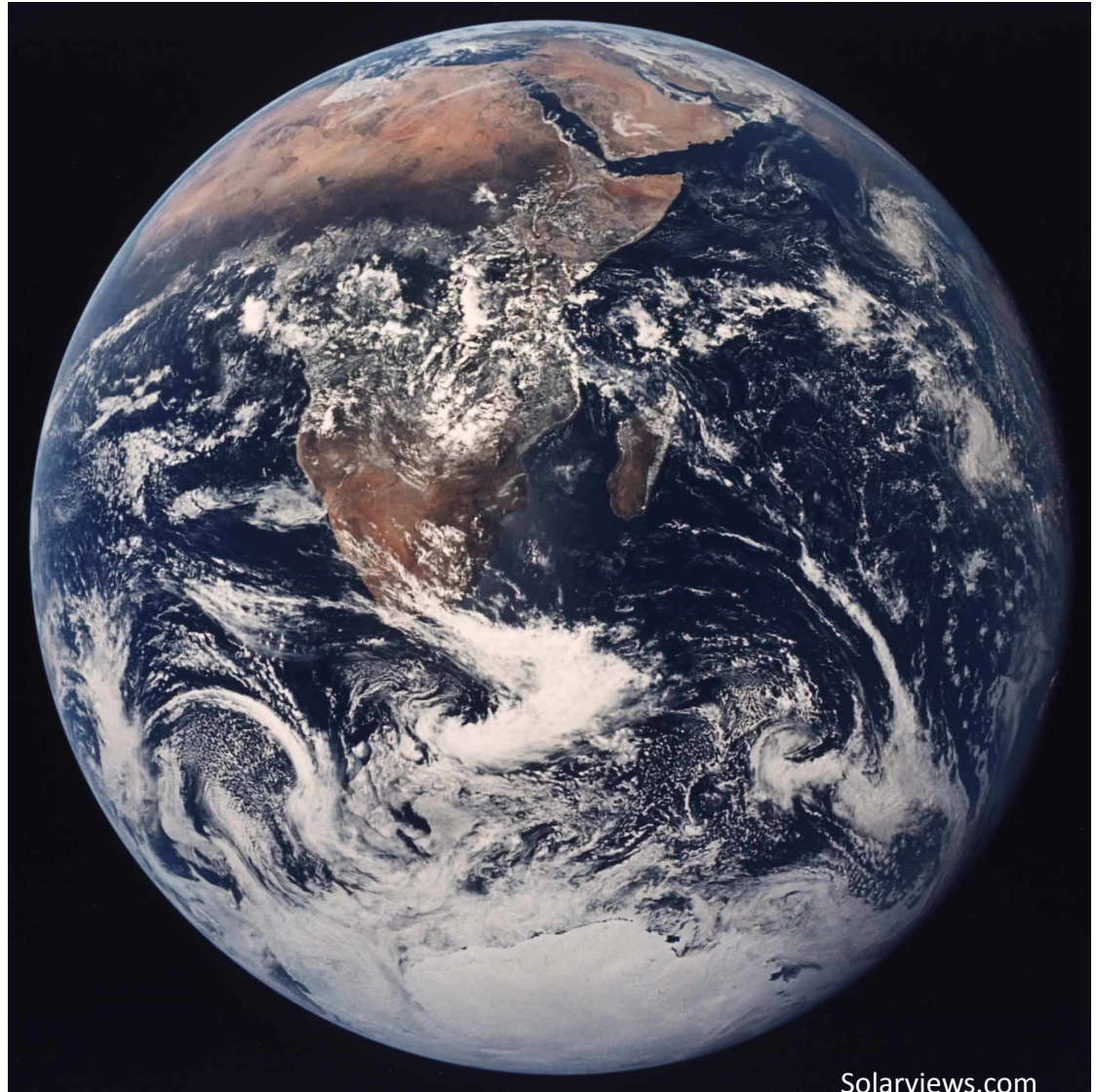
# FLUX DE MATIÈRE

## LES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

Le va et vient de la matière

**LES CLASSIQUES:**

- **CARBONE**
- **AZOTE**
- **PHOSPHORE**



## **2) les cycles biogéochimiques en milieux aquatiques**

# **Le cycle du Carbone**

# Importance du cycle du Carbone

- Cycle très complexe
- Très impliqué dans le réchauffement climatique
- Réserves Océaniques, atmosphériques, biosphère, et lithosphère
- Implique des processus chimiques, géologiques, physiques, océaniques et biologiques.



- Le recyclage des éléments à travers les diverses composantes à la surface de la Planète est fortement lié au fait que la Terre est une planète vivante.
- L'élément le plus critique attaché à ce recyclage est sans contredit le carbone.
- Depuis que le cycle biologique du carbone est apparu sur Terre, il a en quelque sorte transformé cette planète en un système fermé qui assure sa continuité. Il est le constituant majeur de deux gaz à effet de serre,  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ , sans lequel il ne saurait y avoir de vie sur terre ; son recyclage influence particulièrement la productivité biologique et le climat.

- Le cycle global du carbone implique des processus qui agissent en milieu terrestre et en milieu océanique et où interviennent des réactions chimiques biologiques et non-biologiques. On ne peut discuter sérieusement de changements climatiques sans connaître ces processus.

- **L'élément Carbone**

- rôle essentiel dans la constitution de la matière vivante composés organiques (biomasse)
- possédant des liaisons C-C et C-H : élément biogène majeur
- influence déterminante dans l'ajustement des climats terrestres (effet de serre : CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>)

- Dans la nature, le carbone se retrouve sous deux formes:
  - **le carbone organique (C org);** produit par des organismes vivants et qui est lié à d'autres carbones ou à des éléments comme l'hydrogène (H), l'azote (N) ou le phosphore (P) dans les molécules organiques ou les hydrocarbures.
  - **le carbone inorganique (C inorg);** associé à des composés inorganiques, c'est-à-dire des composés qui ne sont pas et n'ont pas été du vivant et qui ne contiennent pas de lien C-C ou C-H, comme par exemple le carbone du  $\text{CO}_2$  atmosphérique ou celui des calcaires  $\text{CaCO}_3$ .

- le grand réservoir de carbone est constitué par les roches sédimentaires.
- Un autre grand réservoir est l'océan; on verra qu'il s'agit en fait de l'océan profond (plus de 100 mètres de profondeur).
- la pellicule superficielle de la planète recèle relativement peu de carbone, mais ce carbone est bien important pour la Vie et l'influence qu'il y exerce.
- Temps de séjour du carbone dans les différents réservoirs.

# Temps de séjour du carbone dans les différents réservoirs

- **cycle court :**

- l'atmosphère : 7ans
- la biomasse : 17ans
- l'hydrosphère superficielle: 400ans

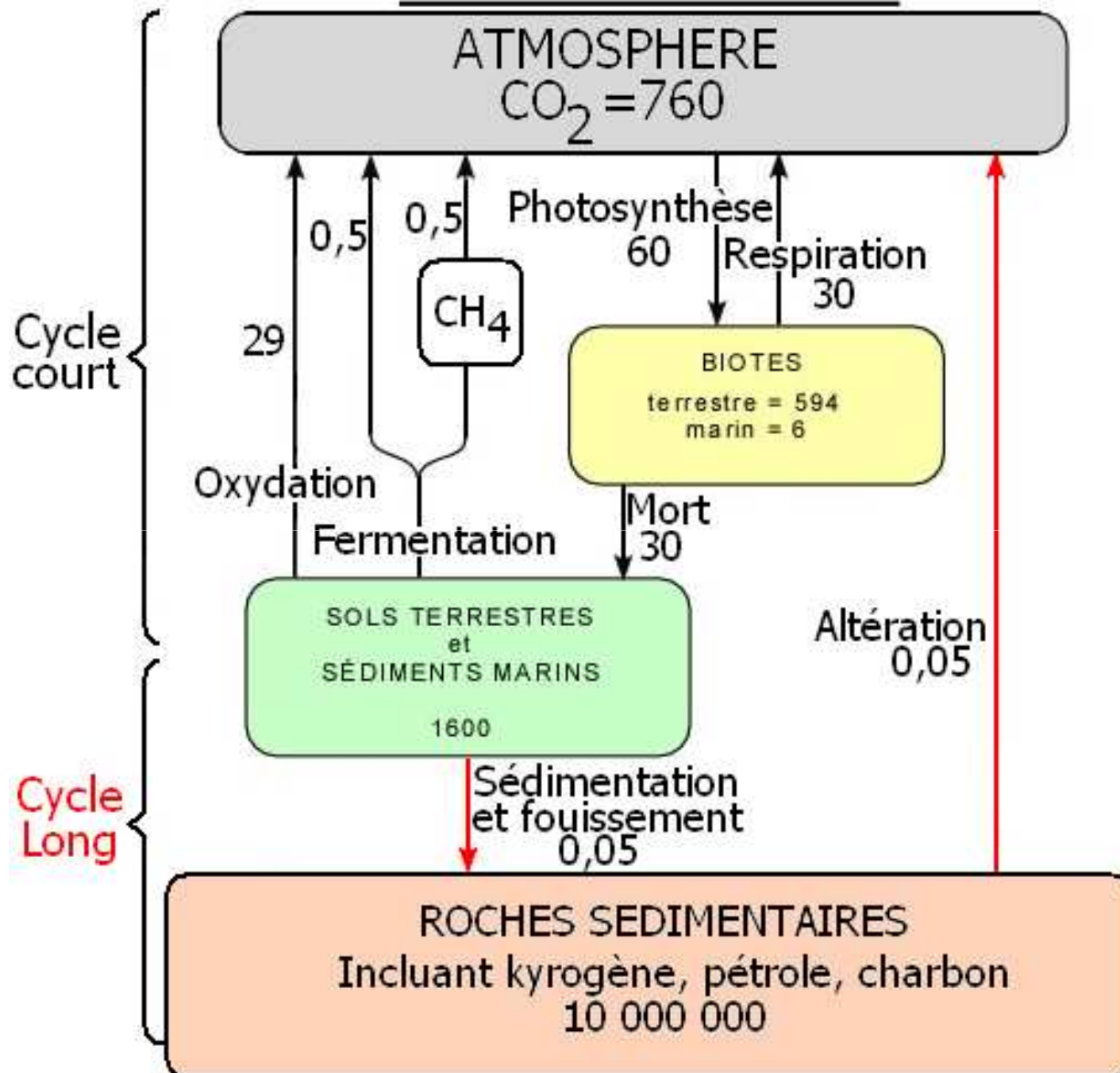
- **cycle long :**

- océan profond : 100 Ka
- lithosphère : 200 Ma

# Le cycle du carbone organique

Pour le cycle court, on parle de processus qui s'étalent sur des temps inférieurs au siècle. Le processus de base du recyclage du carbone à court terme est le couple photosynthèse-respiration, c'est-à-dire la conversion du C inorg du  $\text{CO}_2$  en C org par la photosynthèse, et subséquemment l'inverse, la conversion du C org de la matière organique en C inorg par la respiration. Il faut considérer trois réactions de base.

# CYCLE DU CARBONE ORGANIQUE



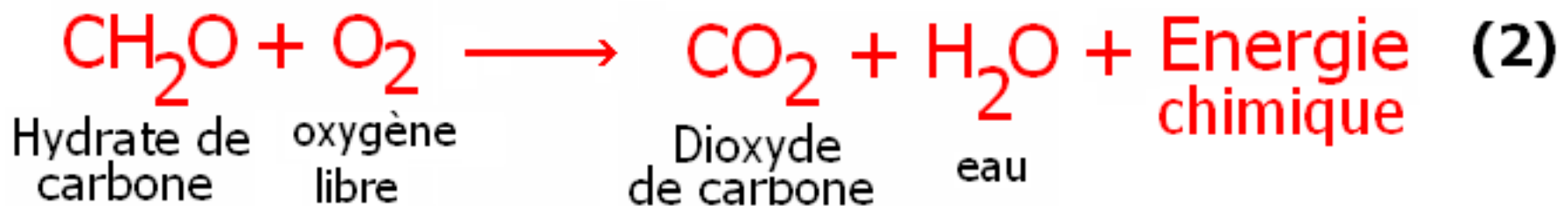
D'abord, la **photosynthèse** qui utilise l'énergie solaire pour synthétiser la matière organique en fixant le carbone dans des hydrates de carbone ( $\text{CH}_2\text{O}$ ):



La matière organique est représentée ici par  $\text{CH}_2\text{O}$ , la forme la plus simple d'hydrate de carbone. En réalité, il s'agit de molécules beaucoup plus grosses et plus complexes dont la base demeure les éléments C, H et O, mais auxquels viennent se joindre d'autres éléments en faibles quantités comme l'azote (N), le phosphore (P) et/ou le soufre (S)



- Cette partie de la matière organique correspond à la productivité primaire, et les organismes impliqués (bactéries, algues et plantes) sont les **producteurs primaires**. Ceux-ci captent l'énergie solaire et la transforment en énergie chimique qu'ils stockent dans leurs tissus. Cette dernière est transférée aux organismes **consommateurs**, incluant les animaux. Il est intéressant de noter que dans la nature la biomasse des consommateurs est bien inférieure (ne comptant que pour environ 1% de la masse totale) à celle des producteurs primaires.
- Les consommateurs tirent leur énergie de celle qui est contenue dans les producteurs primaires en ingérant leurs tissus et en respirant. La respiration est l'inverse de la photosynthèse: à partir de l'oxygène libre O<sub>2</sub>, elle transforme toute matière organique en CO<sub>2</sub>: c'est la respiration



Il s'agit d'une réaction qui nécessite la disponibilité d'oxygène libre O<sub>2</sub>. Dans la nature, une partie de la matière organique est respirée (oxydée) par les animaux ou les plantes elles-mêmes; une autre partie se retrouve dans les sols terrestres ou les sédiments marins.

- La fermentation produit du dioxyde de carbone et du méthane (l'hydrocarbure le plus simple, avec une seule molécule de carbone).



- Ces deux gaz peuvent s'échapper dans l'atmosphère oxygénée. Le méthane, qui est un gaz à effet de serre 20 fois plus efficace que le CO<sub>2</sub>, est alors oxydé et se transforme rapidement en dioxyde de carbone.

# Le cycle long du carbone organique



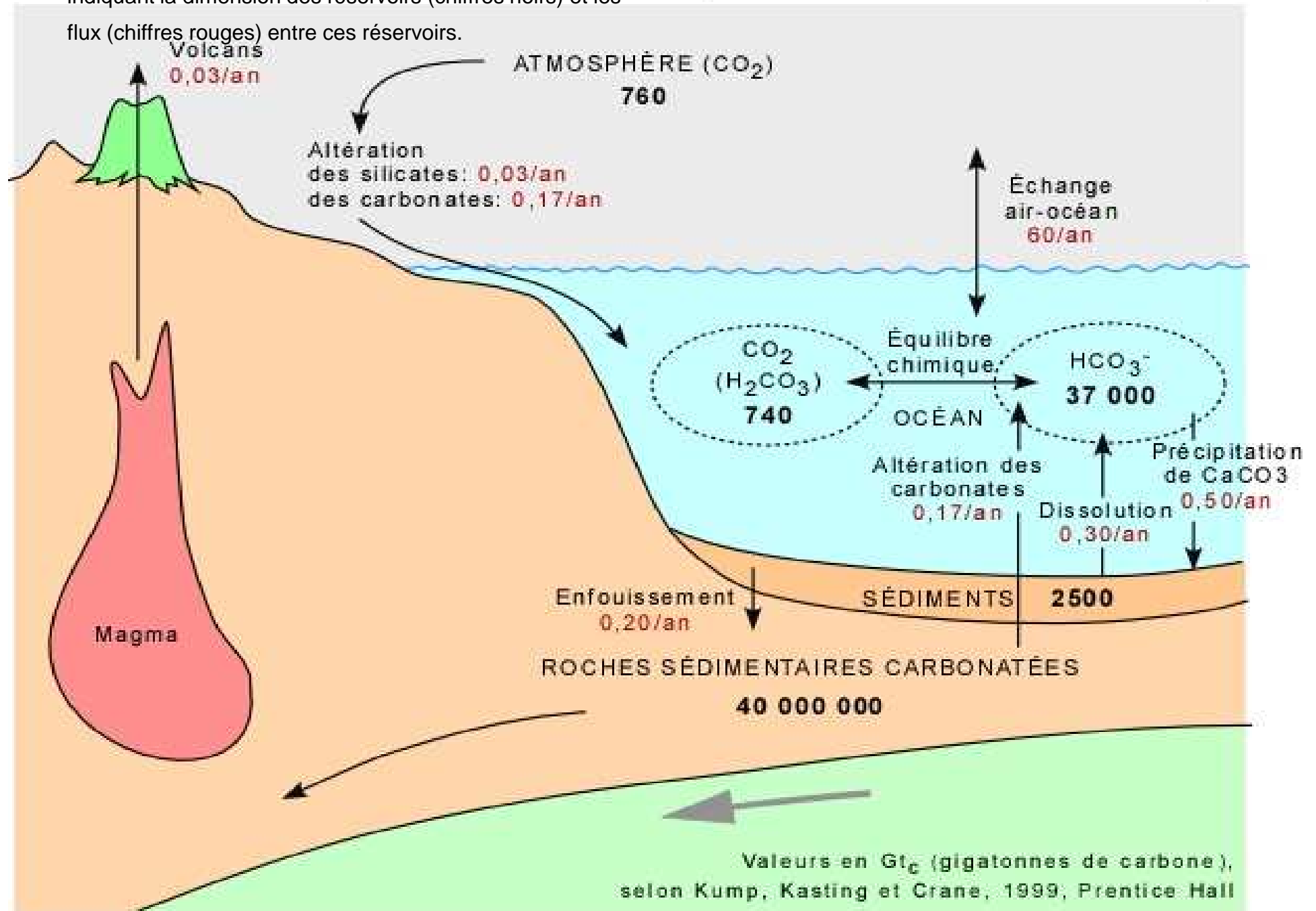
Sur des échelles de temps beaucoup plus longues, ce sont les processus de nature géologique qui deviennent les contrôles les plus importants, des processus qui agissent sur des milliers et des millions d'années. Il s'agit de processus tels l'enfouissement des matières organiques dans les sédiments et roches sédimentaires, leur transformation en combustibles fossiles et leur altération (oxygénation) subséquente. Les flux de carbone liés à ces processus sont faibles; en revanche, les réservoirs sont immenses (voir figure du cycle du carbone organique plus haut) et le temps impliqué très long.

