

LES GRANDS CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

BG-A Les grands cycles biogéochimiques (BCPST 2)

Cette partie traite des cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote ainsi que de l'impact des activités humaines sur ces cycles biogéochimiques. La section sur le cycle du carbone est l'occasion de présenter les grandes caractéristiques du cycle biogéochimique d'un élément (réservoir, flux, temps de résidence). La section sur le cycle de l'azote, facteur limitant la croissance des plantes dans la majorité des écosystèmes terrestres, montre l'importance des transformations microbiennes au cours de ce cycle et permet d'aborder la notion de couplage entre cycles biogéochimiques du carbone et l'azote.

Transversale et intégrative, cette partie mobilise des acquis en sciences de la vie (métabolisme et écologie), en sciences de la Terre et est étroitement articulée avec les autres parties de biogéosciences (étude des sols et du climat).

Savoirs visés

Capacités exigibles

BG-A-1 Le cycle du carbone

Le carbone se trouve sous différentes formes dans différents réservoirs vivants ou inertes : carbone réduit (biomasse actuelle et fossile), carbone oxydé (CO , CO_2 , carbonates).

Des flux physico-chimiques et/ou biotiques relient ces réservoirs. Ces flux correspondent à des conversions (exemple de la photosynthèse et de la respiration) et/ou à des transferts physiques (exemple de la pompe physique du carbone dans l'océan).

Le temps de résidence du carbone diffère selon les réservoirs.

- Caractériser les principaux réservoirs du carbone : ordre de grandeur de leurs tailles respectives et temps de résidence du carbone dans ces réservoirs.
- Quantifier l'ordre de grandeur de deux échanges annuels dans le cas du CO_2 atmosphérique : échanges avec la biomasse et avec l'océan.
- Représenter schématiquement le cycle biogéochimique du carbone.
- Expliquer le rôle des organismes vivants sur l'altération des roches et comment cette altération induit la précipitation des carbonates.
- Expliquer le rôle de l'altération des silicates dans le piégeage du carbone.
- Argumenter sur l'existence de sous-cycles lents et rapides dans le cycle du carbone.
- Identifier les temps de résidence respectifs de deux gaz à effet de serre (CO_2 et du CH_4) dans l'atmosphère.

BG-A-2 Le cycle de l'azote

L'azote existe sous des formes organiques et minérales. Il se trouve sous différentes formes minérales en solution (dont l'ammonium NH_4^+ , le nitrate NO_3^-) et dans l'atmosphère (dont l'oxyde nitreux N_2O , le diazote N_2).

- Identifier les flux entre les différentes formes azotées (parmi lesquels l'ammonification, la nitrification, la dénitrification, la fixation du N_2 atmosphérique et l'assimilation de l'azote).
- Représenter schématiquement le cycle biogéochimique de l'azote.

Les flux biotiques ont une place prépondérante dans le cycle de l'azote. De nombreuses étapes du cycle de l'azote sont purement microbiennes.

L'oxyde nitreux (N_2O) est un gaz à effet de serre qui est produit par les processus microbiens de nitrification et de dénitrification.

La matière organique comporte du carbone et de l'azote, sa minéralisation implique un couplage entre le cycle du carbone et le cycle de l'azote.

- Réaliser une préparation microscopique de nodosités et expliquer leur rôle dans le cycle de l'azote.
- Expliquer le couplage entre le cycle du carbone et celui de l'azote dans le cas de la minéralisation de la matière organique dans les sols, par l'étude du rapport C/N de la matière organique, du type d'humus (mull et moder) et des caractéristiques abiotiques et biotiques du sol.

Précisions et limites :

Seuls les flux précisés dans la colonne capacités exigibles doivent être connus.

I. Le cycle du carbone

1. les réservoirs de carbone sous ses différentes formes
 - 1.1 la biosphère et les sols, des réservoirs de carbone organique à l'état solide
 - 1.2 l'atmosphère contient du carbone minéral et du carbone organique à l'état gazeux
 - 1.3 l'hydrosphère océanique contient du carbone sous forme d'ions
 - 1.4 la croûte contient principalement du carbone sous forme de sédiments et de matière organique fossile (cf STE)
 - 1.5 le manteau
2. des réservoirs plus ou moins mobilisables
3. Les flux entre les réservoirs permettent de caractériser un cycle rapide et un cycle lent.
 - 3.1 la notion de temps de résidence
 - 3.2. les flux entre biosphère, hydrosphère et atmosphère sont à l'origine d'un cycle rapide du carbone
 - 3.2.1 les flux entre la biosphère et l'atmosphère
 - 3.2.2 Les flux entre océan et atmosphère
 - 3.2.3 de petits réservoirs et des flux de grandes ampleurs induisent des temps de résidence faibles et donc un cycle de carbone court
 - 3.3. les flux impliquant la géosphère sont à l'origine d'un cycle lent du carbone.
 - 3.3.1 la précipitation et la dissolution des carbonates mais aussi leur métamorphisme
 - 3.3.2 l'altération des roches silicatées contenant du calcium
 - 3.3.3 la fossilisation de la matière organique en matière carbonée
 - 3.3.4 de grands réservoirs et des flux très faibles induisent des temps de résidence très longs et donc un cycle de carbone lent

II. Le cycle biogéochimique de l'azote

1. les réservoirs de l'azote sous ses différentes formes
2. Les flux biotiques ont une place prépondérante dans le cycle de l'azote.
 - 2.1 les organismes autotrophes à l'azote réduisent l'azote minéral en azote organique (cf SVB2)
 - 2.1.1 l'assimilation de l'azote du sol chez les végétaux
 - 2.1.2 l'assimilation de l'azote atmosphérique, la diazotrophie
 - 2.2 l'activité microbienne du sol permet la minéralisation de l'azote organique et l'évolution de l'azote minéral jusqu'à sa forme N_2
 - 2.2.1 L'ammonification par les bactéries ammonifiantes minéralise l'azote organique
 - 2.2.2 La nitrification permet de former des nitrates à partir du NH_4 (cf SVE1)
 - 2.2.3 La dénitrification restitue l'azote minéral à l'atmosphère mais produit également des gaz à effet de serre

III. Les cycle de l'azote et du carbone sont couplés

1. l'assimilation de l'azote minéral en azote organique entre en compétition avec la fixation du CO_2 lors de la photosynthèse
2. la minéralisation de la matière organique dépend du rapport C/N (cf BGB)

IV. Les activités anthropiques modifient les cycles du carbone et de l'azote

1. les activités humaines modifient le cycle biogéochimique du carbone
2. les activités humaines modifient le cycle de l'azote

En conclusion

Définitions/mots-clés :

Ammonification : Libération d'ammoniac (NH_3) ou d'ions ammonium (NH_4^+) par hydrolyse de matière organique azotée.

Assimilation : Réduction de la matière minérale en matière organique par les êtres vivants.

Biomasse : masse de matière organique vivante.

Cycle biogéochimique : ensemble des flux d'un élément chimique (carbone, azote, phosphore ...) aussi bien sous forme minérale qu'organique entre les différents réservoirs que constituent la biosphère et les enveloppes terrestre : atmosphère, hydrosphère et lithosphère.

Décomposeurs : Ensemble des organismes qui hydrolysent et minéralisent la matière organique. Généralement, ce terme fait référence aux organismes du sol qui se nourrissent de matière organique morte et d'excréments et qui les transforment en matière minérale

Dénitrification : Réduction des ions nitrates NO_3^- en diazote atmosphérique N_2 ou en oxyde nitreux N_2O

Eutrophisation : Évolution d'une étendue d'eau par un apport massif de nutriments entraînant une accumulation de matière organique, issue de la prolifération d'algues, dont la décomposition conduit à une baisse de l'oxygénation et une augmentation de la turbidité.

Engrais : Substance d'origine organique ou minérale servant à améliorer la croissance des plantes et le rendement de certaines cultures après ajout dans le sol.

Flux biotique : Transfert de matière entre deux réservoirs permis par des êtres vivants.

Lixiviation : Déplacement des **ions** d'un sol par l'action des eaux de pluie.

Nécromasse : masse de matière organique morte

Nitratation : Oxydation des ions nitrites NO_2^- en ions nitrates NO_3^- par les êtres vivants.

Nitrification : Ensemble des étapes de l'oxydation de l'ammoniac (NH_3) ou des ions ammonium NH_4^+ en nitrates.

Nitrosation : Oxydation des ions ammonium NH_4^+ en ions nitrites NO_2^- par les êtres vivants.

Minéralisation : Ensemble des processus à l'origine d'une oxydation de la matière organique en matière minérale.

Réservoir : zone de stockage d'un élément chimique sous une ou plusieurs formes.

Réservoir (bio)géochimique : biosphère, sols et/ou enveloppe terrestre (atmosphère, hydrosphère, lithosphère) stockant l'élément chimique considéré

Respiration : oxydation complète de matière organique, libérant du CO_2 . Implique une chaîne de transport d'électrons.