# Le cycle du carbone inorganique

- On a vu que l'interaction photosynthèse-respiration-fermentation est le noeud du cycle du carbone organique. Il y a cependant d'autres processus de recyclage du carbone qui impliquent cette fois le carbone inorganique, entre autres, celui qui est contenu dans le dioxyde ( $\text{CO}_2$ ) et dans les calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ).
- Les réservoirs importants de Cinorg sont l'atmosphère, les océans, ainsi que les sédiments et roches carbonatées, principalement les calcaires  $\text{CaCO}_3$ , mais aussi les dolomies  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Pour bien comprendre ce cycle, il est essentiel d'avoir d'abord quelques notions de base sur la chimie du carbone inorganique dans l'eau.

Cette figure résume le cycle du carbone inorganique, en indiquant la dimension des réservoirs (chiffres noirs) et les flux (chiffres rouges) entre ces réservoirs.

## CYCLE DU CARBONE INORGANIQUE



Captage du CO<sub>2</sub> et chimie du carbone inorganique (Cinorg) dans l'eau sont deux sujets à toutes fins pratiques indissociables et sont traités ici ensemble.

- Un premier niveau de captage du CO<sub>2</sub> qui agit sur terre et dans l'océan est celui de la photosynthèse qui transforme le Cinorg du CO<sub>2</sub> en Corg et qui s'exprime par l'équation (1):



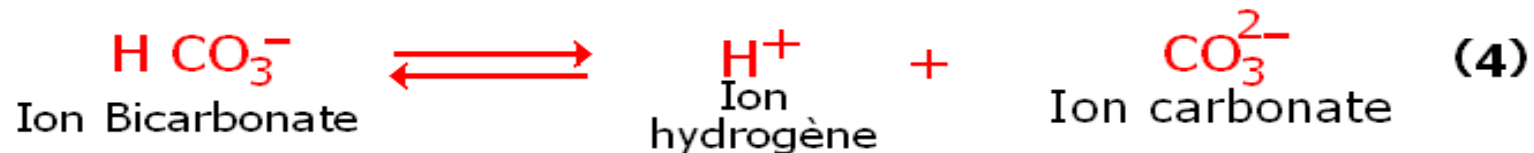
- Un second niveau très important est la dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'océan. Quand le CO<sub>2</sub> est dissout dans l'eau, de l'acide carbonique se forme (2):



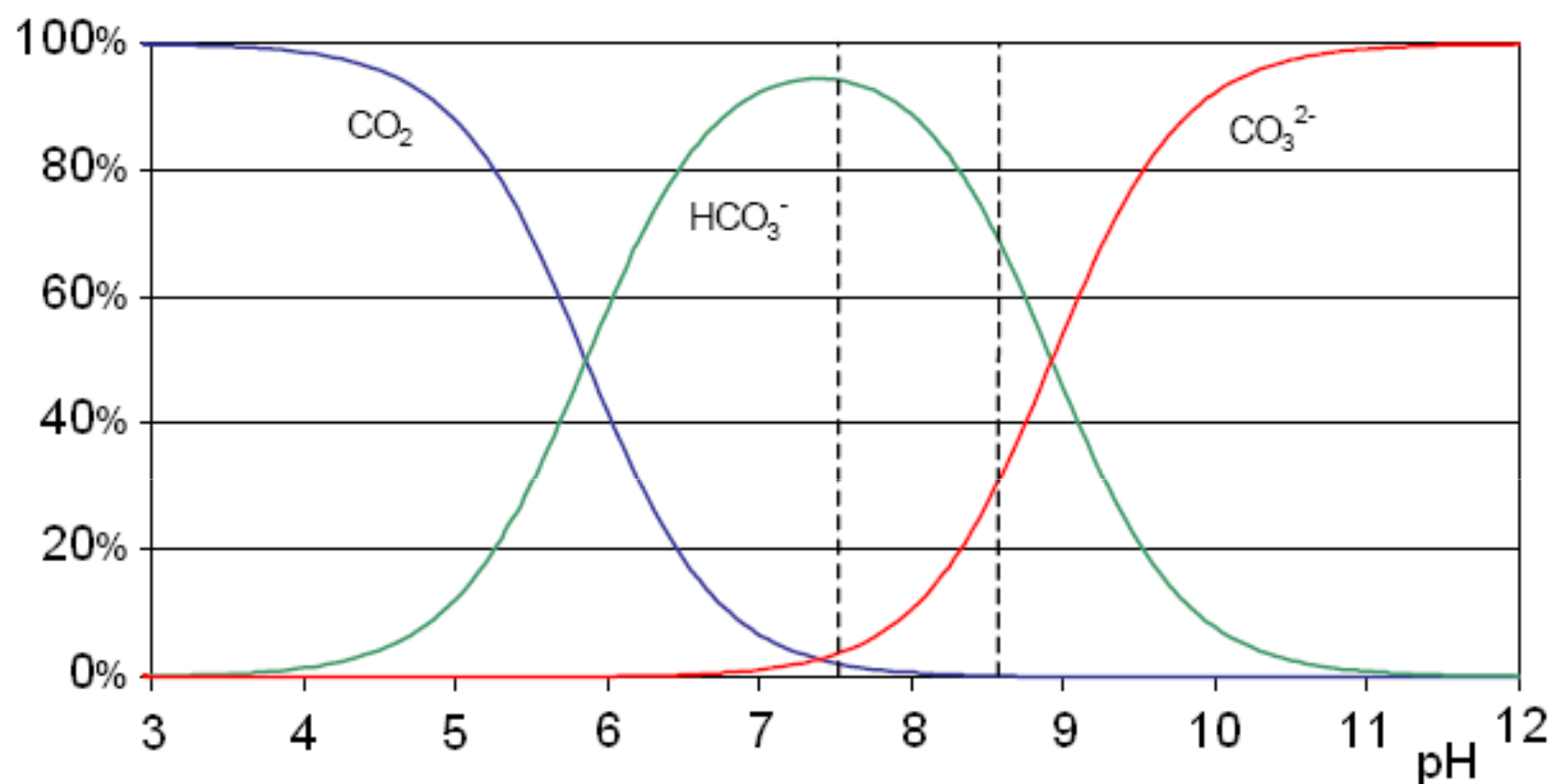
- Cet acide carbonique se dissocie en libérant ses atomes d'hydrogène. Quand son premier atome est libéré, il se forme un ion bicarbonate: (3)



- ✓ Le pH de l'eau contrôle cette réaction. Si la concentration en  $H^+$  diminue, ce qui correspond à une augmentation de pH, le rééquilibrage de l'équation entraîne une réaction vers la droite et une plus grande quantité d'acide carbonique se dissocie. À l'inverse, une augmentation de la concentration en  $H^+$  (soit une diminution du pH) entraîne une réaction vers la gauche et forme  $H_2CO_3$  au détriment de  $HCO_3^-$ .
- ✓ Quand le second atome d'hydrogène de l'acide carbonique est libéré, le bicarbonate  $HCO_3^-$  se transforme en carbonate  $CO_3^{2-}$  selon: (4)



- ✓ Pour une concentration en  $H^+$  donnée, les quantités relatives d'ions carbonates et bicarbonates s'ajustent jusqu'à l'atteinte de l'équilibre. Un pH supérieur à 7, favorise la production des ions carbonates, alors qu'un pH inférieur à 7 favorise les ions bicarbonates. De manière générale, les eaux marines sont alcalines ( $pH > 7$ ) et les eaux douces continentales ont un pH variable selon la structure géologique du bassin versant.

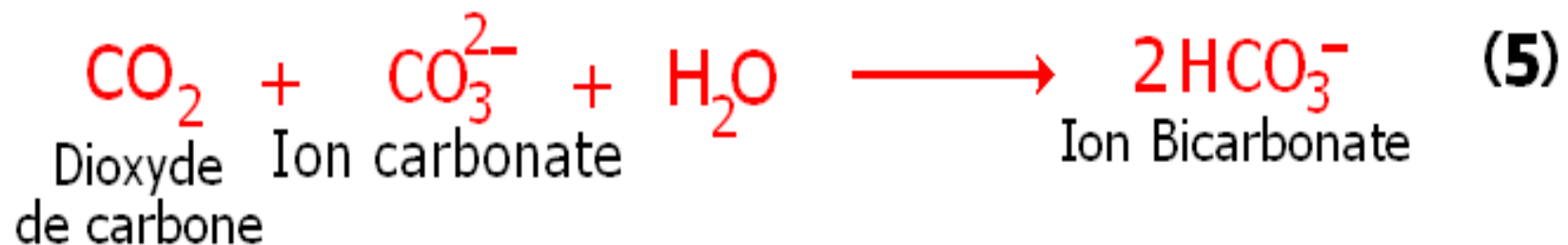


Variation en fonction du pH des rapports  $[\text{CO}_2] / \text{CT}$ ,  $[\text{HCO}_3^-] / \text{CT}$  et  $[\text{CO}_3^{2-}] / \text{CT}$ , en %, dans une eau de salinité 35 et à 25°C sans échange avec l'atmosphère. Le domaine des pH habituels des eaux de mer (7,5 à 8,6) est délimité par des tirets.



La perturbation de cet équilibre, par la diffusion de  $\text{CO}_2$  anthropique de l'atmosphère vers l'océan, changera le pH de l'eau marine. Un changement de pH affectera les concentrations relatives de l'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , des ions bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  et des ions carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  de la façon suivante: la dissolution du  $\text{CO}_2$  forme de l'acide carbonique (R 2), et la dissociation de l'acide carbonique produit des ions bicarbonates et hydrogènes (R 3)

La production de ces derniers entraînant une baisse de pH. Les ions hydrogènes réagissent alors avec les ions carbonates pour former d'autres ions bicarbonates (inverse de la réaction 4, c'est-à-dire réaction vers la gauche). La réaction chimique exprimant le captage d'un excès de  $\text{CO}_2$  par l'océan est la somme de ces trois réactions, (5)



Du fait qu'il y a conversion du carbone du  $\text{CO}_2$  en d'autres formes de carbone, la capacité de l'océan à capter un excès de  $\text{CO}_2$  atmosphérique (par exemple, anthropique) est augmentée par rapport à ce qu'elle serait s'il n'y avait qu'un simple équilibre des pressions entre atmosphère et océan. Mais, il y a une limite à cette capacité. Ce sont les ions carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  qui tamponnent le pH de l'eau marine et c'est leur quantité qui fixera la limite.

Deux cas sont à considérer par rapport à la production de  $\text{CO}_2$  atmosphérique issue de la combustion des pétroles et des charbons:  
Le pouvoir tampon de l'océan superficiel (de 0 à 100 mètres de profondeur) est très faible.

On évalue que l'océan intermédiaire et profond (de 100 à 4000 mètres) contient une quantité d'ions carbonates pour tamponner au plus 30% du réservoir actuel des combustibles fossiles.

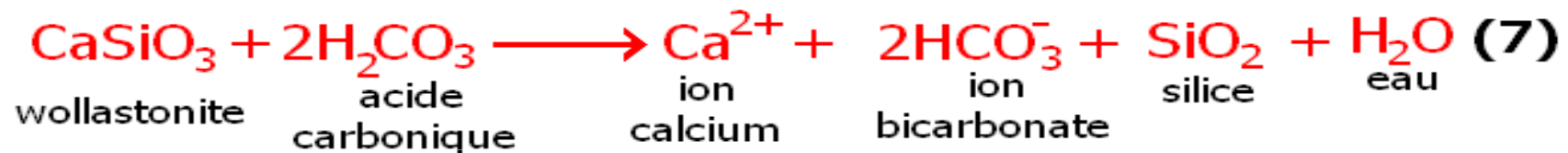
Un phénomène semblable s'applique à la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans les eaux de pluies (réactions 2 et 3), les rendant naturellement acides (pH normalement entre 5 et 6, quand il n'est pas encore plus faible à cause de la pollution). Ces eaux acides viennent altérer chimiquement les massifs rocheux continentaux. Les produits de cette altération, une fois transférés dans le bassin océanique par les cours d'eau, ont une influence sur la capacité de captage du  $\text{CO}_2$  des océans.

L'altération chimique des deux grands types de minéraux, les silicates et les carbonates, est particulièrement significative. Un des produits d'altération important ici est l'ion calcium  $\text{Ca}^{2+}$ .

Ce calcium est abondant chez les carbonates dont les deux principaux minéraux sont la calcite  $\text{CaCO}_3$  (carbonate de calcium) et la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (carbonate de calcium et magnésium). Chez les silicates, on trouve du calcium dans des minéraux comme

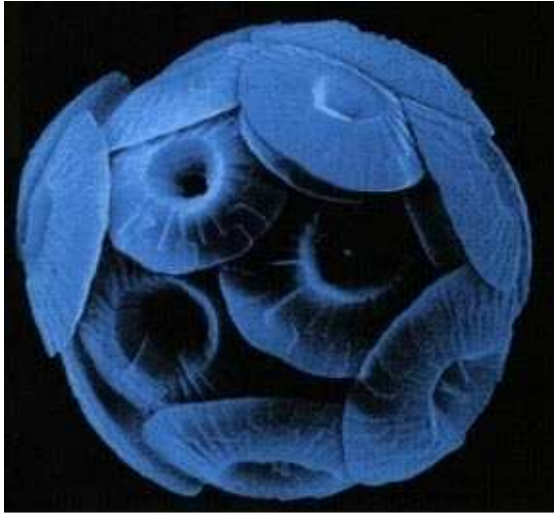
- les feldspaths plagioclases  $(\text{Na,Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
- ou les amphiboles  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$ . Pour simplifier les écritures chimiques, nous allons utiliser la wollastonite  $\text{CaSiO}_3$  pour représenter les silicates de calcium.

Soumis aux pluies (acides), ces deux groupes de minéraux se dissolvent, les carbonates étant les plus rapidement attaqués. Dans les deux cas d'altération, on a formation des ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$ . Réactions: (6) et (7)

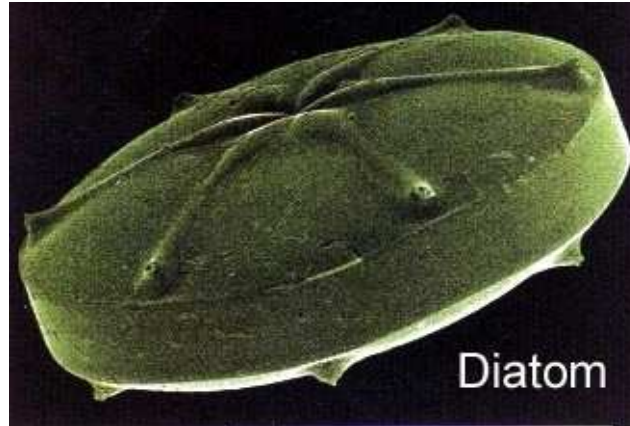


Dans le cas des silicates calciques, l'altération produit en plus de la silice. Calcium, bicarbonate et silice sont arrachés aux sols par l'érosion et transportés vers l'océan par les cours d'eau. Ces trois produits viennent contribuer à la charge sédimentaire des océans.

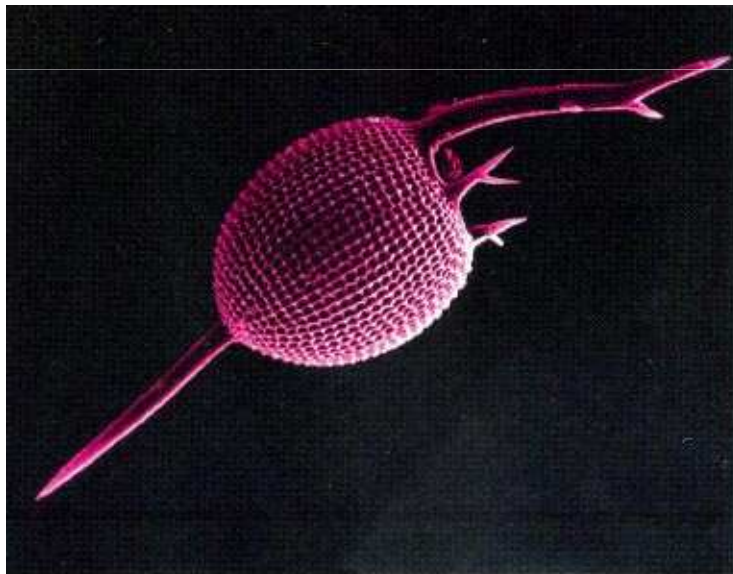
Certains organismes comme les diatomées, les radiolaires et les éponges utilisent la silice dissoute dans l'eau de mer pour sécréter leur squelette. Le gros des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  est utilisé par la plupart des autres organismes marins à squelette minéralisé pour sécréter un squelette ou une coquille de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ , calcite ou aragonite);



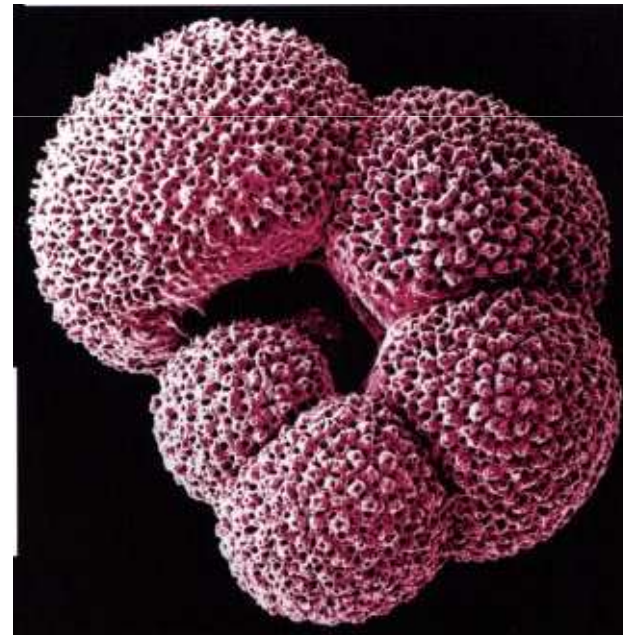
Coccolithophorid Phytoplankton



**5000 Espèces  
de plancton**



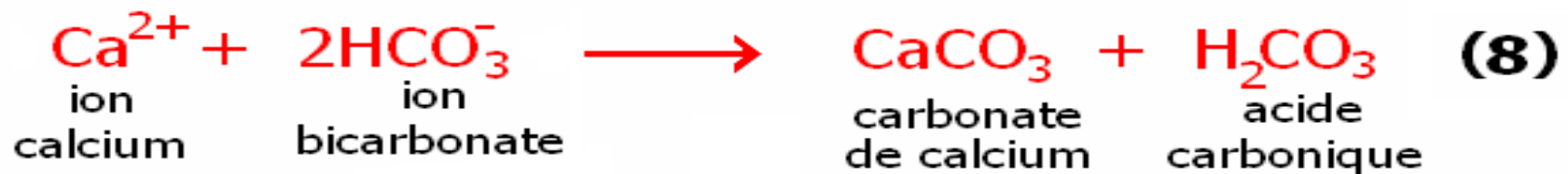
Radiolarian Zooplankton



Foraminifer Zooplankton

**POMPE BIOLOGIQUE**

une autre partie des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_2^-$ , vient former abiotiquement du  $\text{CaCO}_3$ , mais en volume beaucoup plus faible par rapport à celui des squelettes des organismes. Cette précipitation du carbonate de calcium, qu'elle soit biotiquement ou abiotiquement contrôlée, vient soustraire à l'eau marine des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  selon la réaction inverse de la réaction 6:



Cette production de  $\text{CaCO}_3$  modifie la chimie du carbone des océans en entraînant deux choses:

- 1) Augmentation de la concentration en acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$  qui peut aussi s'écrire  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , selon l'équation 1) et, par voie de conséquence, de celle du  $\text{CO}_2$ .

- 2) Réduction de la concentration en ions bicarbonates, ce qui signifie une baisse du pH. L'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  liée à cette production de  $\text{CaCO}_3$  entraîne la création d'un gradient entre l'océan et l'atmosphère qui favorise une diffusion du  $\text{CO}_2$  de l'océan vers l'atmosphère.



En somme, on peut dire qu'une accélération de l'altération des carbonates et des silicates continentaux (par exemple, par des pluies générées par la pollution) aura pour conséquence une augmentation de la production océanique de  $\text{CaCO}_3$ , qui entraînera une augmentation de la pression partielle de  $\text{CO}_2$  dans l'eau de mer, qui entraînera à son tour une plus grande diffusion de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère à partir de l'océan, ce qui vient modérer cette capacité de l'océan à capter un excès de  $\text{CO}_2$  atmosphérique dont on a discuté plus haut (réactions 2 à 5).

#### **Flux en Gt C.an-1**

##### **Vers l 'atmosphère**

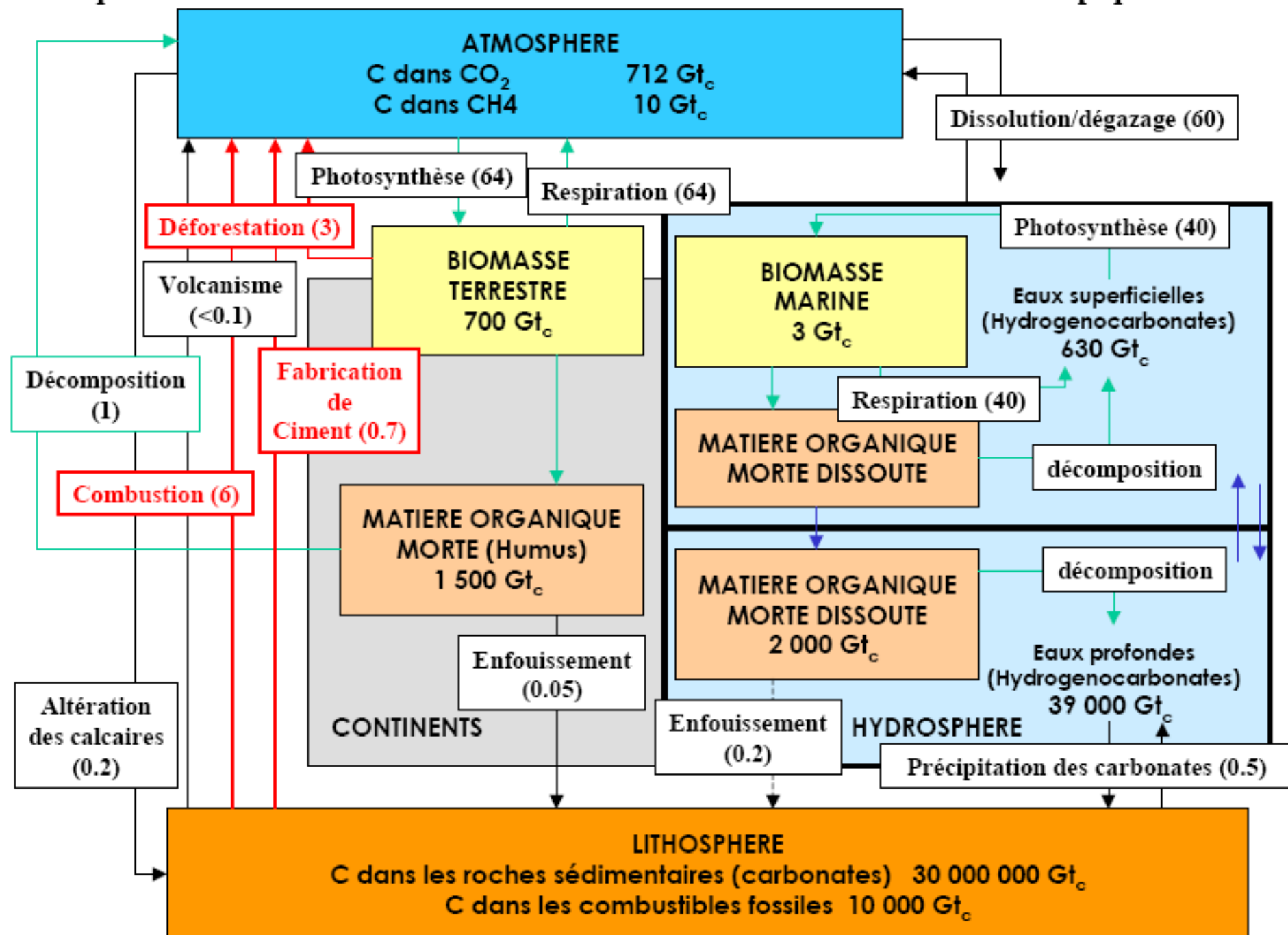
- Combustibles fossiles.....5.3
- Cimenteries.....0.2
- Destruction forêts tropicales.....1,6
- TOTAL .....7.1**

##### **Issus de l 'atmosphère**

- Vers les océans .....2.0
- Accroissement forêts tempérées.....0.5
- Accroissement biomasse.....1.3
- TOTAL.....3.8**

**BILAN= +3.3**

## Bilan quantitatif des flux et des stocks de carbone incluant les activités anthropiques





# *Les pompes*

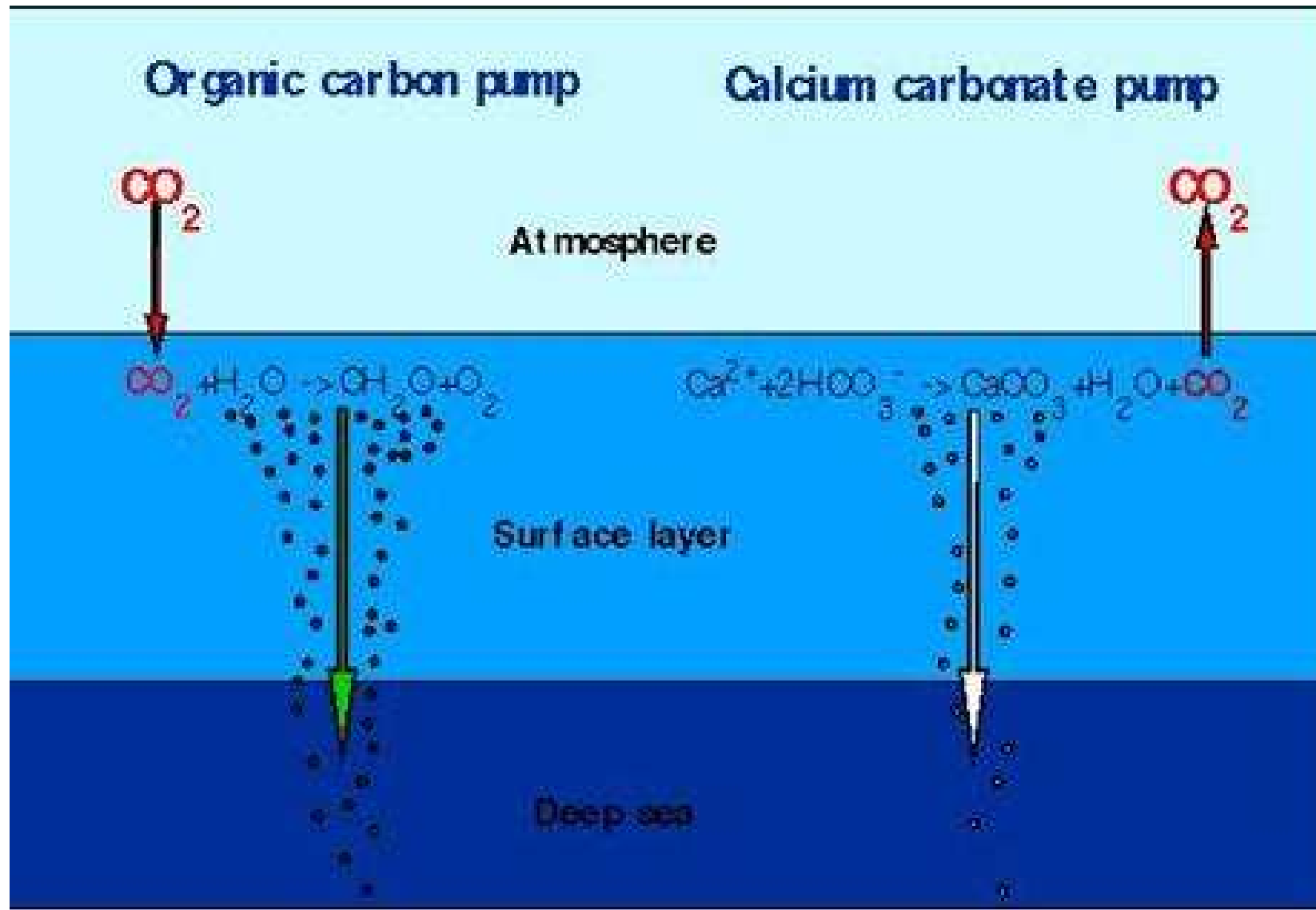
Deux mécanismes sont à l'origine du stockage de carbone dans les eaux océaniques :

- la pompe biologique.
- la pompe physique.

L'équilibre entre les deux pompes détermine l'échange biologique de CO<sub>2</sub> entre l'océan et l'atmosphère.

# 1) la pompe biologique.

- Au printemps la photosynthèse consomme du  $\text{CO}_2$  dissoute dans la couche supérieure de l'océan et qui diminue de 30 %. En conséquence de l'équilibre chimique entre l'atmosphère et l'océan, une fraction du  $\text{CO}_2$  atmosphérique se dissout alors dans l'océan pour compenser cette consommation.
- La vie sous-marine est organisée en cycles : une croissance du plancton provoque une croissance de la faune, qui finit par sédimenter en formant du calcaire.  
Elle peut être divisée en:
  - Pompe organique
  - Pompe carbonate



## les pompes organique et carbonate

Le plancton est responsable de la pompe organique et de la pompe carbonate

# 1.a) Pompe organique

- La photosynthèse, fixe et transporte le carbone sous forme organique vers les profondeurs de l'océan. Elle piège le CO<sub>2</sub>.
- Le plancton joue un rôle primordial dans le cycle de carbone. Sa composition élémentaire en C/N/P vaut 106/16/1.
- La production primaire a lieu, uniquement dans les 20 premiers mètres.
- Cependant, le manque de substance nutritives (azote, phosphore) et d'ensoleillement est le principal facteur limitant de la production de biomasse.
- On présume donc que si l'efficacité de la productivité biologique de l'océan augmente, une plus grande quantité de carbone sera utilisée pour la photosynthèse et la formation de coquilles, et donc la quantité de CO<sub>2</sub> pompée par l'océan augmentera.

# 1.b) La pompe carbonate

- La formation de coquilles calcaires par les organismes marins est une étape importante du cycle du carbone. Les Coraux, les Éponges calcaires et les Lamellibranches entre autres utilisent le carbone dissout dans l'eau comme base pour former leur exosquelette de calcaire.
- Par exemple les craies de l'île Rügen en Allemagne et près de Dover en Angleterre qui sont formés par les coccolites.

## 2) la pompe physique

- Elle fonctionne par différences de densité et de solubilité : la solubilité du  $\text{CO}_2$ , augmente quand la température de l'eau diminue. L'eau chargée en gaz dissout ayant une densité plus grande que l'eau chaude sombre au fond de la mer en emportant le  $\text{CO}_2$  dissout.

# Profondeur de compensation des carbonates

la profondeur de compensation des carbonates ou encore CCD(carbonate compensation depth) est La profondeur à laquelle les sédiments sont virtuellement débarrassés de carbonate de calcium

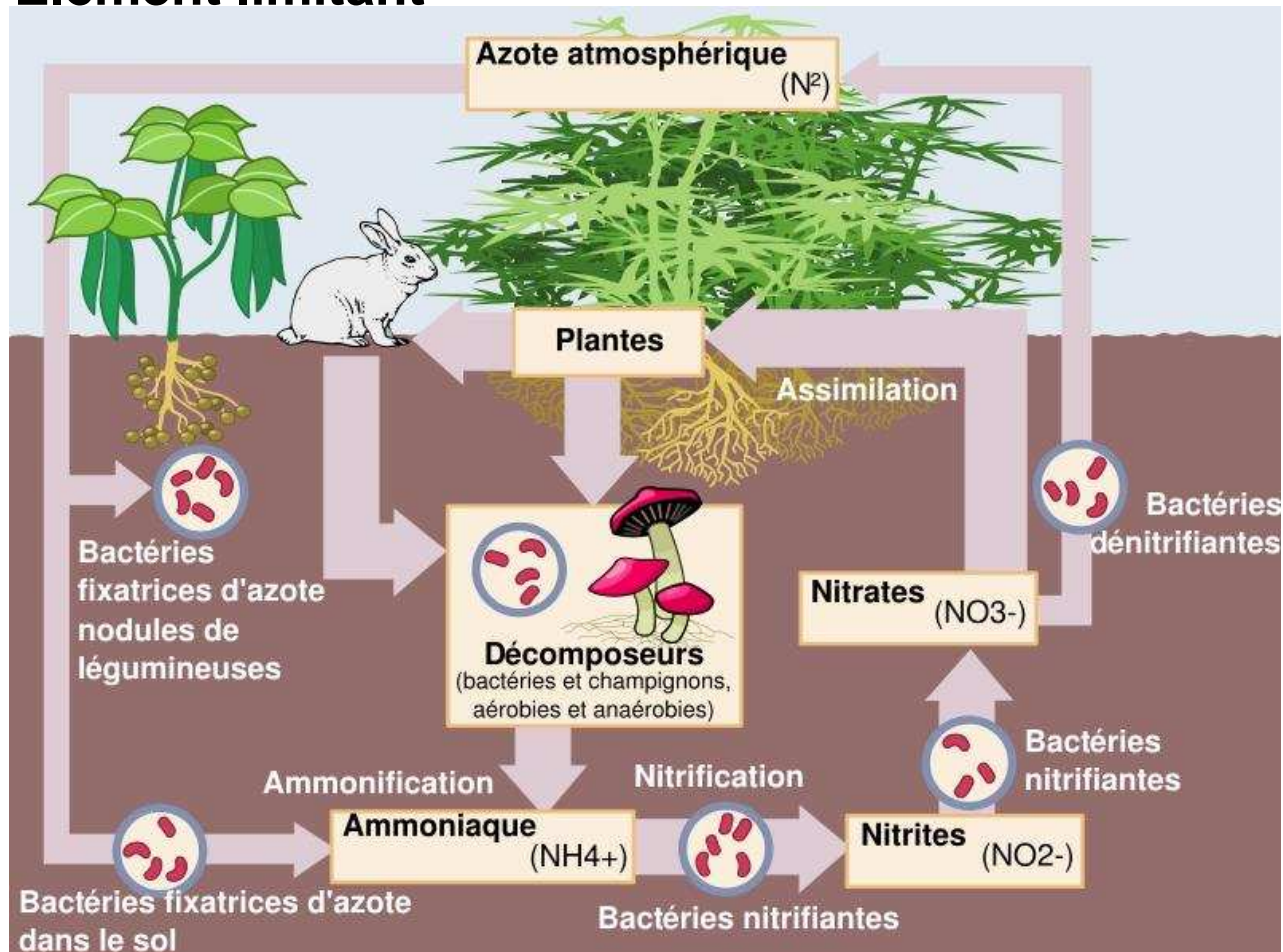
- La *CCD* se rencontre entre 4 200 et 4 500 m dans le Pacifique et vers 5 000 m dans l'Atlantique. Cette tendance à une CCD moins profonde dans le Pacifique est liée à l'âge des masses d'eau (voir Figure 11) et donc à un temps de résidence plus long des eaux
- profondes, permettant une plus grande accumulation de CO<sub>2</sub>