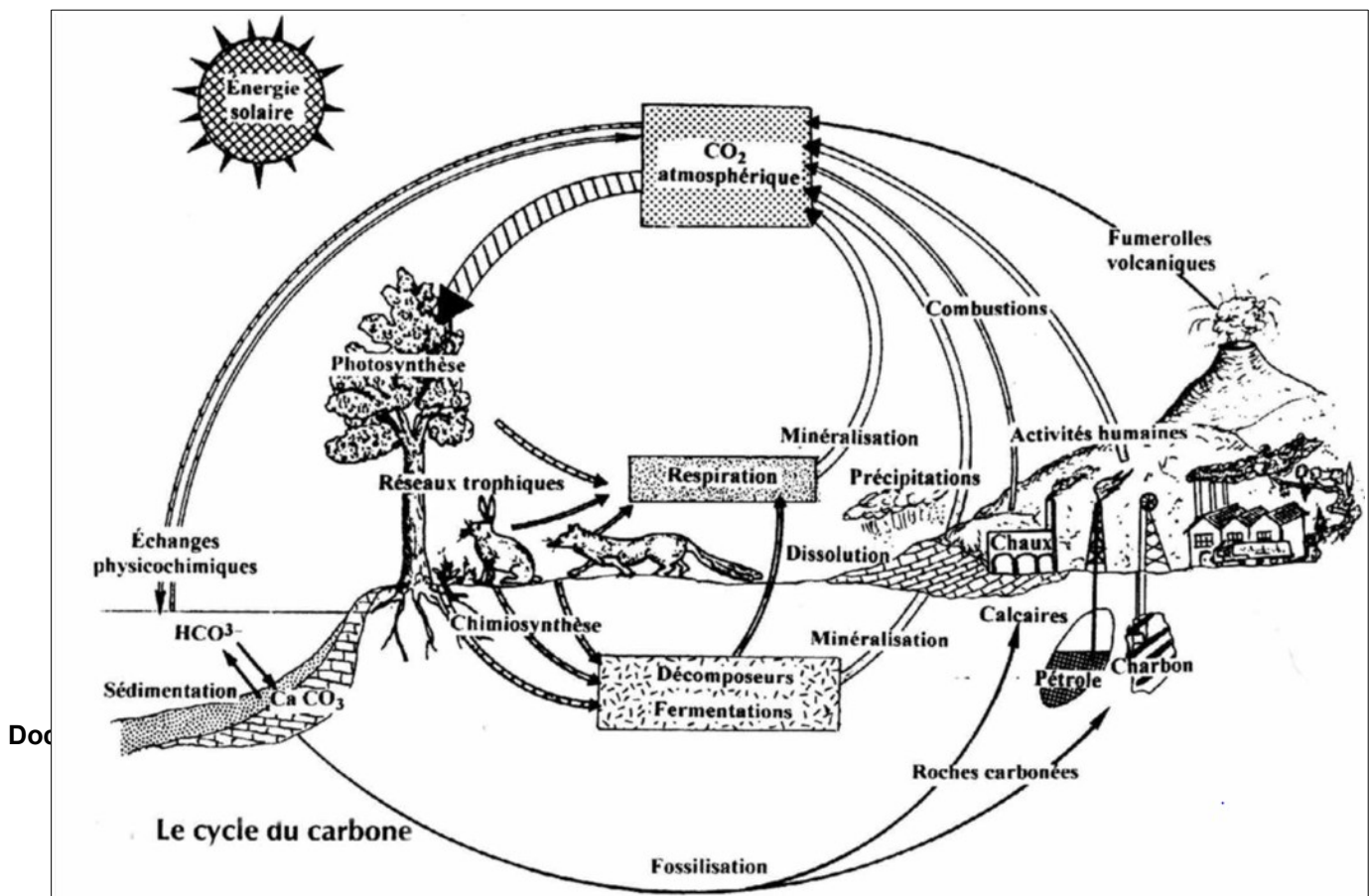
Si O_2 est l'accepteur final d'électrons, la respiration est aérobie, si NO_3^- est l'accepteur final d'électrons, la respiration est anaérobie.

Roches carbonatées : roches composées par l'ion $(\text{CO}_3)^{2-}$. Les minéraux ayant cette composition sont nombreux mais seuls 3 d'entre eux sont abondants : calcite (CaCO_3), aragonite (CaCO_3) et dolomite ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$).

Roches carbonées : roche provenant de la modification de matière organiques mortes, par craquage

Simplification : Hydrolyse des molécules organiques en monomères ou en ions sans modification du nombre d'oxydation des atomes d'azote ou de carbone.

Temps de résidence : temps durant lequel un élément chimique reste dans un réservoir (bio)géochimique



□ **Quels sont les réservoirs contenant du carbone organique ? Du carbone minéral ?**

□ **Quels sont les plus grands réservoirs de carbone mis à part le manteau ?**

Réservoir	État	Nature	Masse (en Gt de C)	
Biosphère	Solide C réduit	Biomolécules de la biomasse (glucides, lipides, protides, nucléotides)	600	
Sols	Solide C réduit à oxydé	Biomolécules de la nécromasse	1500	
Atmosphère	Gazeux C oxydé	CO₂ (380 ppmv) CH ₄ , CFC, en traces	850	
Hydrosphère	Dissous C oxydé	C minéral dissous CO₂ (1%) HCO₃⁻ (93%) CO₃²⁻ (6%) C organique dissous	40 000	
Croûte	Solide roches carbonatées C oxydé	CaCO₃ : calcite, aragonite, marbre CaMg(CO₃)₂ : dolomie	70 10 ⁶	100 10 ⁶
	Solide / liquide / gazeux roches carbonées C réduit	tourbe, charbon, pétrole, gaz	20 10 ⁶	
	Clathrates (= hydrates de méthane)		10 000	
Manteau	Solide	Diamant	100 10 ⁶ ?	

1.1 la biosphère et les sols, des réservoirs de carbone organique à l'état solide

1.2 l'atmosphère contient du carbone minéral et du carbone organique à l'état gazeux

1.3 l'hydrosphère océanique contient du carbone sous forme d'ions

1.4 la croûte contient principalement du carbone sous forme de sédiments et de matière organique fossile(cf STE)

1.5 le manteau

2. des réservoirs plus ou moins mobilisables

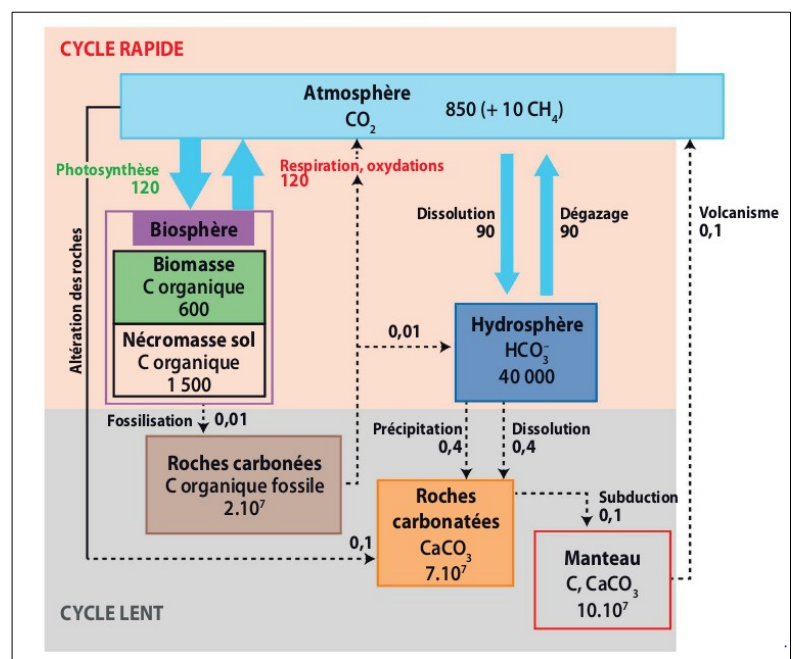
3. Les flux entre les réservoirs permettent de caractériser un cycle rapide et un cycle lent.

3.1 la notion de temps de résidence

Document 4 : les flux de carbone entre les différents réservoirs

□ **Calculer le temps de résidence du C dans chaque réservoir sachant que :**

$$\text{Temps de résidence } \tau = \frac{\text{Quantité élément}}{\text{Flux}}$$

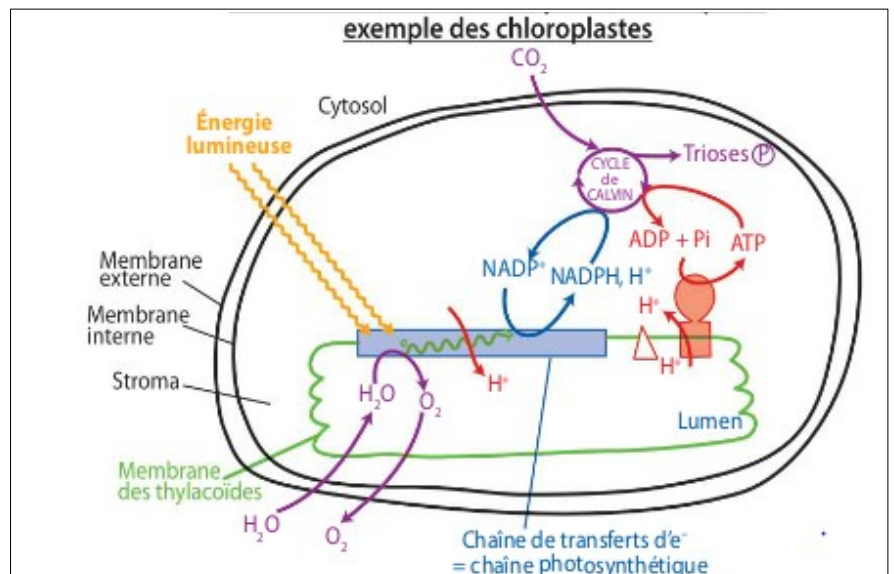


3.2. les flux entre biosphère, hydrosphère et atmosphère sont à l'origine d'un cycle rapide du carbone