# **Le cycle de l'azote**



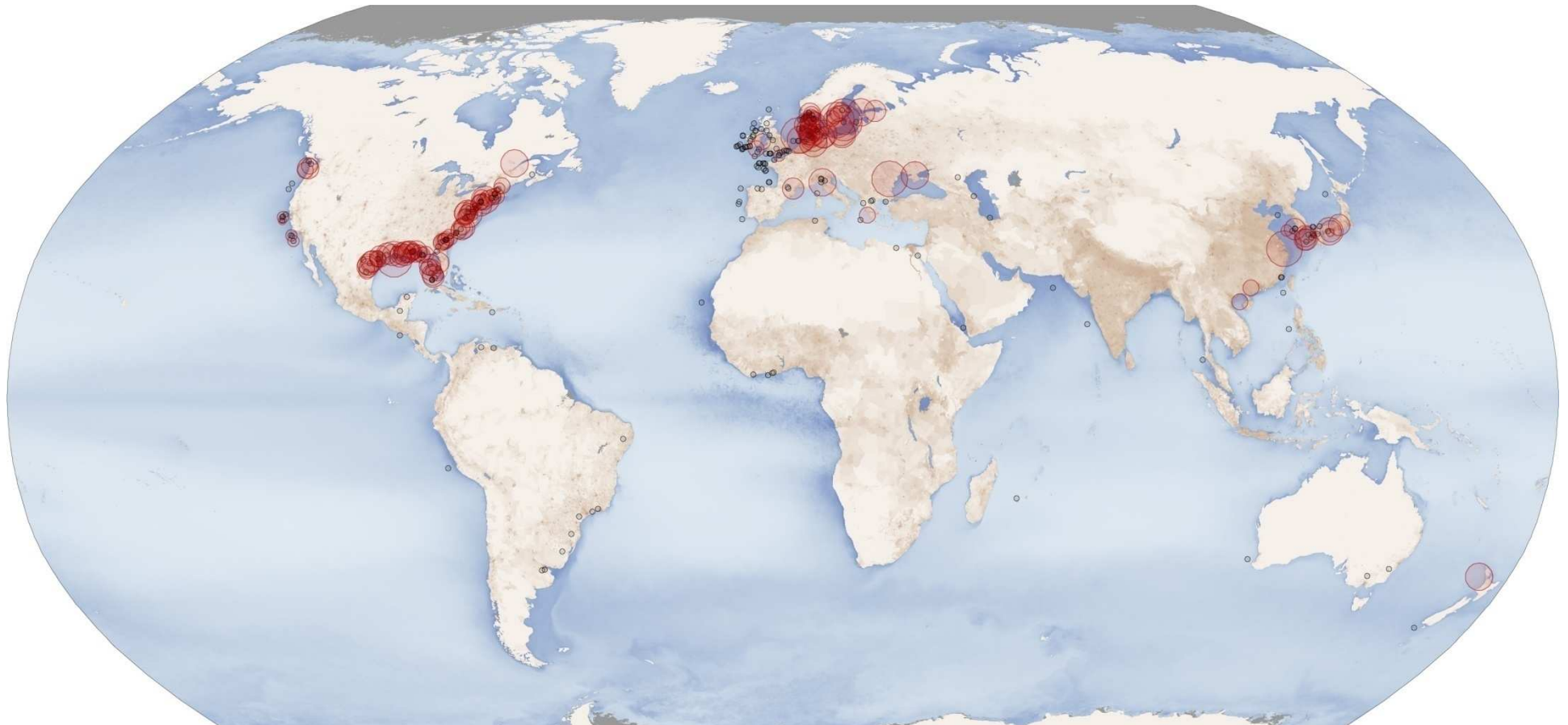
# Cycle de l'azote

## Élément limitant



# Pourquoi s'intéresser à l'azote ?

**Zones mortes océaniques en 2010 selon la NASA**

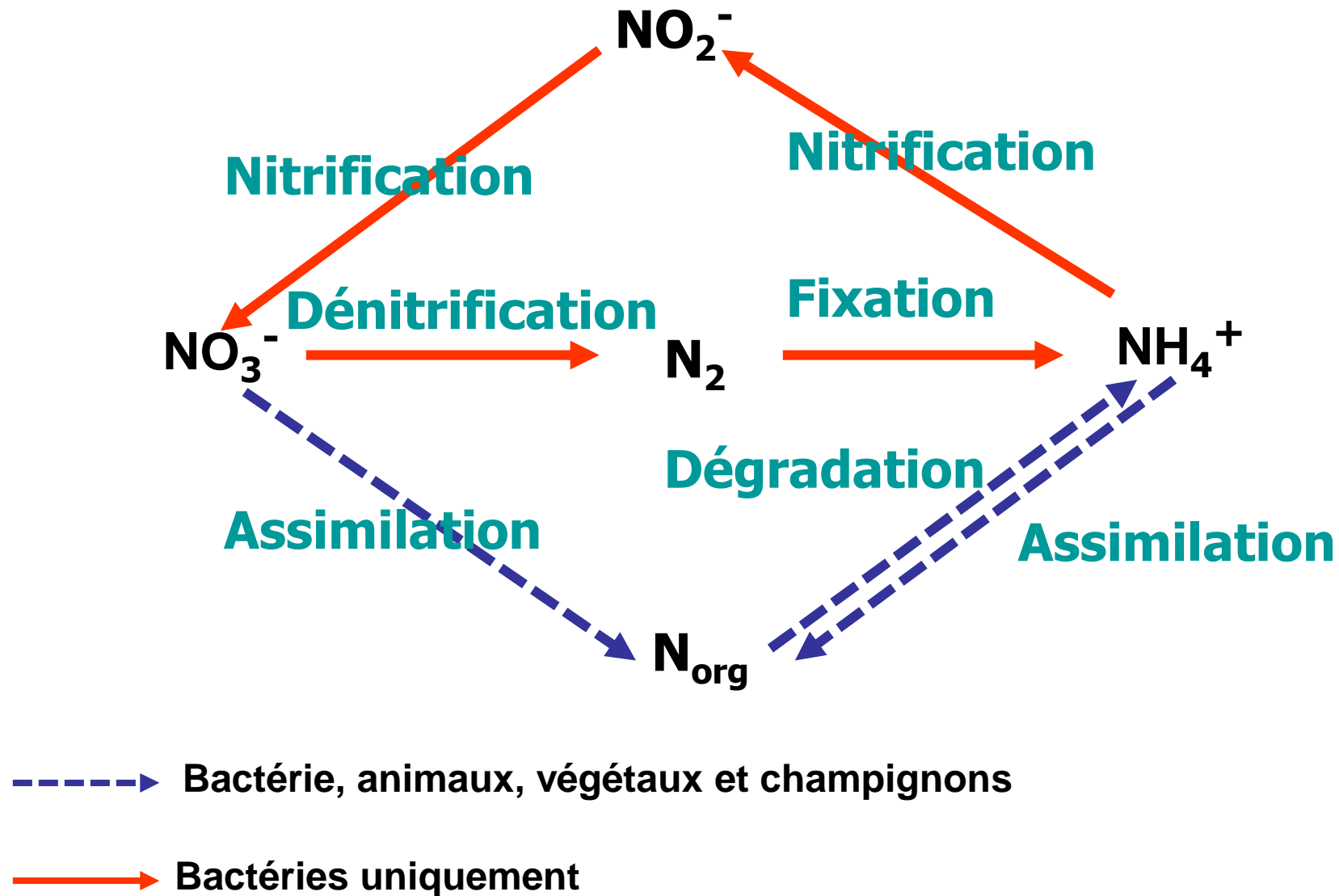


**On inventoriait 405 zones en 2008 (contre 145 en 2004, 4 en 1910) UNEP**

- Contrairement au  $\text{CO}_2$ , l'azote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) ne peut pas directement être utilisé par les plantes, car ses deux atomes sont très fortement liés par une liaison triple.
- L'atmosphère contient 78 % d'azote, soit 3800 000 Gt . C'est le pool principal du cycle.
- Dans les plantes et les sols ensemble on n'a que 98 Gt de N fixé.
- Le passage de l'azote atmosphérique moléculaire aux formes assimilables se fait par des processus bactériens, ce qu'on appelle la fixation biologique.

- Sur terre et en mer on a des gains (fixation biologique, orages, pluies, rivières) et des pertes (dénitrification).
- Le recyclage se fait sur terre comme en mer.
- De l'azote qui est utilisé et cyclé par les plantes terrestres ( $1200 \times 10^{12}$  g), environ 12% provient de la fixation biologique ( $140 \times 10^{12}$ ), le reste provient de la minéralisation de la matière organique (pool du sol).
- Les sources anthropogéniques sont liés essentiellement à l'utilisation des engrais et les émanations des combustibles fossiles.
- Comme pour le carbone, la vie a aussi influencé la composition de l'atmosphère à travers le recyclage d'un autre élément, l'azote (N). Ce gaz est le premier en importance dans l'atmosphère terrestre (78%).
- Il s'y trouve sous sa forme moléculaire normale diatomique  $N_2$ , un gaz relativement inerte (peu réactif).

# processus de base impliqués dans le recyclage de l'azote



# La fixation de l'azote

- Les organismes ont besoin d'azote pour fabriquer des protéines et des acides nucléiques, mais la plupart ne peuvent utiliser la molécule  $N_2$  ou azote atmosphérique.
- Ils ont besoin de ce qu'on nomme l'azote fixé dans lequel les atomes d'azote sont liés à d'autres types d'atomes comme par exemple à l'hydrogène dans l'ammoniac  $NH_3$  ou à l'oxygène dans les ions nitrates  $NO_3^-$ . Le cycle de l'azote est très complexe.
- Trois processus sont responsables de la majeure partie de la fixation de l'azote dans la biosphère:
  1. **fixation biologique** par certaines bactéries ou dans des associations symbiotique avec quelques espèces végétales ou animales
  2. **fixation atmosphérique** par la foudre
  3. **fixation industrielle**

## La fixation biologique ou diazotrophie

La fixation Biologique de l'azote est le processus le Biochimique plus important après l'assimilation du  $\text{CO}_2$ . Elle assure la transformation de l'azote gazeux atmosphérique en ammoniac. Seuls quelques microorganismes diazotrophes sont capables d'assurer ce processus, parmi lesquels on distingue:

- ✓ Les bactéries libres vivant dans le sol (*Klebsiella* et *Azotobacter*)
- ✓ Les cyanobactéries (algues bleu-vert) pouvant également fixer directement l'azote de l'air. Elles jouent un rôle très important dans la productivité des rizières.

- **Les rhizobactéries, bactéries symbiotiques** vivant en association avec les légumineuses dans des structures racinaires appelées **nodosités**. Ces bactéries et certaines levures sont capables de réduire l'azote suivant la réaction globale:



- Le cycle de l'azote est **constamment alimenté par l'atmosphère de différentes façons**, dont la plus importante est la **fixation bactérienne**.

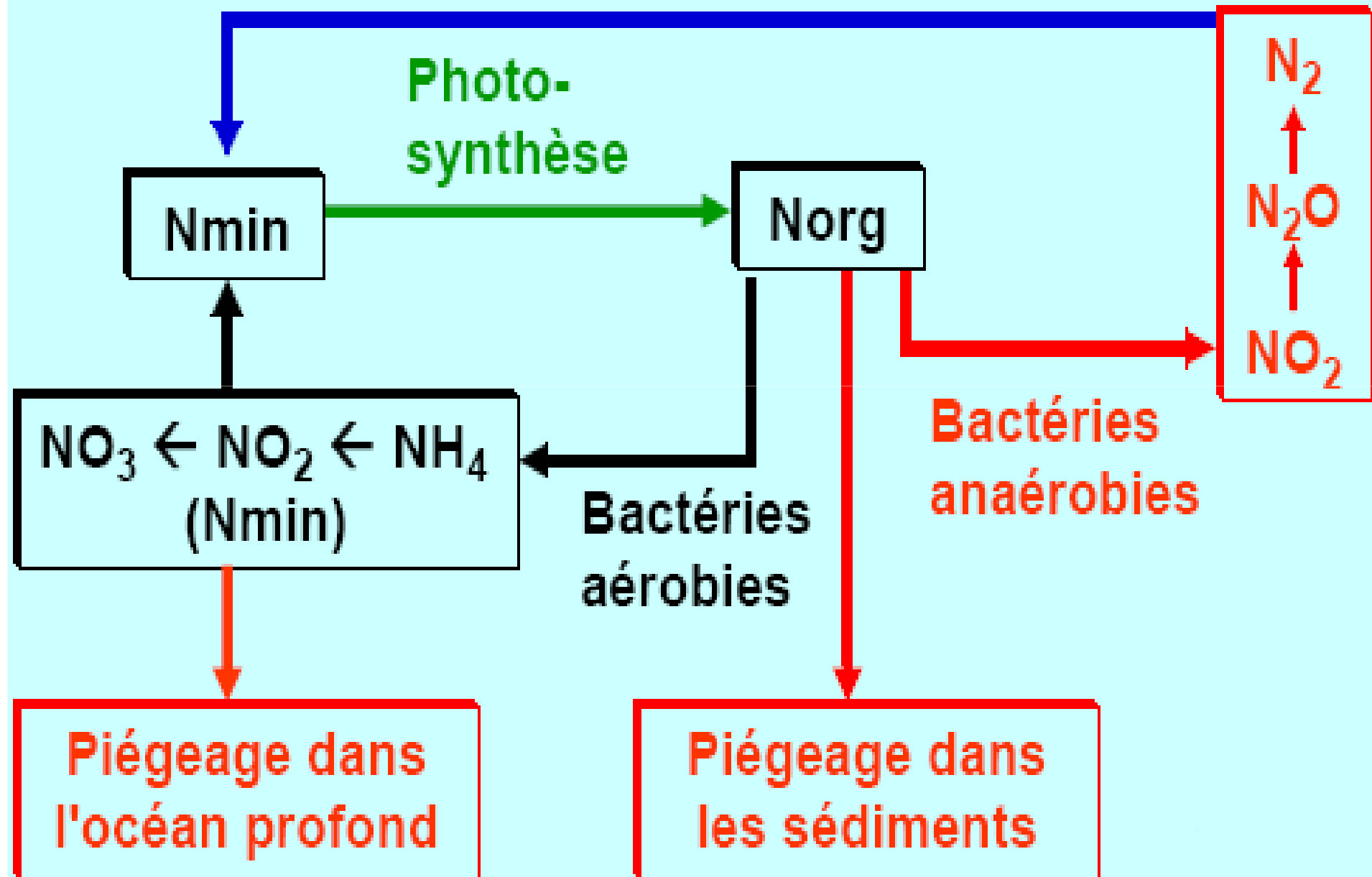


- La fixation biologique de l'azote se déroule à 25°C et est catalysée par un complexe enzymatique : la *Nitrogénase/Hydrogénase*. La réaction, exige 16 ATP pour la fourniture de l'énergie d'activation.
- A l'échelle mondiale, la fixation biologique annuelle de N est estimée au double de l'utilisation mondiale des engrais qui est de 80 millions de tonnes. Elle est très importante pour fournir l'azote disponible pour les plantes dans les systèmes naturels et dans les régions agricoles où l'engrais synthétique est trop cher ou non disponible.

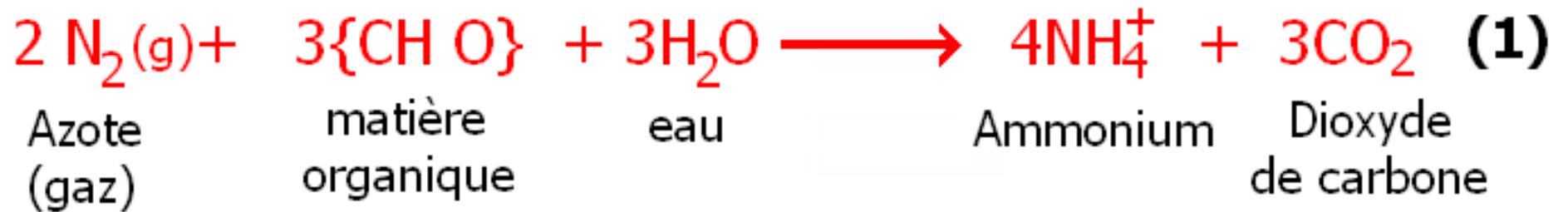


*Rhizobium*

Cyanobactéries, *Rhizobium* : 180 Mt/an



La réaction chimique type est:



Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux:

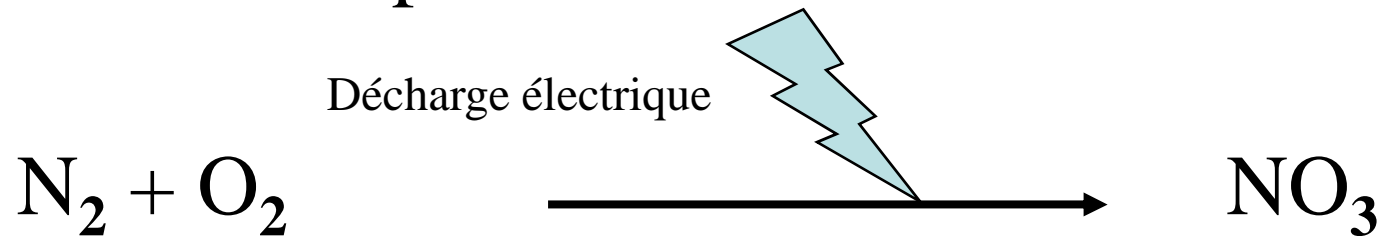


✓ La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses).

✓ Cette fixation tend à produire des composés ammoniacqués tels l'ammonium  $\text{NH}_4^+$  et son acide conjugué l'ammoniac  $\text{NH}_3$ . Il s'agit ici d'une réaction de réduction qui se fait par l'intermédiaire de substances organiques notées  $\{\text{CH}_2\text{O}\}$  dans l'équation 1.

# Les décharges électriques

Les orages provoquent aussi l'oxydation de l'azote et produisent des nitrates:



qui se déposent sur le sol et peuvent ensuite être assimilés par les plantes. L'azote est ainsi amené jusqu'aux racines des plantes sous forme de nitrates, servant à la fabrication de protéines végétales, et entre donc dans les chaînes alimentaires.

# Fixation industrielle

Sous une pression de **300 atmosphère** et à une température située entre **500 à 600°C**, et avec l'utilisation d'un catalyseur, d'un azote atmosphérique et d'un hydrogène (habituellement dérivés du gaz naturel ou du pétrole) peut être combiné pour **former l'ammoniaque (NH<sub>3</sub>)**. L'ammoniaque peut être employée directement comme engrais.

$$T^{\circ} = 500-600^{\circ}\text{C}$$

$$P = 300 \text{ at}$$



# La nitrification

**La nitrification** Transforme les produits de la fixation ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ) en  $\text{NO}_x$  (soient  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$ ), des nitrites et nitrates. C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymique reliée à des bactéries dans les sols et dans l'eau.



La nitrification englobe deux réactions successives:

1) La nitrosation

La production de nitrite est l'action des bactéries produisant des nitrites telles que *Nitrosomonas*, *Nitrosocystis*, *Nitrospira*, *Nitrosoglea*,...





## 2) La nitratation

La production de **nitrate** est le travail des bactéries telles que *Nitrobacter*, *Nitrocystis*, *Nitrosospira*, *Nitrosoglea*,...

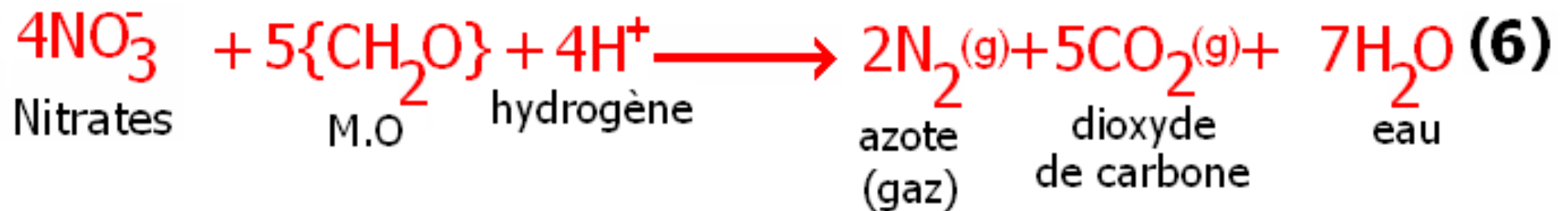


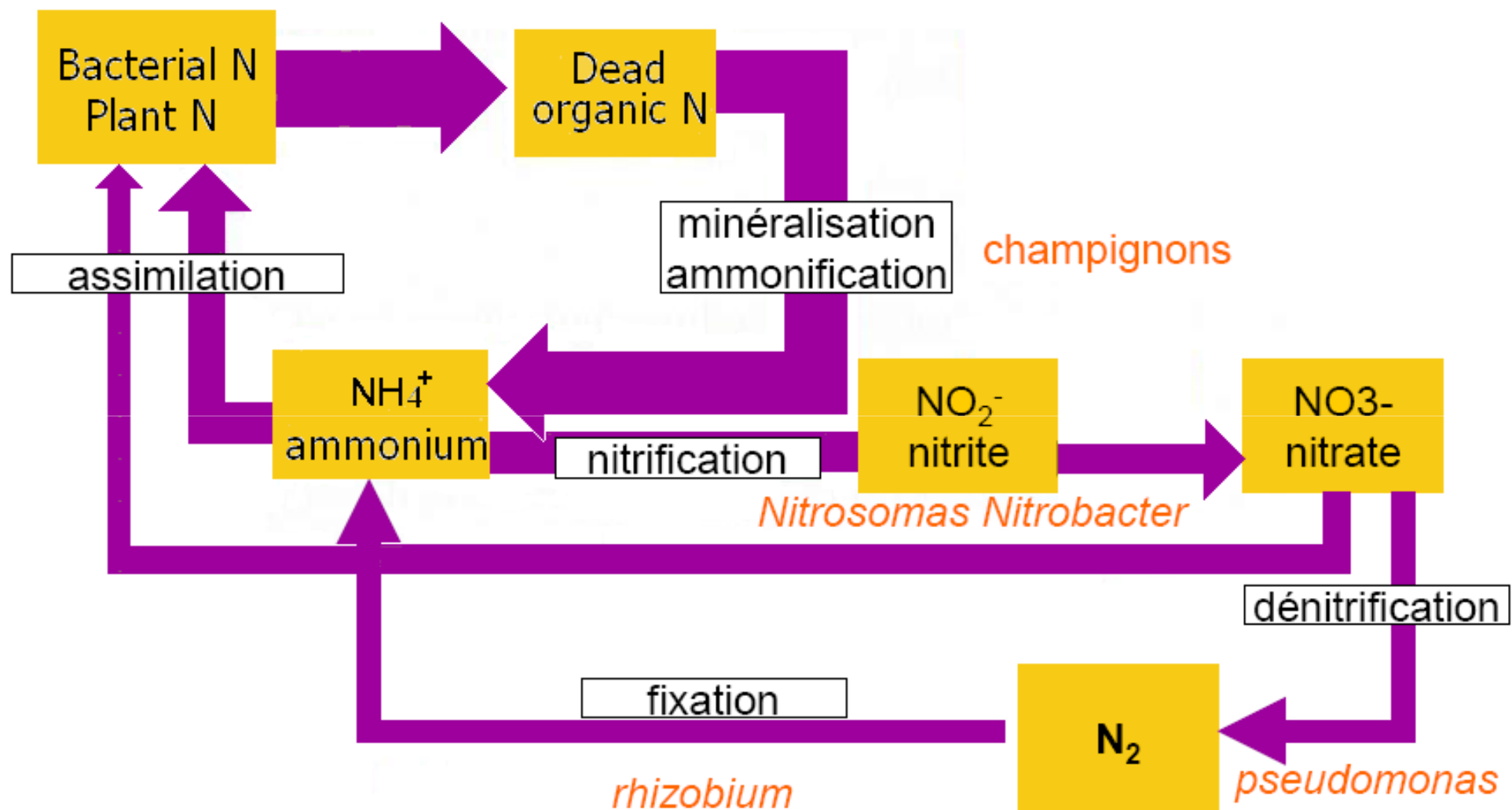
Toutes ces bactéries sont autotrophes et exclusivement aérobies.

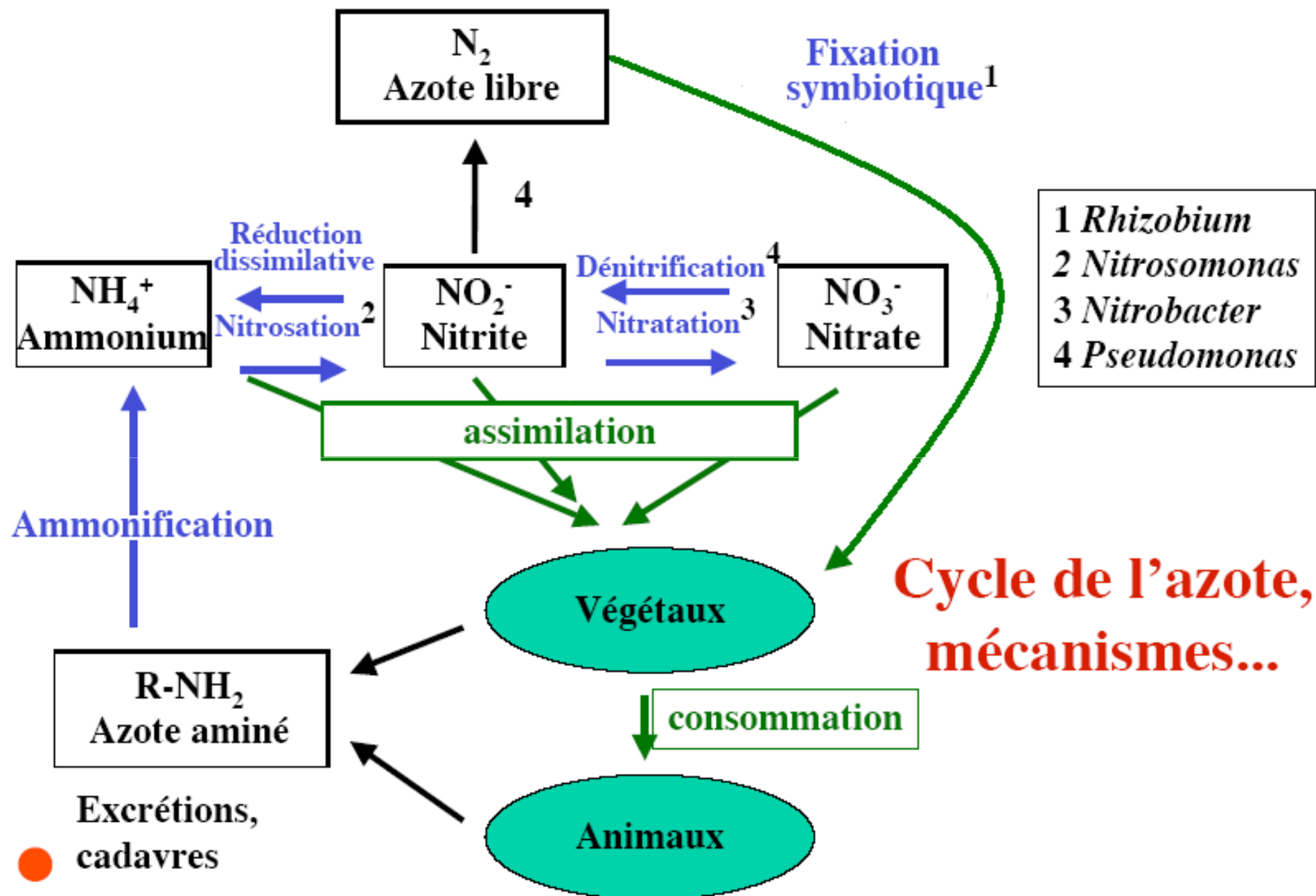
# La dénitrification

Retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire  $N_2$ , avec comme produit secondaire du  $CO_2$  et de l'oxyde d'azote  $N_2O$ , un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère.

Il s'agit d'une réaction de réduction de  $NO_3^-$  par l'intermédiaire de bactéries transformant la matière organique. La réaction est de type :







# Les nitrates sont-ils dangereux?

- Transformés en nitrites par l'organisme, ils peuvent provoquer la transformation de l'hémoglobine en « méthémoglobine » et provoquer un mauvais transfert de l'oxygène vers les cellules.
- Cette pathologie peut affecter les nourrissons de moins de 6 mois.
- La norme de potabilité de l'eau est fixée à 50mg/l

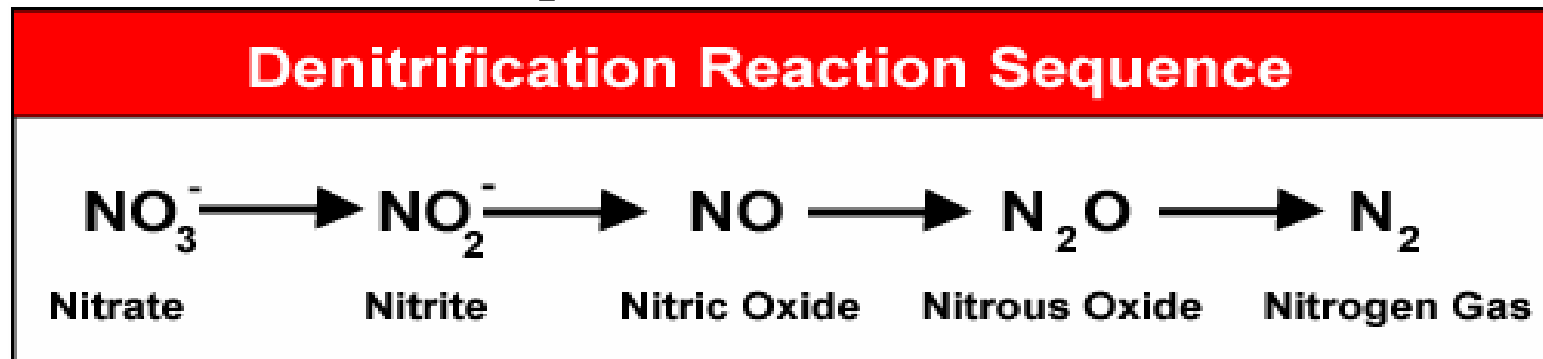
## **Toxicité de l'ammoniac**

Dans les recherches de toxicité sur les poissons on a déterminé que la présence de 0.1 mg de  $\text{NH}_3$  par litre (sous forme N) durant une heure conduit à l'empoisonnement des poissons.

## **Toxicité des nitrites**

Bien qu'ils soient moins nocifs que l'ammoniac, il suffit d'une concentration de 0,1 – 0,2 mg/l pour affecter la santé des poissons de manière irréversible. En outre, la toxicité des nitrites augmente lorsque le pH et la teneur en chlorures diminuent. Les poissons intoxiqués par les nitrites ont des difficultés à respirer, viennent « gober l'air » à la surface ou s'agitent violemment sans raison apparente.

- La dénitrification est sensiblement supérieure à la fixation biologique, ce qui a pour effet un certain déséquilibre global :
- Le plus grand déséquilibre provient des émissions anthropogéniques, qui ajoutent annuellement environ 100 millions de tonnes dans l'atmosphère sous la forme de NO et NO<sub>2</sub>.
- Augmentation de l'azote fixé dans les cycles de 25% dans les 25 prochaines années. La plupart de cet azote en excès est perdu par dénitrification, le reste va dans la mer.
- La dénitrification produit essentiellement du N<sub>2</sub>, qui s'ajoute au pool important de l'air, mais aussi une fraction de N<sub>2</sub>O et NO (surtout dans les forêts tropicales).



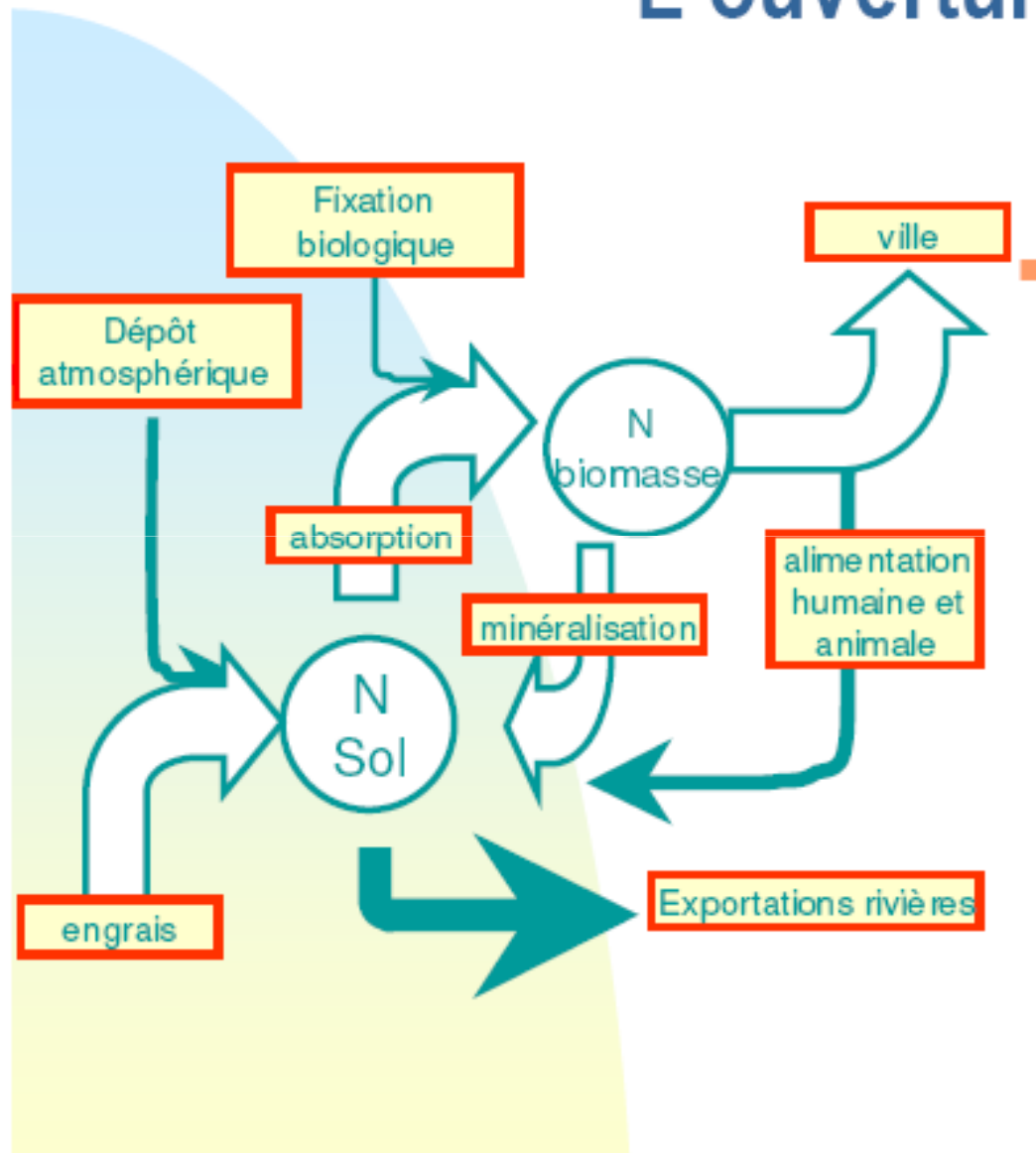
- NO et NO<sub>2</sub> sont, avec SO<sub>2</sub>, responsables des pluies acides.