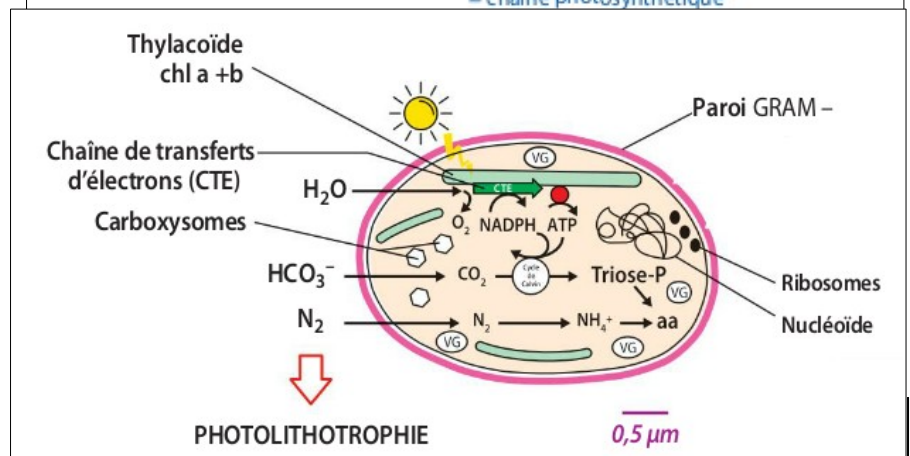
3.2.1 les flux entre la biosphère et l'atmosphère

Document 5 : la photosynthèse agit comme une pompe biologique du carbone atmosphérique

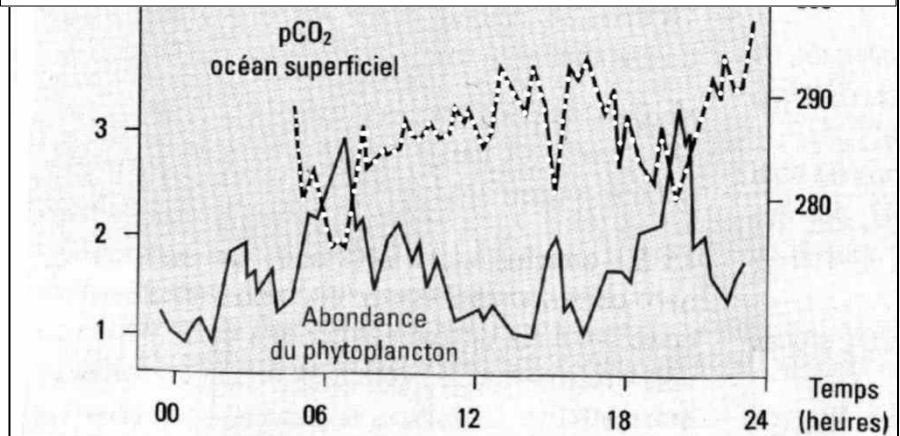
document 5a : exemple de la photosynthèse dans un chloroplaste végétal (pour rappel)



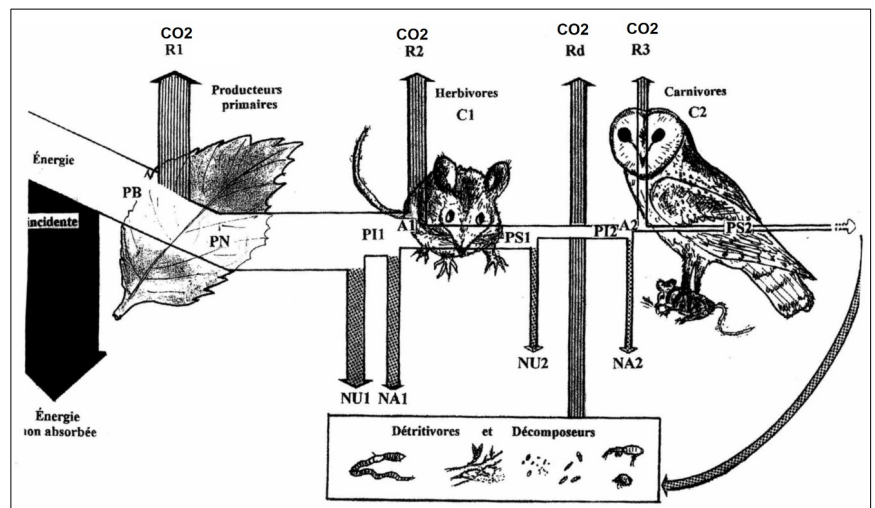
document 5b: exemple de la photosynthèse chez une cyanobactérie (cf SVA3)



document 5c: corrélation entre l'abondance de phytoplancton et la concentration en CO_2 dans les eaux de surfaces.

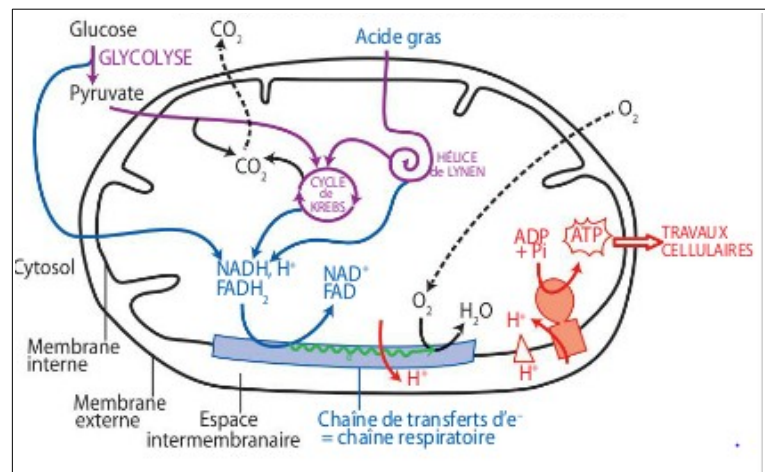
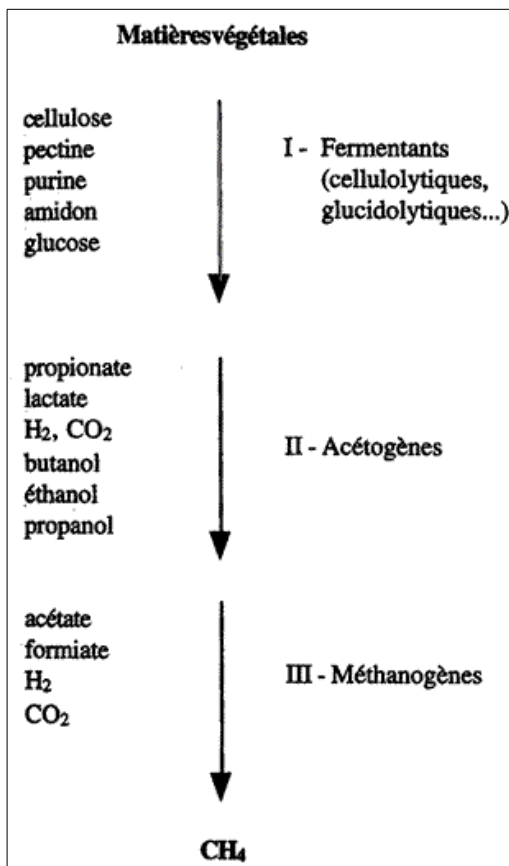


Document 6 : les transferts de matière et d'énergie au sein de la chaîne alimentaire (pour rappel)

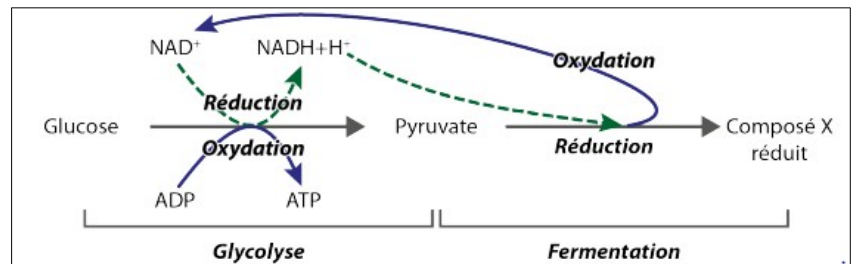


PB = Production brute = Flux au niveau des producteurs primaires
 PN = Production nette
 NU1, NU2 = non utilisé ; NA1, NA2 = non assimilé
 C1, C2, C3... = Producteurs secondaires (Consommateurs 1, 2, 3...)
 R1, R2, R3... = Pertes respiratoires des producteurs et des décomposeurs
 PI1 = Énergie ingérée par les herbivores ; PI2 = Énergie ingérée par les carnivores
 PS1 = Énergie fixée par les herbivores ; PS2 = Énergie fixée par les carnivores
 A1 = Énergie assimilée par les herbivores = Flux au niveau des consommateurs 1

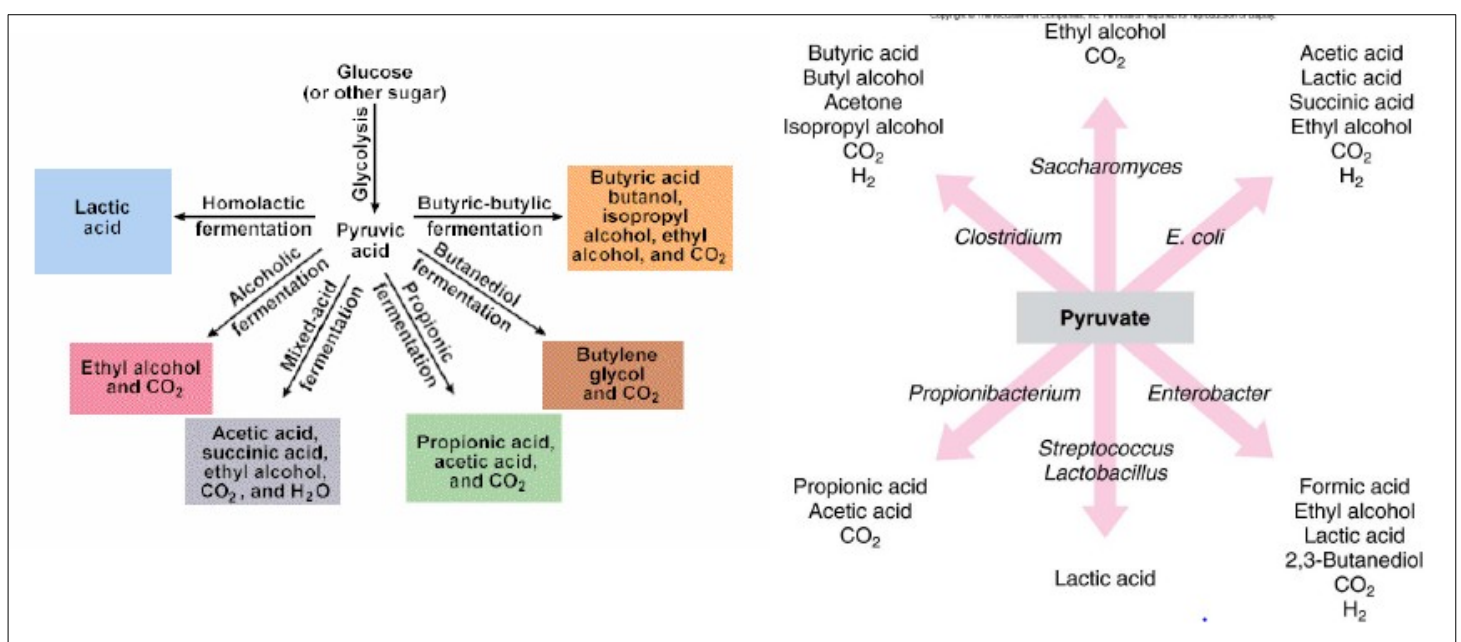
document 7 : la respiration mitochondriale est une oxydation complète de la matière organique (pour rappels)



Document 8 : les fermentations de la matière organique du sol par les micro-organismes en anaérobie



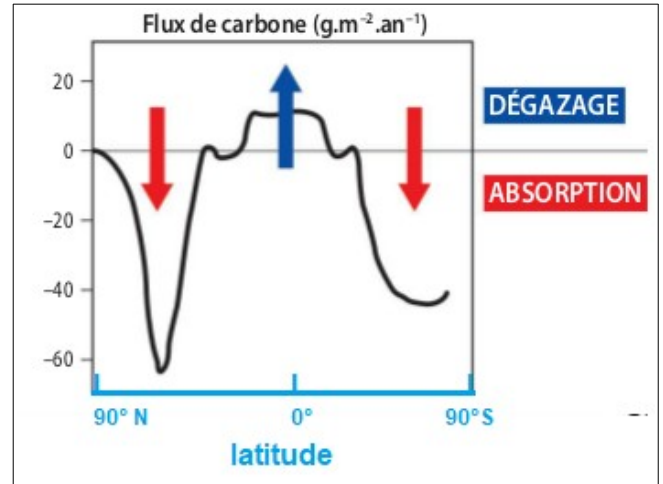
Document 9 : les différents types de fermentation et leur produits



3.2.2 Les flux entre océan et atmosphère

Document 10 : l'océan agit comme un puits ou une source de carbone en fonction de la latitude.

□ Sachant que la solubilité du CO_2 augmente avec la diminution de la température et à partir de vos connaissances sur la circulation thermo-haline, expliquer les flux de carbone entre l'atmosphère et l'océan en fonction de la latitude.



3.2.3 de petits réservoirs et des flux de grandes ampleurs induisent des temps de résidence faibles et donc un cycle de carbone court

Document 11 : temps de résidence du carbone dans les réservoirs superficiels

Réservoir	Biomasse	Nécromasse	Atmosphère	Hydrosphère
Temps de résidence	5 ans	12 ans	4 ans	5 ans en surface, 1 000 ans en profondeur

3.3. les flux impliquant la géosphère sont à l'origine d'un cycle lent du carbone.

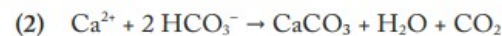
3.3.1 la précipitation et la dissolution des carbonates mais aussi leur métamorphisme

Document 12 : précipitation et dissolution des carbonates

12a : précipitation



2 CO_2 consommés

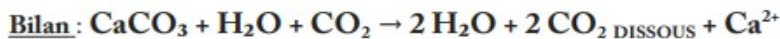


1 CO_2 produit



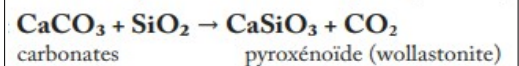
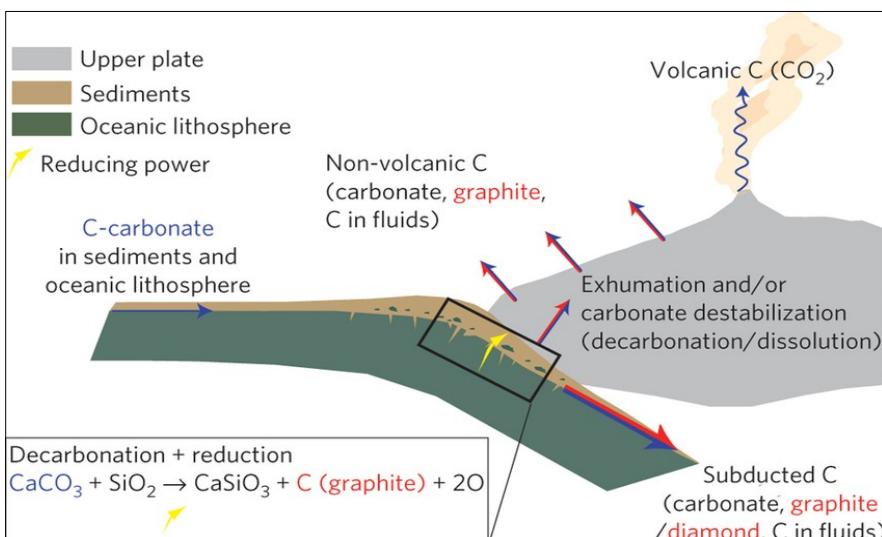
12a : dissolution

2 CO_2 consommés et 1 CO_2 produit : 1 CO_2 retiré de l'atmosphère par précipitation des carbonates.



1 CO_2 consommé et 2 CO_2 produits : 1 CO_2 ajouté dans l'atmosphère par altération des carbonates.

Document 13 : le métamorphisme des carbonates au niveau des zones de subduction



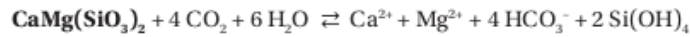
Emissions volcaniques de CO_2

Type de volcanisme	Flux globaux de CO_2 (10^6t.an^{-1})
Volcanisme sous marin (dorsales océaniques)	44 à 61
Volcanisme aérien (subductions et	97 à 114

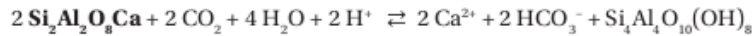
3.3.2 l'altération des roches silicatées contenant du calcium

Document 14 : altération des silicates contenant du calcium

Équation-bilan de l'hydrolyse d'un **pyroxène** :



Équation-bilan de l'hydrolyse d'un **plagioclase calcique**



3.3.3

la

fossilisation de la matière organique en matière carbonée

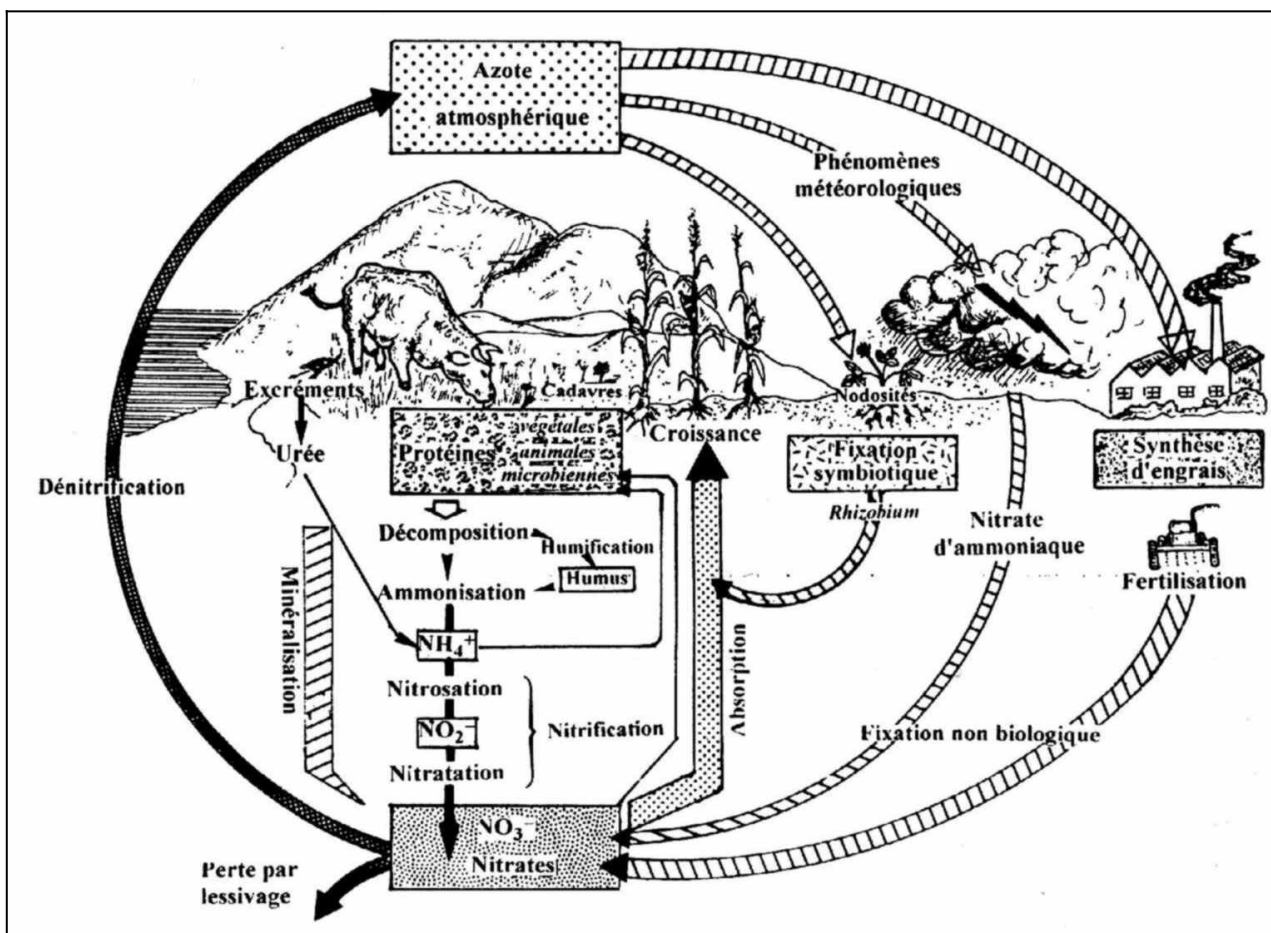
3.3.4 de grands réservoirs et des flux très faibles induisent des temps de résidence très longs et donc un cycle de carbone lent