✓Le  $\text{N}_2\text{O}$  est un gaz à effet de serre important (effet 200 fois supérieur au  $\text{CO}_2$ ). Il semblerait que ce gaz augmente de 3% chaque année. Sa destruction (à 95%) peut se faire dans la stratosphère, où il est transformé par l'ozone en NO.

✓Le reste contribue à l'effet de serre. Toutes les sources de  $\text{N}_2\text{O}$  ne sont pas encore connues et on pense que l'agriculture pourrait, par ses engrais, favoriser la production directe de ce gaz dans les sols.



# L'ouverture du cycle



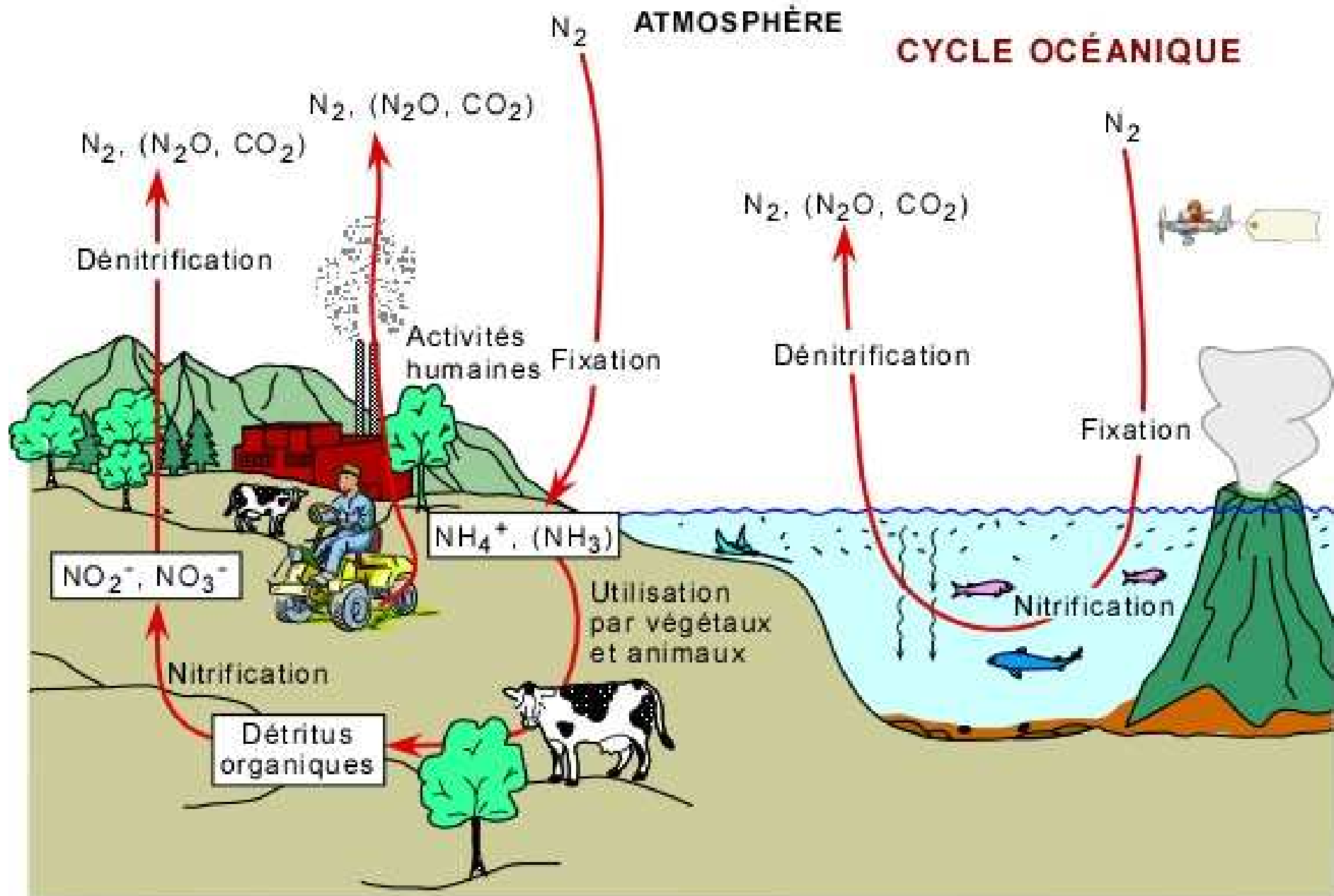
## Ville « industrielle »

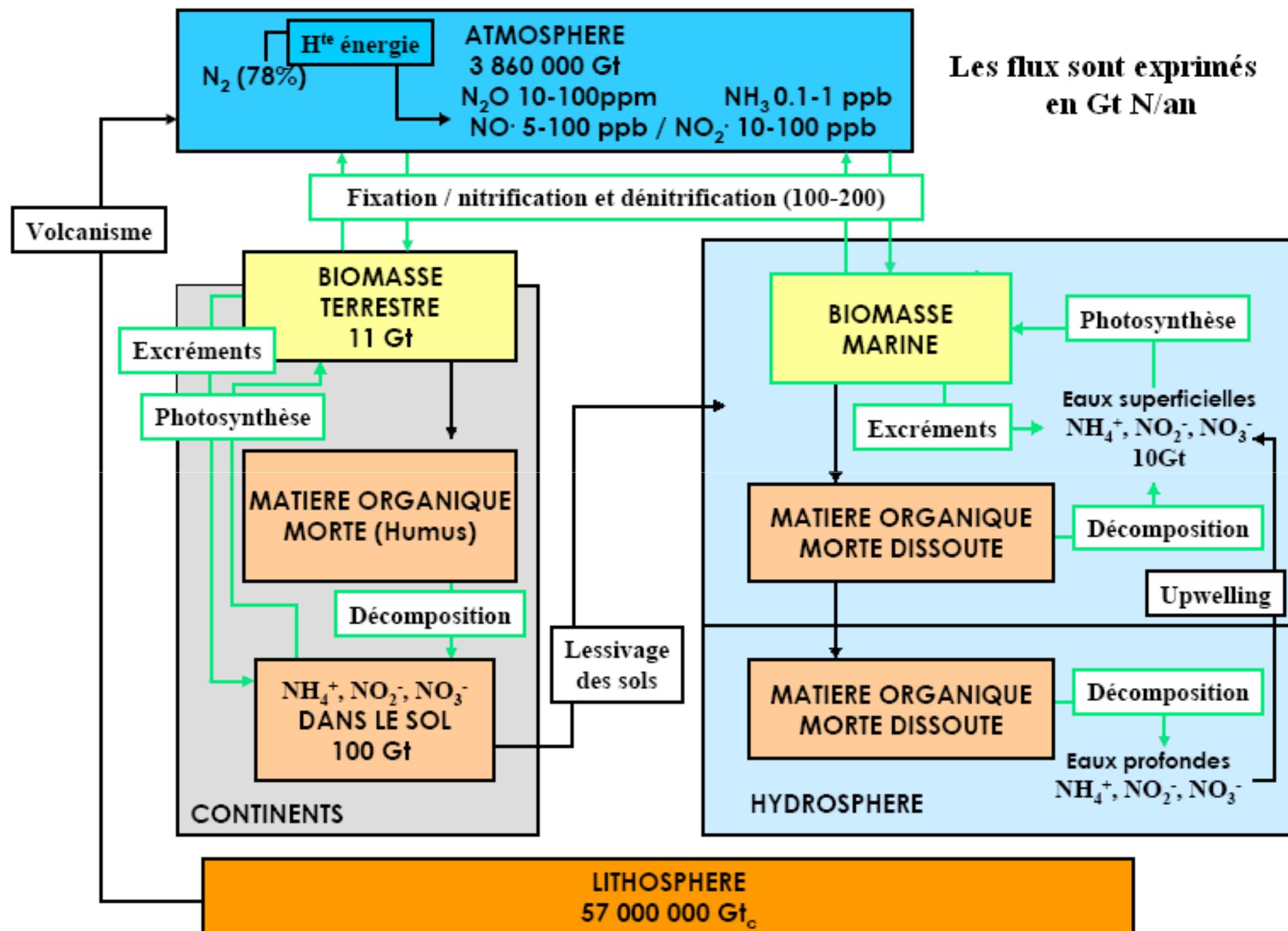
- ◆ exportation vers la ville
- ◆ besoins d'engrais
- ◆ minéralisation réduite
- ◆ sols nus exportations

## CYCLE TERRESTRE

$N_2$  ATMOSPHÈRE

## CYCLE OCÉANIQUE





# **Cycle du phosphore**

Pourquoi s'intéresser  
au phosphore ?

Trop de phosphore ?


D'où vient cet élément ?



- ✓ Le phosphore (P) est important pour la Vie puisqu'il est essentiel à la fabrication des acides nucléiques ARN et ADN. On le retrouve aussi dans le squelette des organismes sous forme de  $\text{PO}_4^{3-}$ .
- ✓ Dans la Terre primitive, tout le phosphore se trouvait dans les roches ignées. C'est par l'altération superficielle de ces dernières sur les continents que le phosphore a été progressivement transféré vers les océans. On a calculé qu'il a fallu plus de 3 Ga (milliards d'années) pour saturer les océans par rapport au minéral apatite  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$ , un phosphate.

**ADN** 

**ATP** 

**Os** 

**Eaux  
superficielles** 

**Roches** 

**Atmosphère** 

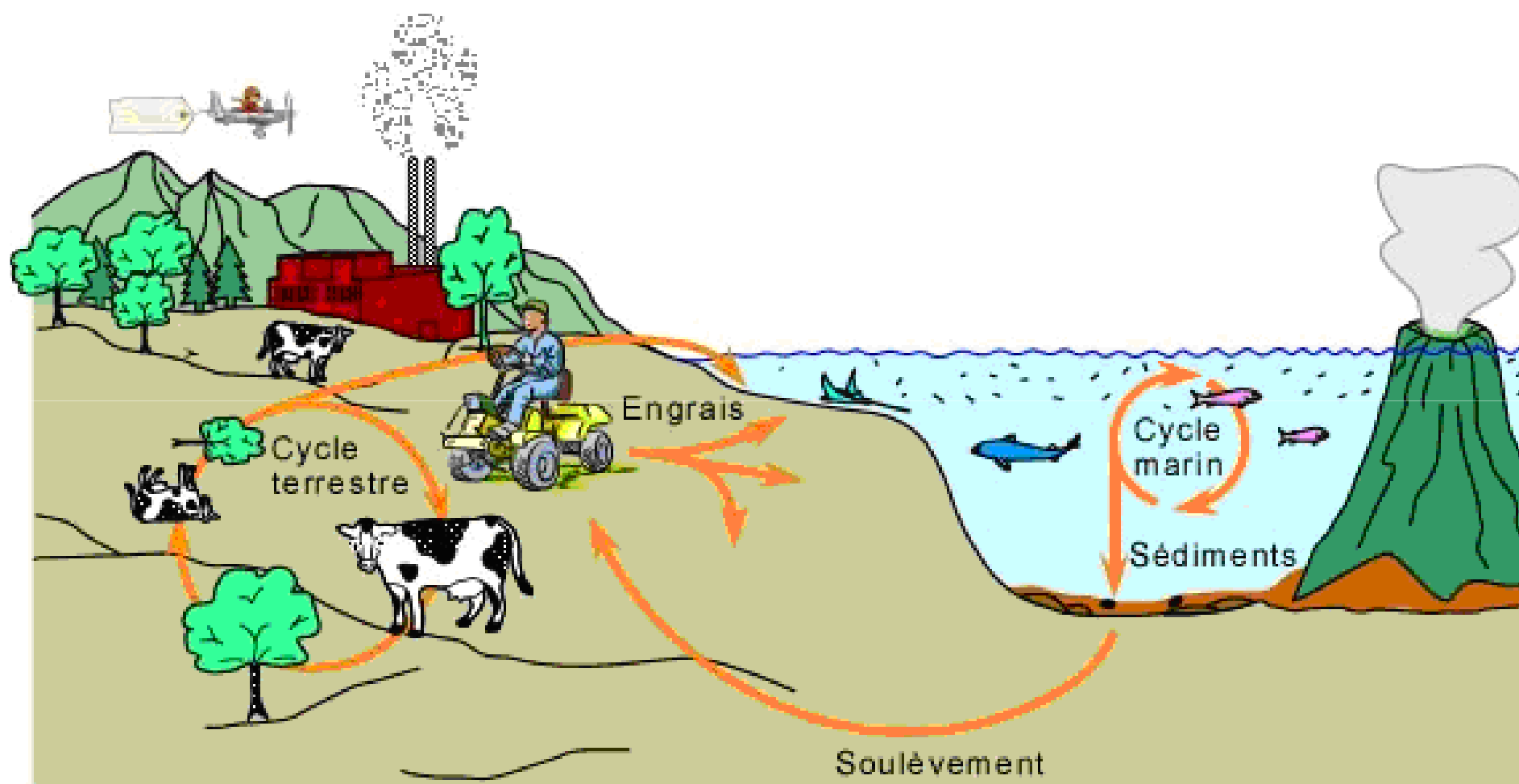
**Sol** 

Le cycle du phosphore est unique parmi les cycles biogéochimiques majeurs:

- Il ne **possède pas de composante gazeuse**, du moins en quantité significative, et par conséquent n'affecte pratiquement pas l'atmosphère.
- Il se distingue aussi des autres cycles par le fait que **le transfert de phosphore (P)** d'un réservoir à un autre **n'est pas contrôlé par des réactions microbiennes**, comme c'est le cas par exemple pour l'azote.
- Les roches sont le principal réservoir de phosphates.
- Le cycle du phosphore ne comporte pas de phase gazeuse.
- Les producteurs absorbent le phosphore sous forme d'ions phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

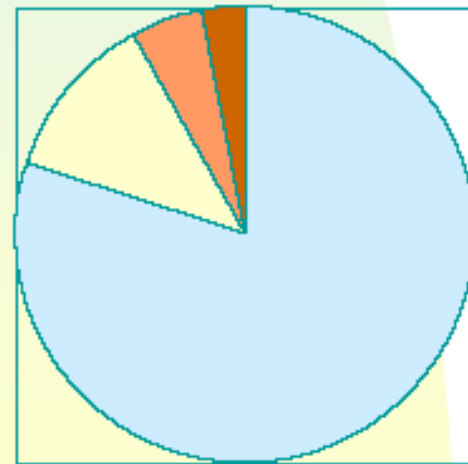
- La majeure partie du phosphore de l'écosystème provient de la circulation locale (décomposition des déchets organiques puis réintroduction au niveau des racines des producteurs).
- Le phosphore, un élément nutritif limité dans les sols et les lacs, fait partie des engrais.
- Une partie du phosphate des écosystèmes terrestres est perdue par lessivage des sols vers les cours d'eau et contribue à leur eutrophisation (leur enrichissement en éléments minéraux).