Document 15 : temps de résidence du carbone dans les réservoirs profonds

Réservoir	Roches carbonatées	Roches carbonées	Manteau
Temps de résidence	100 à 300 Ma	2 Ga	1 Ga

II. Le cycle biogéochimique de l'azote

document 16 : le cycle de l'azote.



1. les réservoirs de l'azote sous ses différentes formes

Document 17 : les principaux réservoirs d'azote et leur taille respective

- Quelle est la forme la plus abondante de l'azote et quel est le réservoir qui en contient le plus ?
- Quelles sont les autres formes d'azote minéral les plus abondantes ?

Réservoir	Espèce ou forme d'azote	Taille (en Gt = 10^{15} g)
Atmosphère	N_2	$3,8 \cdot 10^6$
	NO_x , N_2O	1,4
	NH_3	0,0017
Océan	N_2	$22 \cdot 10^3$
	NO_3^-	570
	NH_4^+	7
	Azote organique dissous et particulaire	533
Biomasse continentale	N organique du sol (déchets et nécromasse)	300
	N inorganique du sol	160
	Métaphytes	11 à 14
	Métazoaires	0,17
	Micro-organismes	0,5
	Humus	1,9 à 3,3
Terre interne	Croûte	10^6 dans schistes et pétroles
	Manteau	200 à 400 ppm dans les granitoïdes
	Noyau	

1.1 le réservoir atmosphérique

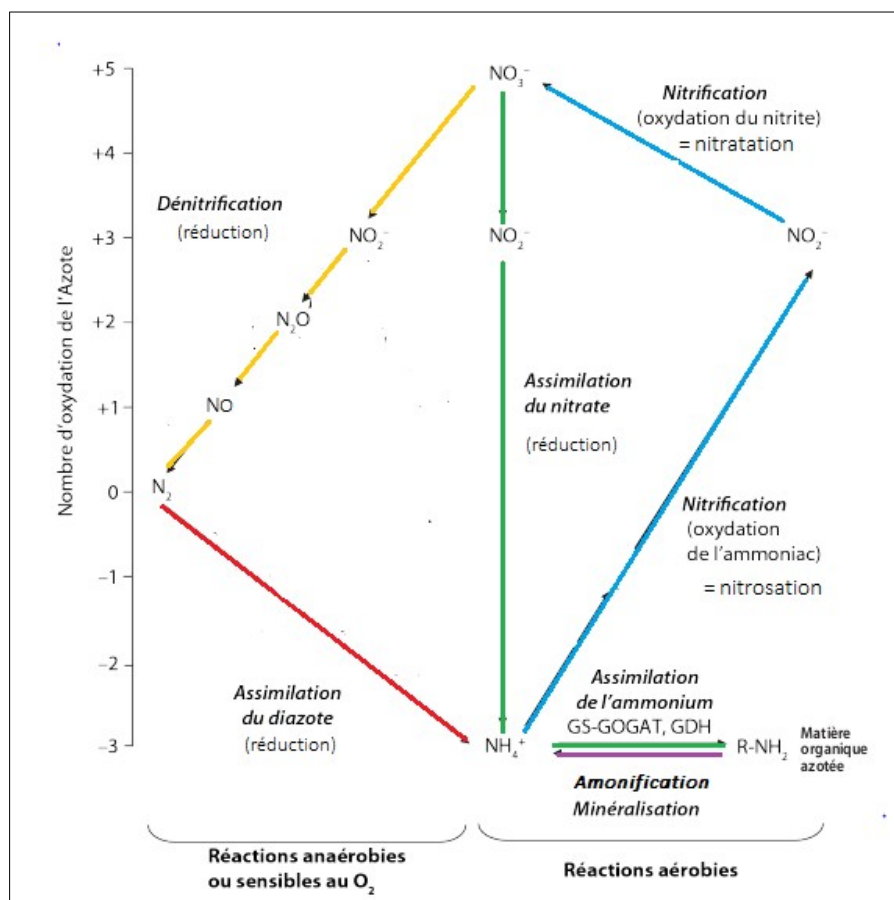
1.2 l'hydrosphère océanique

1.3 La biosphère et les sols

1.4 la géosphère

2. Les flux biotiques ont une place prépondérante dans le cycle de l'azote.

Document 18 : le cycle de l'azote et les réactions d'oxydo-réductions associées



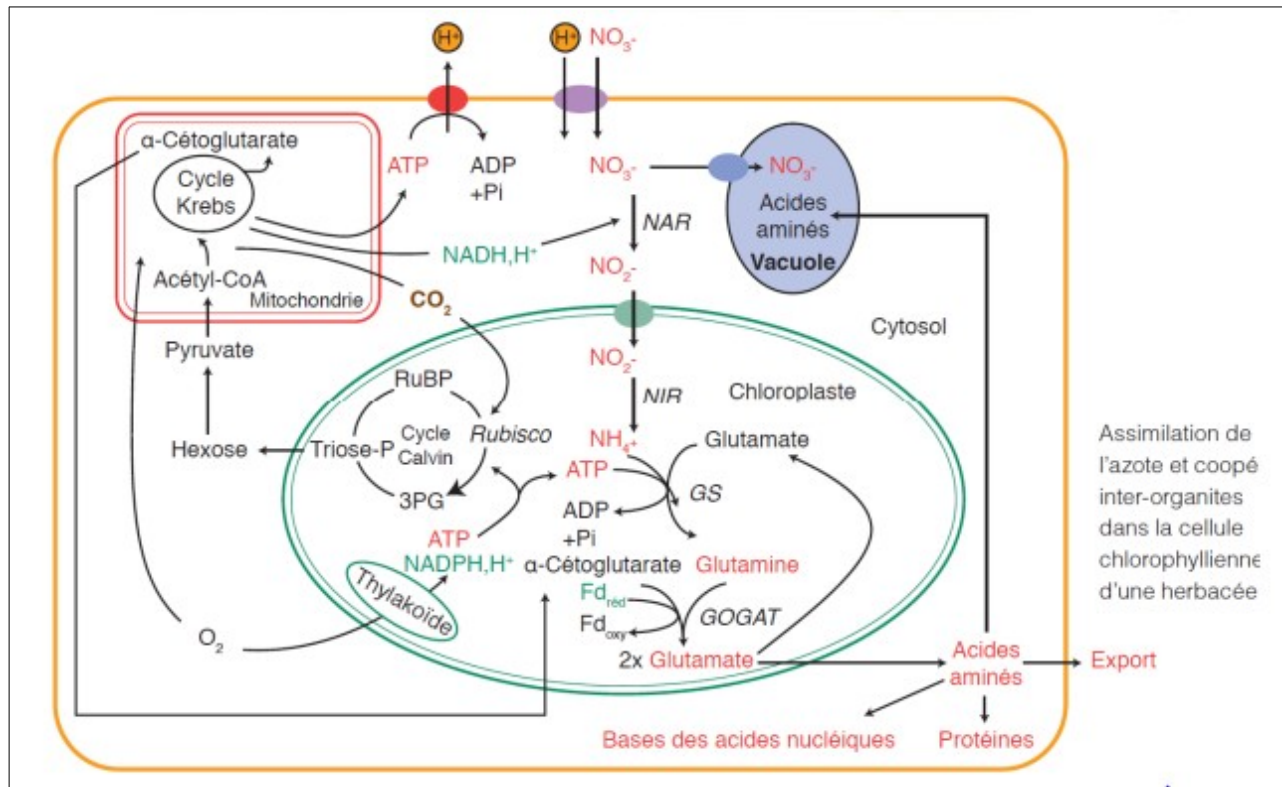
- Assimilation Végétaux, photo-lithotrophes,
- Fixation de N_2 Rhizobium, Azotobacter, chimio-organotrophes, Nostoc (cyanobactérie), photo-lithotrophes,
- Dénitrification Pseudomonas chimio-organotrophes,
- Ammonification bactéries ammonifiantes chimio-organotrophes,
- Nitrification Nitrosomonas puis nitrobacter chimio-lithotrophes,

2.1 les organismes autotrophes à l'azote réduisent l'azote minéral en azote organique

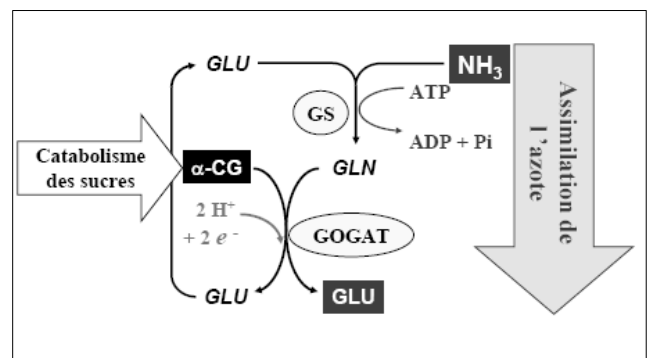
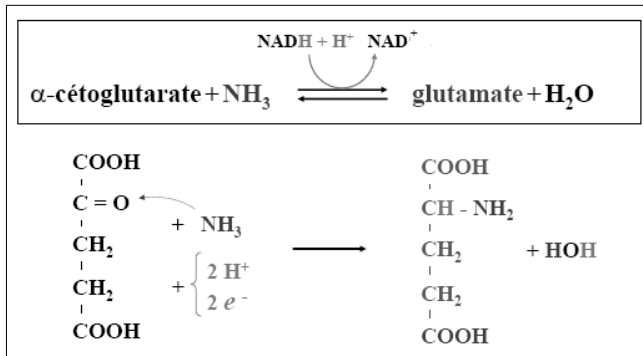
2.1.1 l'assimilation de l'azote du sol chez les végétaux

Document 19 : l'assimilation des nitrates dans une cellule chlorophyllienne

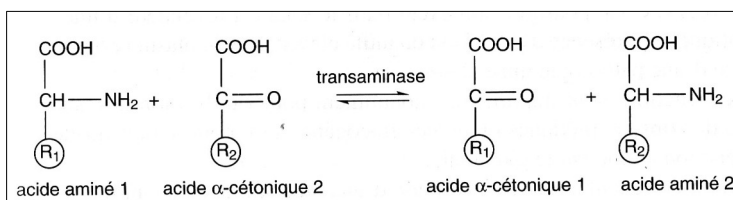
19a : schéma bilan montrant la coopération intracellulaire entre les organites



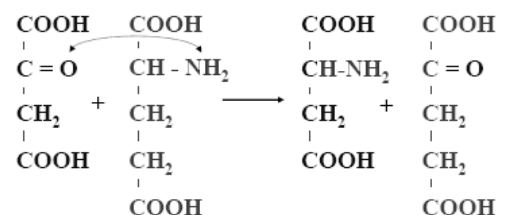
19b : l'amination réductrice de l'αCG est plus ou moins directe en fonction de l'organite dans laquelle elle se réalise (à gauche dans la mitochondrie, à droite dans le chloroplaste).



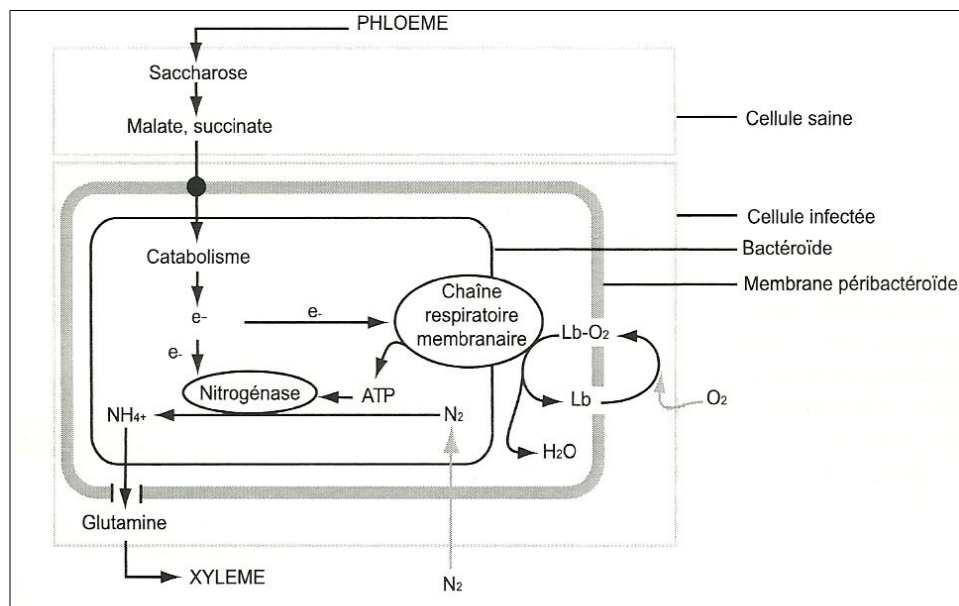
19c : le principe de la transamination et exemple



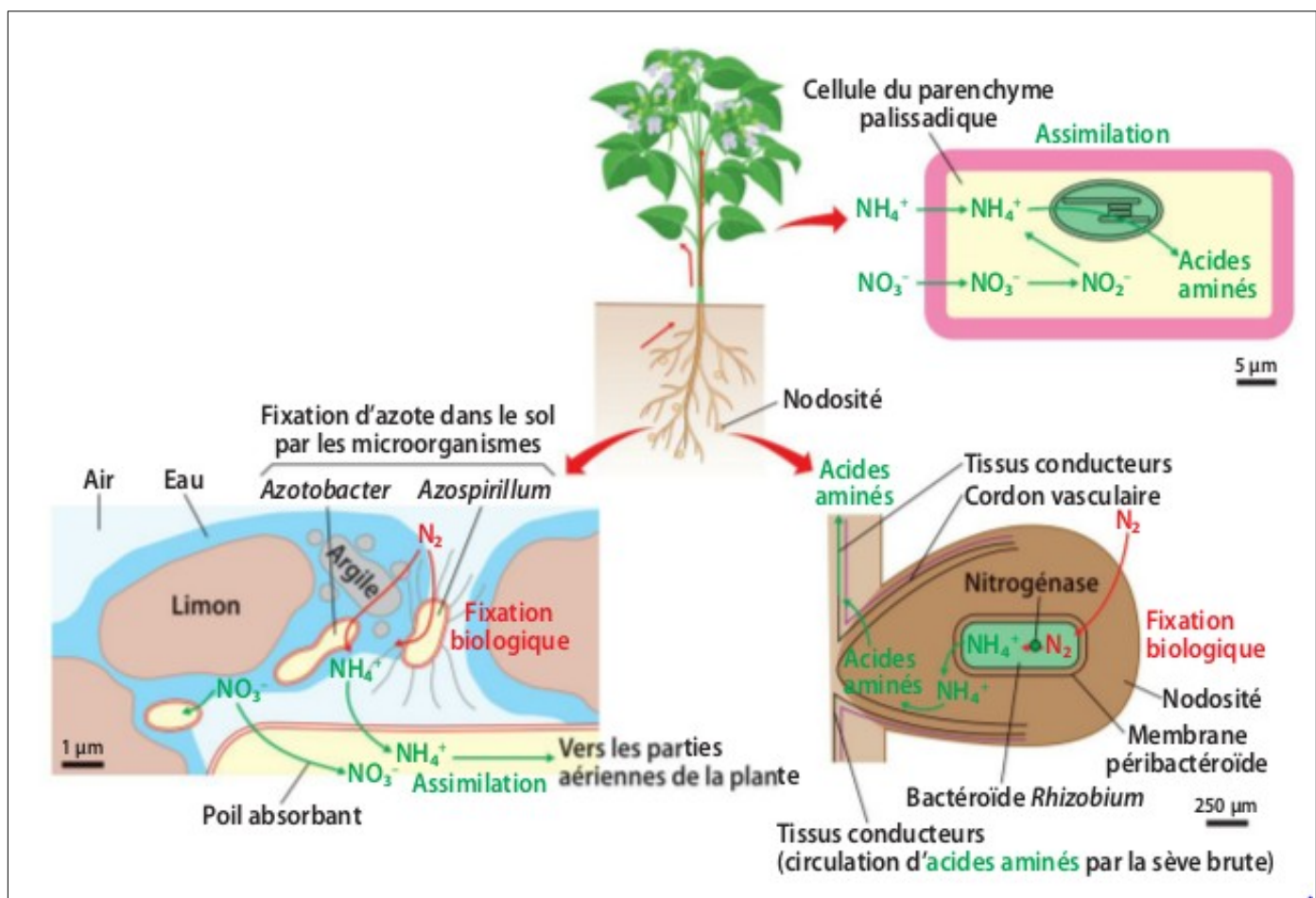
Enzyme : aspartate transaminase
Co-enzyme : pyridoxal-P (vit B6)