# Cycle du phosphore

- Pas de cycle !!!
  - ◆ De la mine à la mer
- Pas de phase atmosphérique
- Plus simple que l'azote
- Affinité pour les particules

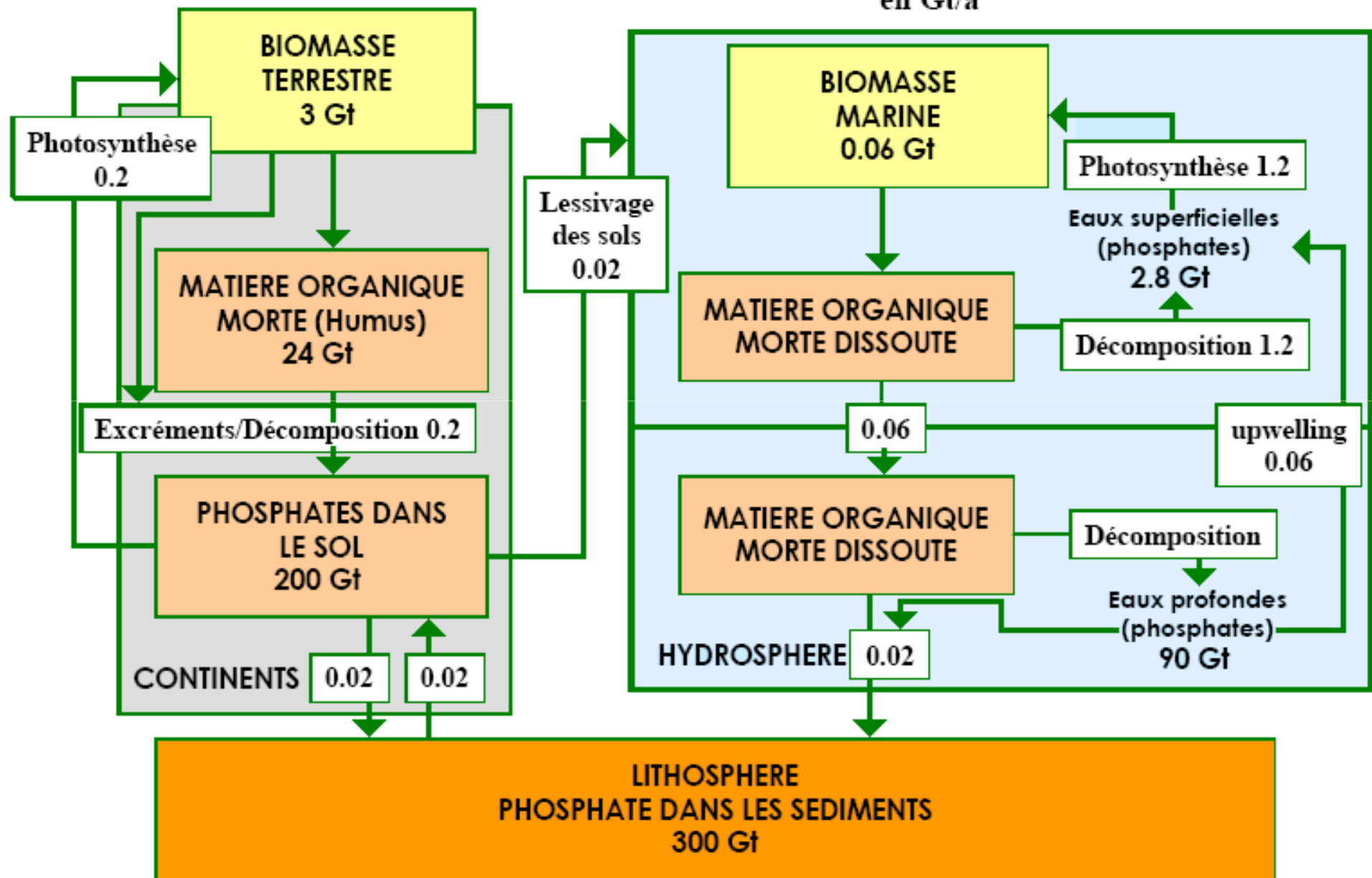


Usages du phosphore :  
agriculture 80 %  
détergents 12 %  
nourritures animales 5%  
usages spécifiques 3%

- le phosphore en milieu terrestre dérive de l'altération des phosphates de calcium des roches de surface, principalement de l'apatite  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}]$ .
- Bien que les sols contiennent un grand volume de phosphore, une petite partie seulement est accessible aux organismes vivants.
- Ce phosphore est absorbé par les plantes et transféré aux animaux par leur alimentation.
- Une partie est retournée aux sols à partir des excréments des animaux et de la matière organique morte.

# Cycle du Phosphore

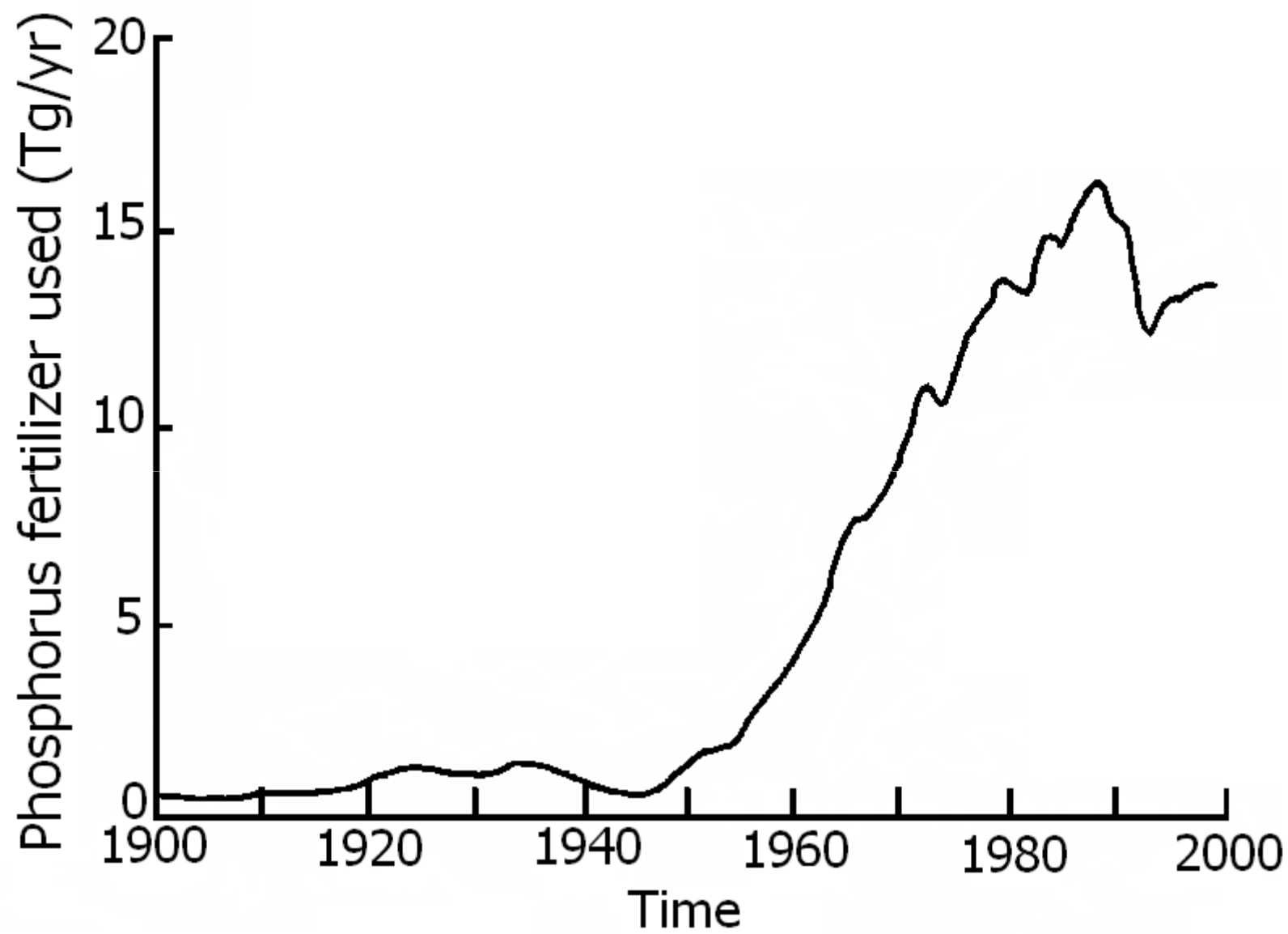
Les flux sont exprimés  
en Gt/a



Une autre partie est transportée vers les océans où une fraction est utilisée ainsi:

- Par les organismes benthiques et ceux du plancton pour sécréter leur squelette.
- Une fraction est utilisée par le phytoplancton et les macroalgues.
- Une autre fraction se dépose au fond de l'océan sous forme d'organismes morts ou de particules et est intégrée aux sédiments. Ces derniers sont transformés progressivement en roches sédimentaires par l'enfouissement; beaucoup plus tard, les roches sont ramenées à la surface par les mouvements tectoniques et le cycle recommence.

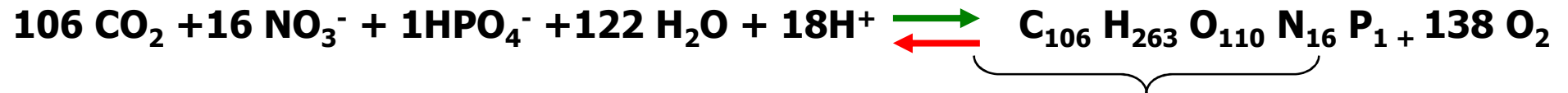
- Le phosphore est un élément limitant dans plusieurs écosystèmes terrestres et aquatiques.
- L'activité humaine intervient dans le cycle du phosphore en **exploitant des mines de phosphate**, en grande partie pour la fabrication des fertilisants.
- Ajoutés aux sols en excès, les phosphates sont drainés vers les systèmes aquatiques. Puisque le phosphore est souvent un facteur limitant dans les rivières, les lacs et les eaux marines côtières, une addition de phosphore dans ces systèmes peut agir comme fertilisant et générer des problèmes d'eutrophisation (forte productivité biologique résultant d'un excès de nutriments).







# Rapport de Redfield (1958)



Composition élémentaire moyenne d'une algue = (Redfield Ratio, 1958)

Redfield (1958)

$$\text{C/N/P} = 106/16/1$$

(atomique)

$$\text{C/N/P} = 40/7/1$$

(masse)

Élément limitant **P**

# **Le cycle du soufre**

Le **cycle du soufre** est le cycle biogéochimique des différentes formes du soufre.

Les principales étapes du cycle du soufre sont :

- la minéralisation du soufre organique en une forme inorganique : le sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ).
- l'oxydation du sulfure, du soufre élémentaire ( $\text{S}$ ) et de ses composés connexes en sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).
- la réduction du sulfate en sulfure.
- l'immobilisation microbienne des composés soufrés et incorporation dans une forme organique du soufre.

## **a) Dans l'atmosphère, à l'état gazeux:**

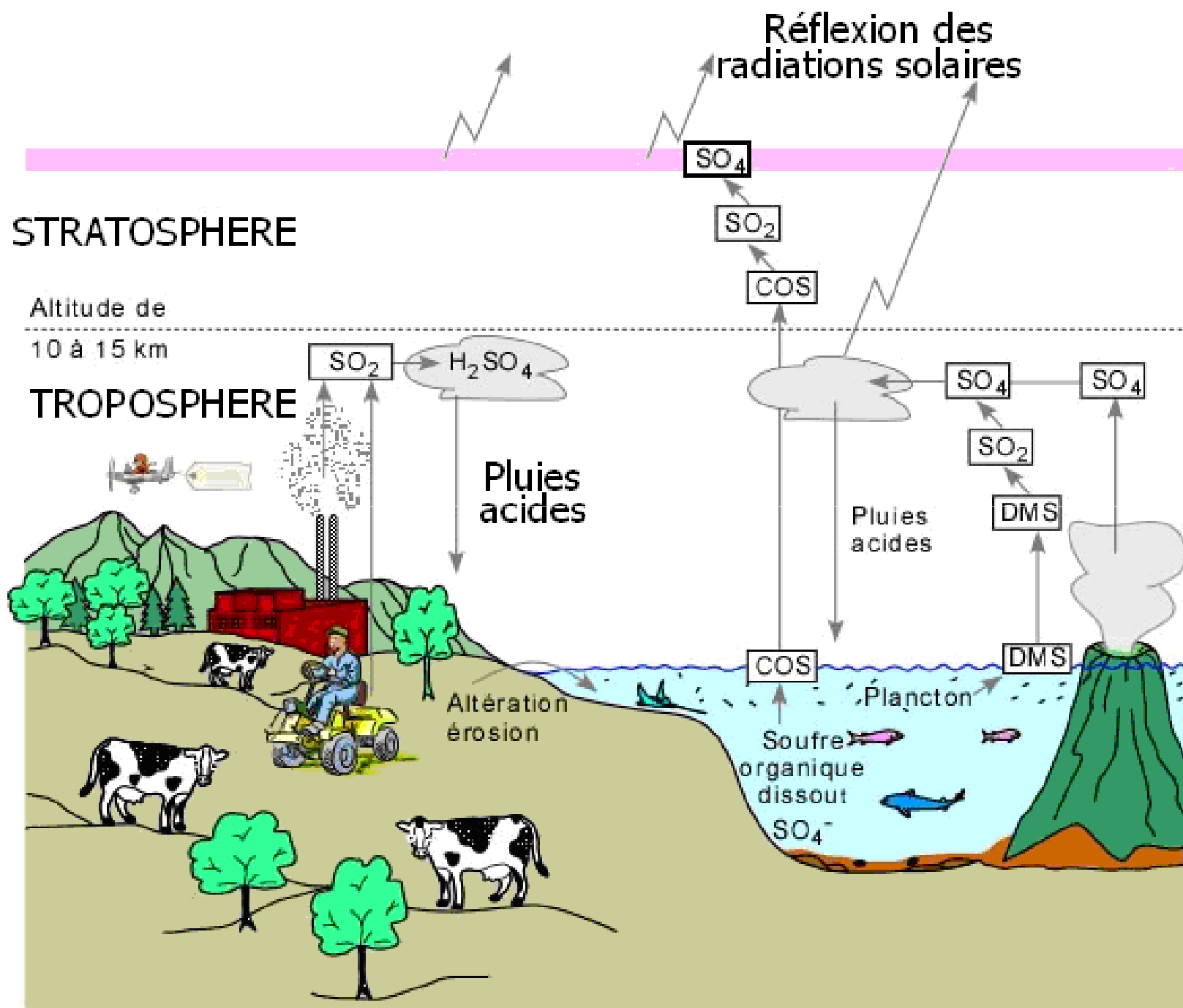
- le soufre réduit dans :
  - **Le diméthylsulfure (DMS):**  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ , produit naturel issu de la décomposition des cellules du phytoplancton dans la couche supérieure de l'océan. Échappe vers l'atmosphère.
  - **Le carbonyl de sulfure:**  $\text{COS}$ . Produit à partir des sulfures organiques dissoutes dans l'eau de mer et acquis en partie de l'érosion continentale. Il s'échappe par la surface des océans vers l'atmosphère.
- **le dioxyde de soufre:**  $\text{SO}_2$ .
- **les sulfates en aérosols:**  $\text{SO}_4$ .

## **b) dans les systèmes aquatiques:**

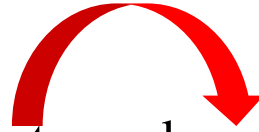
- les composés majeurs sont les sulfates dissoutes  $\text{SO}_4^-$

## **c) dans les sédiments et les roches sédimentaires:**

- Les sulfures métalliques, surtout la pyrite  $\text{FeS}_2$ ,
- Les évaporites: gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  et anhydrite  $\text{CaSO}_4$ .
- Les matières organiques.



- le DMS est oxydé en dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), puis en sulfate ( $\text{SO}_4$ ) qui condense en minuscules particules aérosols.
- Celles-ci agissent comme noyaux pour la formation de gouttes de pluie et de nuages. Ces nuages vont réfléchir une partie du rayonnement solaire et ainsi tempérer le réchauffement de la Planète. Mais ils vont aussi éventuellement contribuer à la formation d'acides à cause de la réaction des aérosols avec la vapeur d'eau et les radiations solaires.
- Le carbonyl de sulfure COS s'oxyde en sulfates dans la stratosphère pour former une couche tout autour de la Planète.
- Tout comme les nuages de la troposphère, cette couche de sulfates en aérosols va réfléchir une partie du rayonnement solaire, avec le même effet de modération sur la chauffe de la Planète.



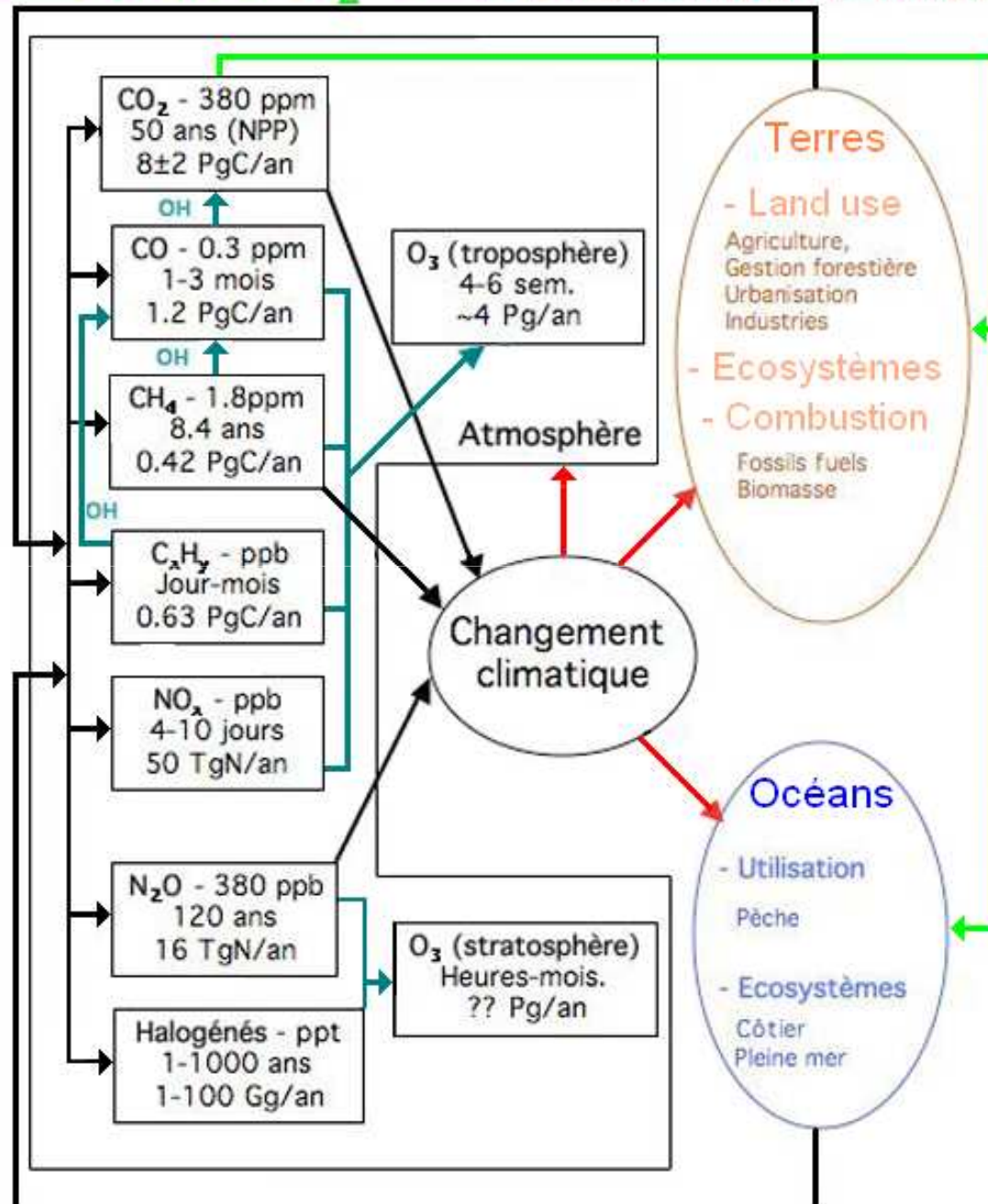
Une autre influence naturelle importante sur le cycle du soufre est celle des volcans. Parmi les gaz qu'ils émettent jusque dans la stratosphère, il y a les sulfates  $\text{SO}_4$  en aérosols qui viennent s'ajouter à ceux qui sont issus du COS. Couplées aux émissions de cendres créant un effet de voile, ces émissions de sulfates peuvent résulter en des refroidissements à très court terme. Ainsi, on évalue que le Pinatubo aux Philippines qui a fait éruption en 1991 a abaissé la température planétaire moyenne de  $1^\circ\text{C}$  pendant une année dû à l'effet combiné des émissions de cendres et de  $\text{SO}_4$ .