2.1.2 l'assimilation de l'azote atmosphérique, la diazotrophie

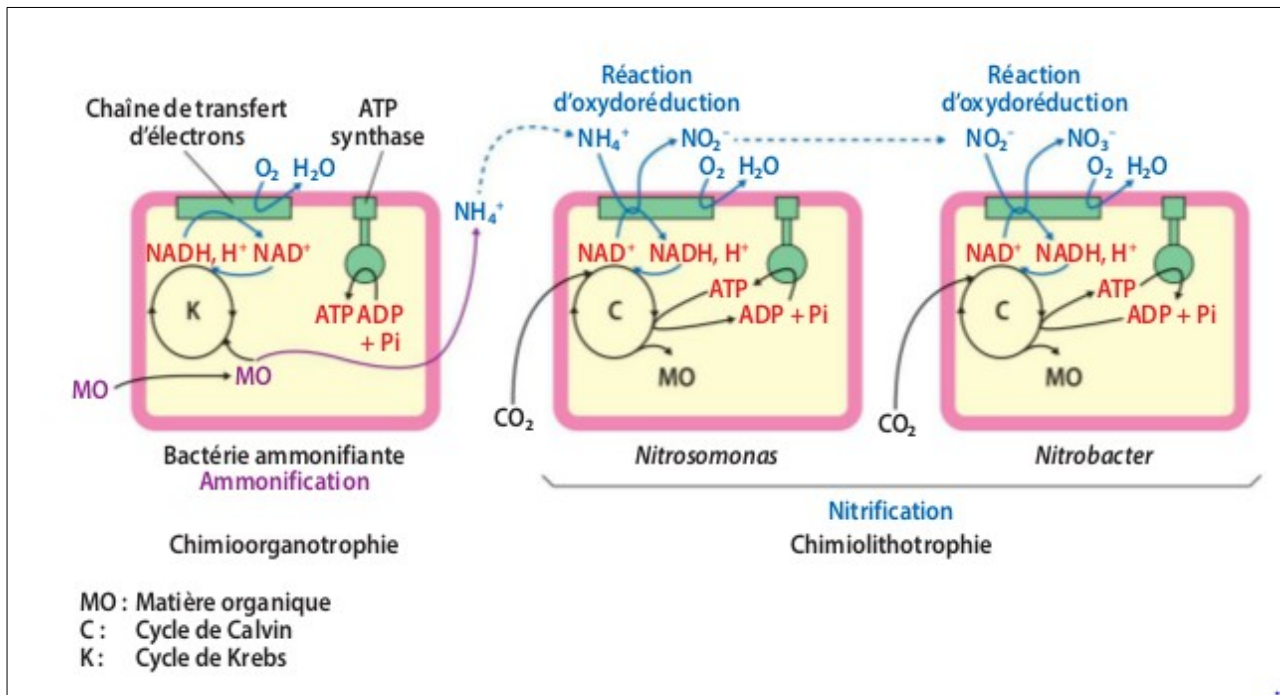
document 20 : rappel sur l'assimilation du N_2 par l'association symbiotique Rhizobium/Fabacée

Document 21 : bilan des différentes possibilités de la fixation biologique de l'azote minéral



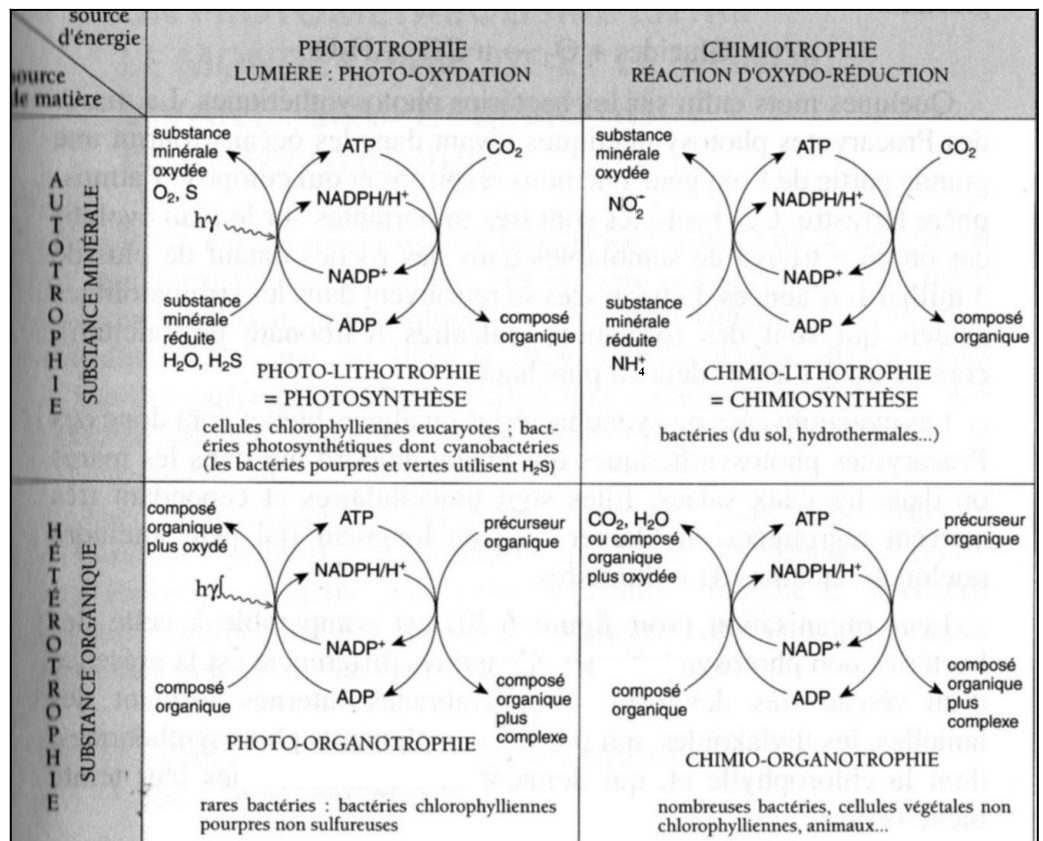
2.2 l'activité microbienne du sol permet la minéralisation de l'azote organique et l'évolution de l'azote minéral jusqu'à sa forme N_2

Document 22 : la minéralisation de la matière azotée



Document 23 : les différents type de métabolisme

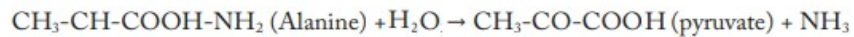
□ A l'aide du document ci-dessous, expliquer la différence entre la chimio-organotrophie et la chimio-litotrophie en précisant dans chacun des cas quel est le donneur d'électrons



2.2.1 L'ammonification est la minéralisation de l'azote organique par les bactéries ammonifiantes

Document 24 : l'ammonification

Dégradation des acides aminés : $R-CHNH_2-COOH + H_2O + H^+ \rightarrow R-CO-COOH + NH_4^+$

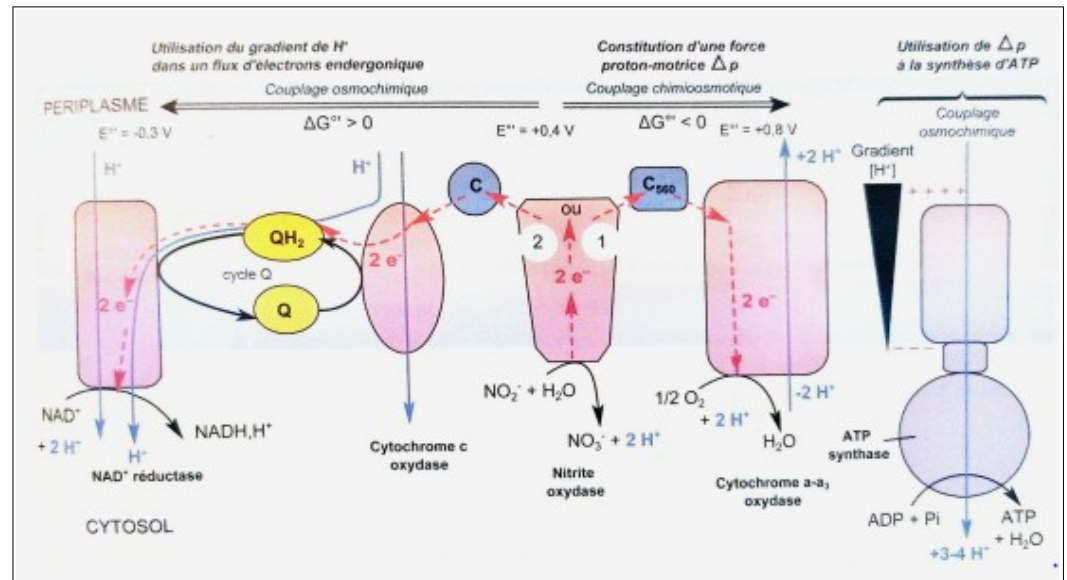


Dégradation de l'urée : $CO(NH_2)_2 + 3 H_2O \rightarrow CO_2 + 2 OH^- + 2 NH_4^+$

2.2.2 La nitrification permet de former des nitrates à partir du NH_4^+

Document 25 : chaîne de transport des électrons chez Nitrobacter (pour rappels)

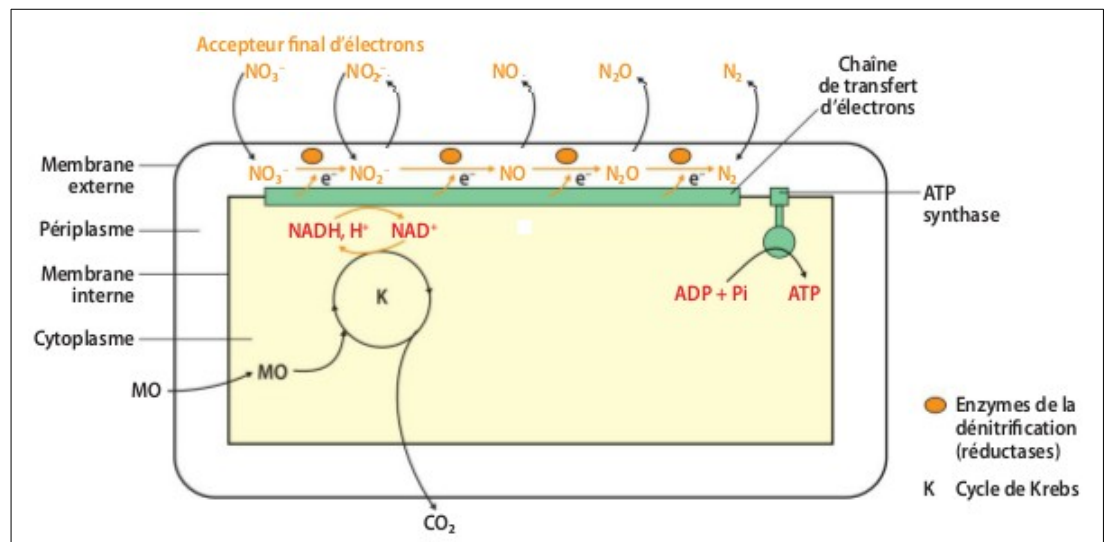
□ A l'aide de vos connaissances et de ce document, rappelez comment le $NADH_2$ et l'ATP sont produit à partir de l'oxydation du NO_2^- .



2.2.3 La dénitrification restitue l'azote minéral à l'atmosphère mais produit également des gaz à effet de serre

Document 26 : la dénitrification par les bactéries du genre Pseudomonas

□ En quoi peut-on dire que la dénitrification est une respiration anaérobie ?



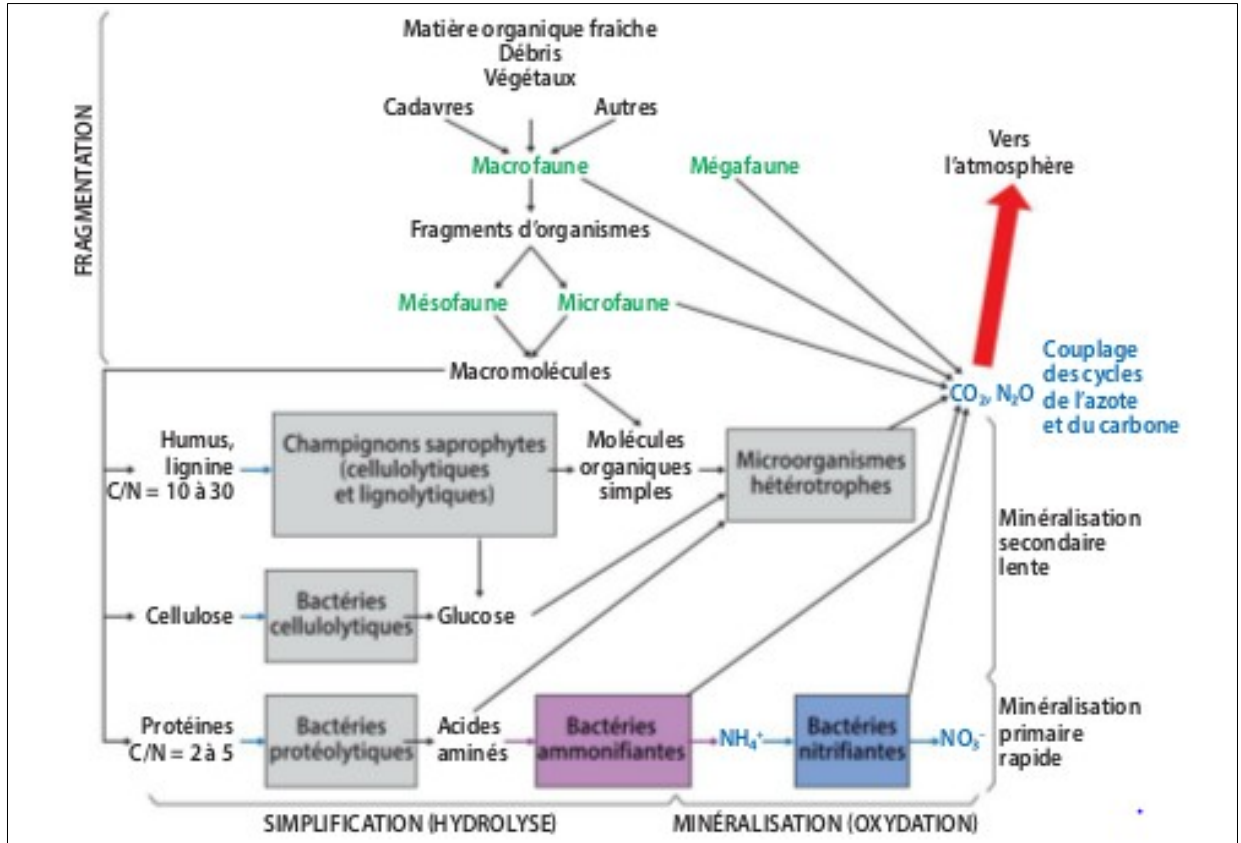
III. Les cycle de l'azote et du carbone sont couplés

1. l'assimilation de l'azote minéral en azote organique entre en compétition avec la fixation du CO₂ lors de la photosynthèse

□ cf document 19

2. la minéralisation de la matière organique dépend du rapport C/N (□ cf BGB)

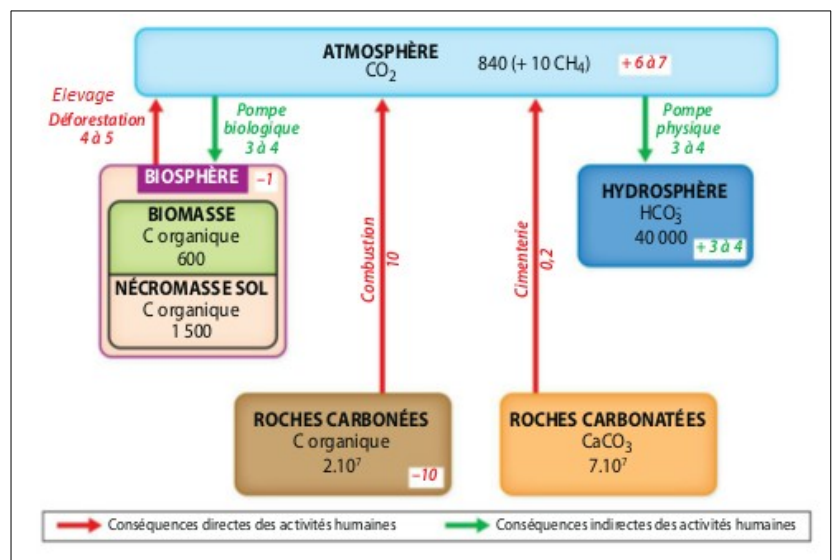
Document 27 : couplage des cycles du carbone et de l'azote lors de la minéralisation de la mO



IV. Les activités anthropiques modifient les cycles du carbone et de l'azote

1. les activités humaines modifient le cycle biogéochimique du carbone

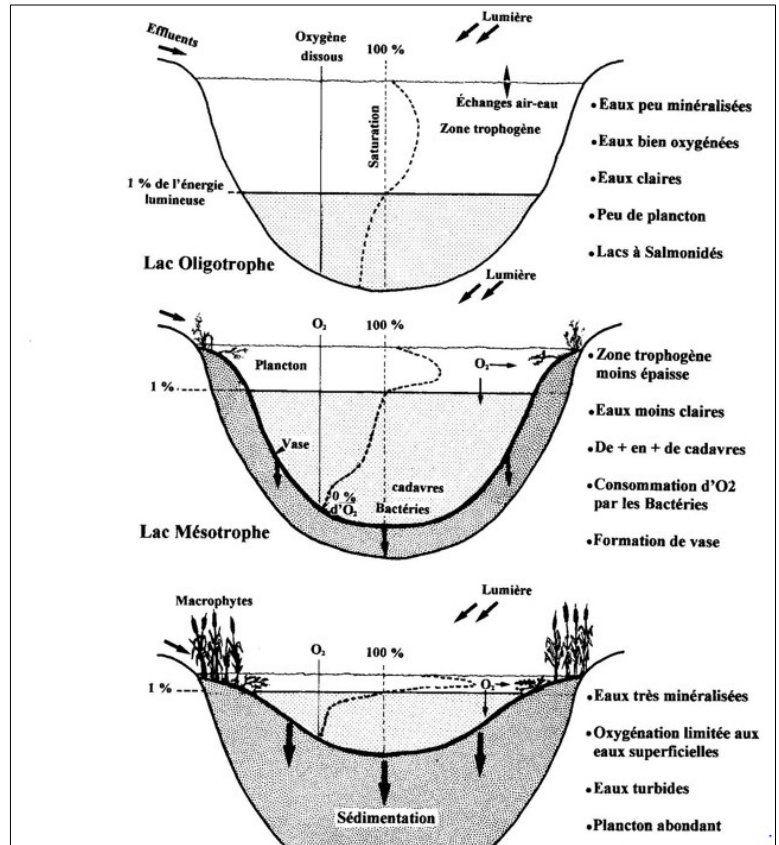
Document 28 : variations des flux de carbone en Gt/an entre les réservoirs dues aux activités anthropiques



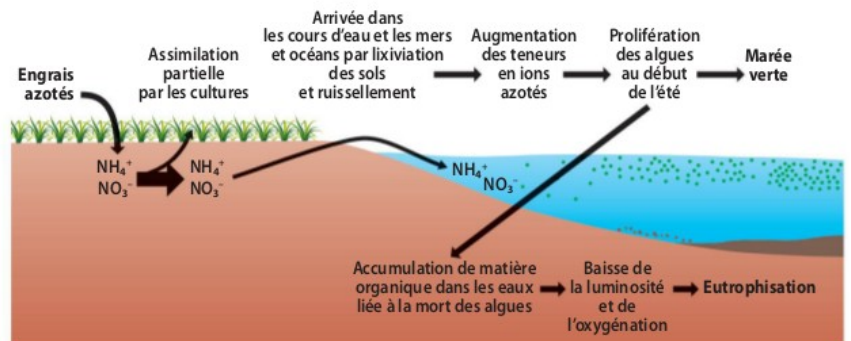
2. les activités humaines modifient le cycle de l'azote

Document 29 : exemple du mécanisme de l'eutrophisation d'un lac

□ Expliquer d'après ce document les mécanismes conduisant à l'eutrophisation d'un lac.



Document 30 : l'eutrophisation à l'origine des marées vertes



En Conclusion