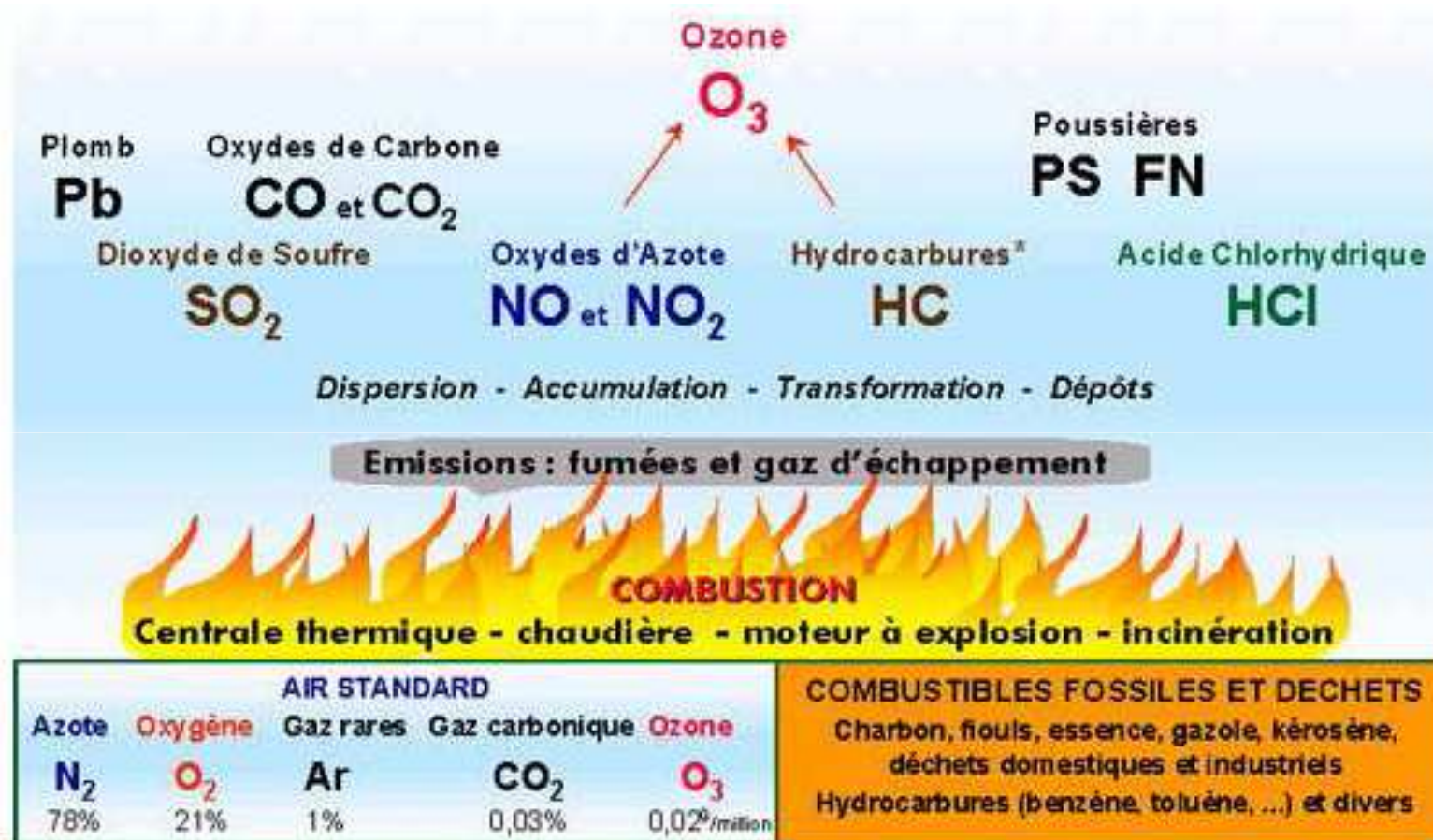
Au niveau des continents, l'altération et l'érosion des sulfures métalliques, ainsi que le transport de poussières de sulfates (gypse et anhydrite) dans les déserts transfèrent du soufre aux océans. Les gaz biogéniques des sols anaérobies et des marécages contiennent aussi du  $\text{H}_2\text{S}$ , ainsi que du DMS et COS en moindre quantité, lesquels sont libérés dans l'atmosphère. Mais la plus grande contribution en composés sulfurés vient de la combustion des pétroles et des charbons qui contiennent pratiquement toujours du soufre.

Ce sont des émissions de sulfates  $\text{SO}_4$ , mais surtout de dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$ . Ce dioxyde sous l'effet des radiations solaires se combine avec la vapeur d'eau et les radicaux OH pour former de minuscules gouttes de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (acide sulfurique), un processus en partie responsable des pluies acides. Le flux anthropique de ces gaz excède par endroits de beaucoup le flux naturel. On peut dire que globalement le flux principal dans l'échange de soufre entre la surface de la Planète et l'atmosphère est celui d'origine anthropique relié à la combustion des hydrocarbures et des charbons.



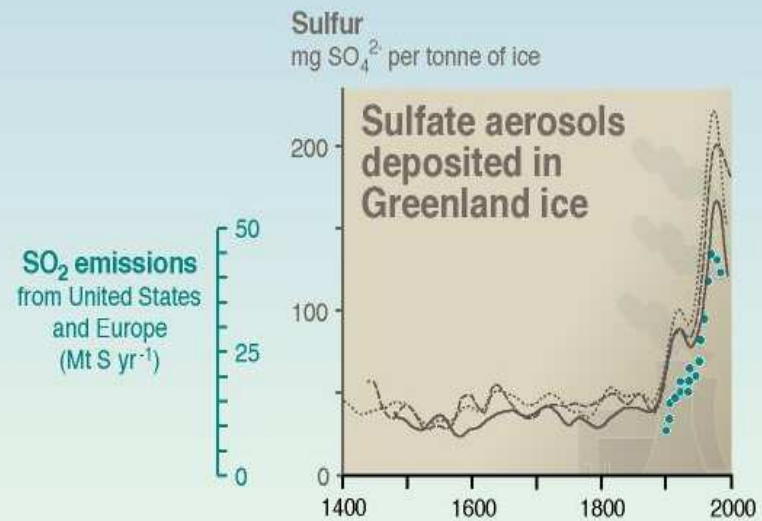
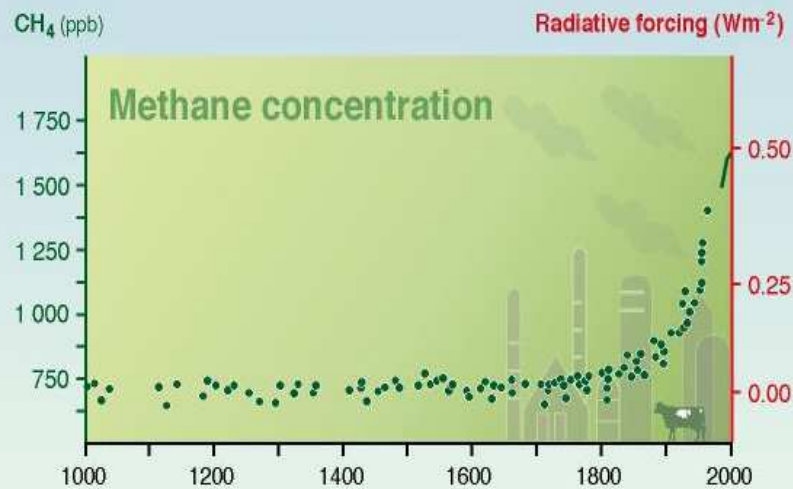
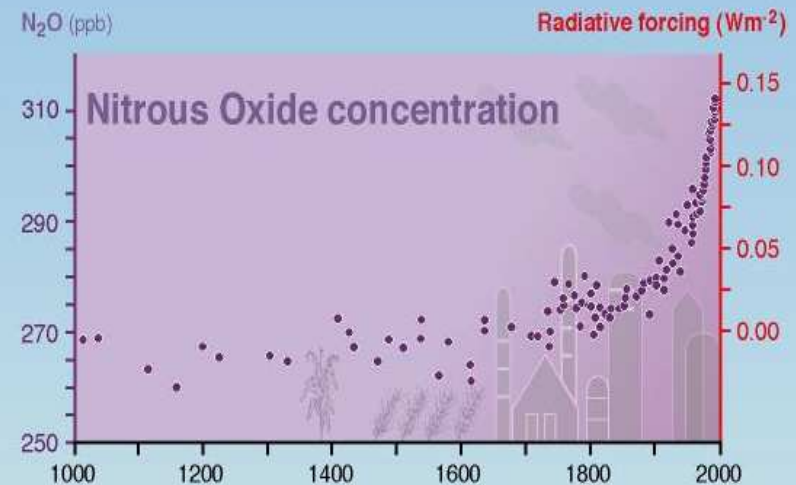
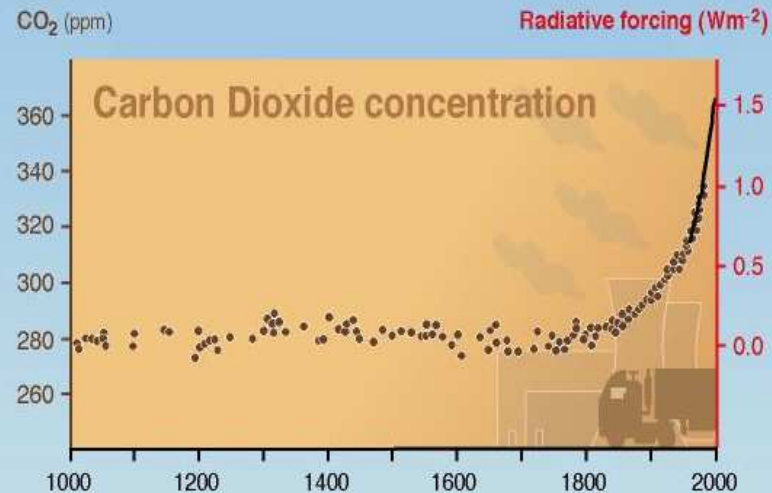
—→ Lien direct  
 —→ Puits de CO<sub>2</sub>  
 —→ Rétroaction  
 —→ Destruction photochimique





## Gaz au niveau de l'atmosphère

## Indicators of the human influence on the atmosphere during the Industrial era



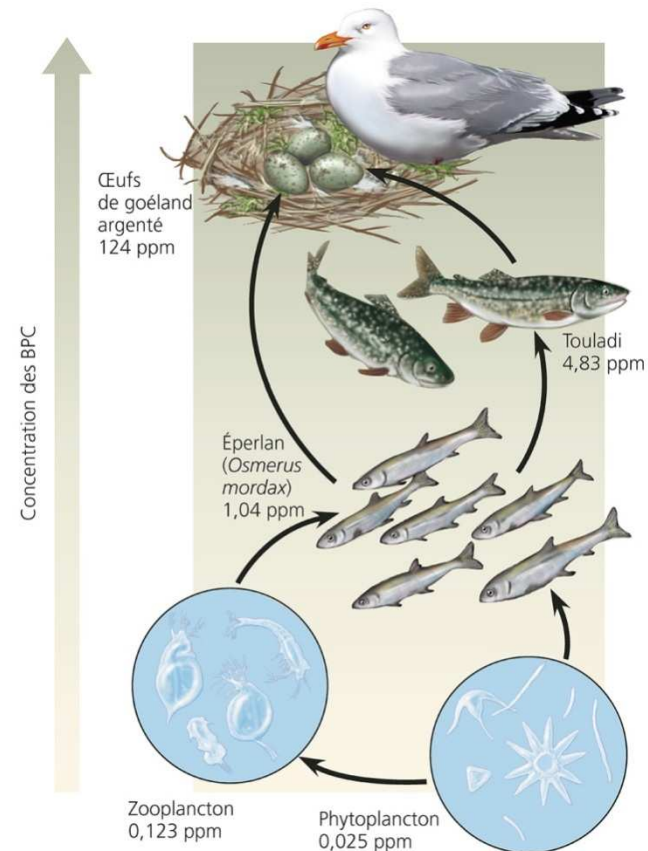
# Molécules synthétisées par les humains

- Les molécules synthétisées par les humains ont aussi un cycle!
- La plupart du temps, ces molécules sont utilisées sans grandes connaissances sur leur cycle.
- Ces substances peuvent parfois altérer un autre cycle biogéochimique (exemple: CFC qui détruit l'ozone)
- Ces substances peuvent parfois entrer dans la chaîne alimentaire (exemples: méthylmercure, DDT, BPC...)
- Ces substances peuvent parfois imiter des hormones, on les appelle alors « imposteurs endocriniens » (exemple: BPA)



# La bioamplification

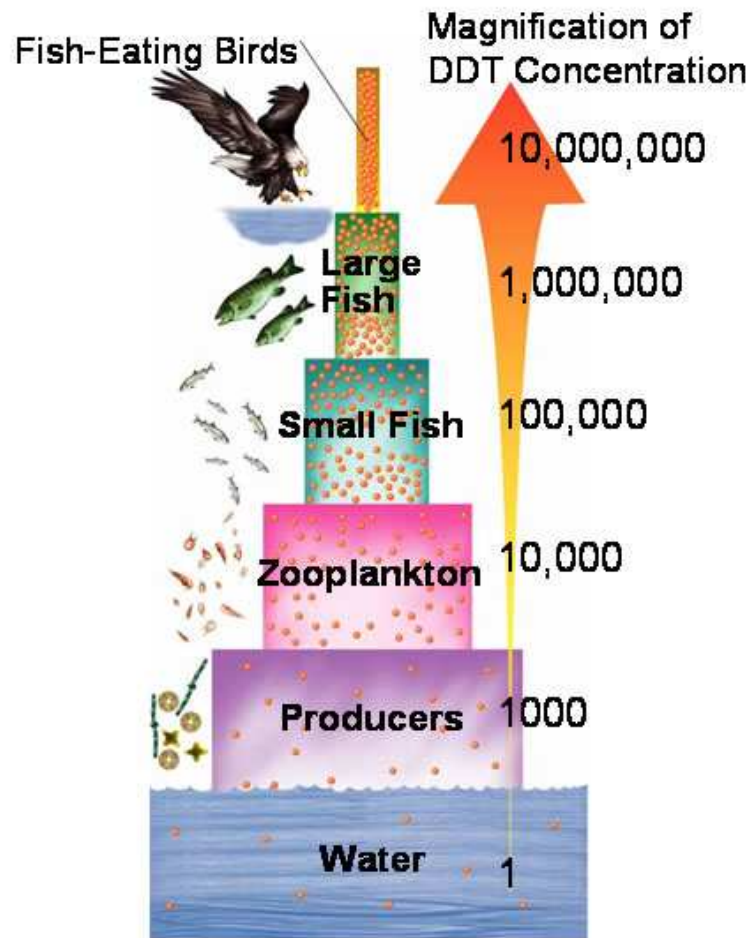
- Certaines molécules sont plus absorbées qu'éliminées par les êtres vivants
- La concentration augmente avec l'âge (bioaccumulation) et avec le niveau trophique (bioamplification)
- Quel phénomène est à l'origine de la bioamplification?



▲ Figure 56.25 La bioamplification des BPC dans un réseau trophique des Grands Lacs.

©ERPL, tous droits réservés.

# La bioamplification



- L'intensité de l'amplification dépend de l'efficacité écologique
- Plus un niveau trophique doit manger de grandes quantités du niveau inférieur, plus le facteur d'amplification sera grand