TP BG-A Cycles du carbone et de l'azote

Rappel programme :
Cycle du carbone :
- 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.

Précisions et limites :
Les voies biochimiques de production et de dégradation du méthane ne sont pas au programme.

Cycle de l'azote
- Représenter schématiquement le cycle biogéochimique 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.

1.- Le cycle du carbone

1.1. Différentes formes du carbone

Formes minérales : CO_2, HCO_3^-, CO_3^{2-}, $CaCO_3$, CO [lien avec cours ST de sup à faire : roches calcaires], diamant (C).
Formes organiques : matière organique vivante, matière organique du sol (humus au sens très large), matière organique fossilisée (charbons, pétrole), méthane = gaz naturel (CH_4).
Lien avec la physique chimie : nombre d'oxydation du carbone, formes réduites, formes oxydées : rappel, on attribue la valeur -2 pour l'élément oxygène et +1 pour l'hydrogène, et la somme doit faire 0.

1.2. Caractérisation des principaux réservoirs de carbone.

A partir du **document 1**, caractériser les principaux réservoirs et les formes de carbone que l'on va trouver.

1.3. Deux exemples d'échanges :

a. Les échanges atmosphère vers biomasse et atmosphère + océan

Les échanges peuvent être regroupés suivant deux types de processus :
- Les échanges biologiques : photosynthèse, respiration, fermentation.
- Les échanges physicochimiques : combustion, dissolution, dégazage, altération.

Le flux désigne un échange d'un réservoir vers un autre.
On définit le temps de résidence comme étant le rapport entre l'abondance d'un élément dans un compartiment et **la moyenne** des flux entrant et sortant : $\tau = M / \Phi$.

Le flux préanthropique désigne le flux avant la révolution industrielle, que l'on oppose au flux actuel.
Calculer les temps de résidence passés et actuels à partir du **document 2**
Comparer vos valeurs calculées aux valeurs du **document 3.**

b. Les échanges océan, eaux de surface, eaux profondes.

Les courants ascendants = upwelling et les courants descendants = downwelling entre des échanges entre les eaux situées à la surface (sur une tranche d'environ 350 m d'épaisseur) et les eaux situées en profondeur. Dans l'eau, le CO_2 peut se trouver sous trois formes : CO_2 dissous (H_2CO_3), HCO_3^- et CO_3^{2-}.

Calculer le temps de résidence pour les échanges eaux de surface, eaux profondes

c. Lien sup : les calcaires, carbone emprisonné.

Pour rappel avec le cours de sup : réécrire l'équation de dissolution des carbonates.

1.4. Bilan : une représentation du cycle du carbone.

Faire une représentation du cycle du carbone. Mettre en relation le **document 4** avec le cycle du carbone.

2.- Le cycle de l'azote

2.1. Différentes formes de l'azote.

Azote sous forme ionique :

Principales formes minérales de l'azote :

NO_3^- = ion nitrate ;

NO_2^- = ion nitrite ;

NH_4^+ = ion ammonium (ammoniac NH_3)

Azote sous forme gazeuse :

N_2 = diazote atmosphérique (78 % de l'atmosphère)

NOx = oxydes d'azotes (monoxyde d'azote : NO ; dioxyde d'azote : NO_2), polluant atmosphérique produit principalement par les transports.

N_2O : protoxyde d'azote (gaz hilarant, neurotoxique)

Azote sous forme organique :

Dans les protéines

Dans l'humus

2.2. La fixation symbiotique du diazote.

Les nodosités sont une association symbiotique entre des cellules racinaires de Fabacées et des bactéries *Rhizobium*. *Rhizobium* est une protéobactérie hétérotrophe. Elle a une forme différente libre et symbiotique (= bactéroïde, voir TP Unicellulaire). Lorsqu'elle est symbiotique, elle possède une enzyme (qui n'est pas exprimée lorsqu'elle est libre) la **nitrogénase** qui est capable de catalyser plusieurs réactions chimiques :

$$N \equiv N + 8H^+ + 8e^- \longrightarrow 2NH_3 + H_2 \quad (1)$$

$$HC \equiv CH + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow C_2H_4 \quad (2)$$

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2 \quad (3)$$

Le complexe enzymatique nitrogénase est formé par deux sous-unités (composant II de poids moléculaire 60 kDa contenant du fer et du soufre, et un composant I (= di-nitrogénase) de 220 kDa, avec du fer et du molybdène).

La ferrédoxine est une protéine transporteuse d'électrons qui cède ses électrons au complexe nitrogénase lors de sa ré-oxydation. Elle pourra être régénérée en ferrédoxine réduite avec la ré-oxydation d'un transporteur réduit de type NADPH.

Le dioxygène est un inhibiteur de la nitrogénase. Dans une nodosité, la bactérie a besoin de dioxygène pour respirer mais les teneurs en dioxygène ne peuvent pas être élevées pour que la nitrogénase fonctionne. Les cellules végétales de la nodosité synthétisent un transporteur au dioxygène, la leghémoglobine.

TP : Observation et schémas de nodosités fraiches si disponibles

Observation et schémas de coupe d'une nodosité, **plus documents 5, 6 et complément 1**

2.3. D'autres réactions avec l'azote

Minéralisation de la matière organique en azote minéral par des bactéries et des champignons : $AA \rightarrow NH_4^+$

Les bactéries et les champignons du sol sont hétérotrophes pour le carbone, ils respirent à partir de la matière organique du sol qu'ils minéralisent.

Nitrification par des bactéries chimiolithotrophes

Première étape : Transformation NH_4^+ en NO_2^- par exemple par les bactéries Nitrosomonas

Deuxième étape : Transformation NO_2^- en NO_3^- par exemple par les bactéries Nitrobacter

Dénitrification par des bactéries hétérotrophes

Les bactéries dénitrifiantes ont été identifiées dans plus de 50 genres différents. On estime qu'elles représentent 10 à 15 % de la population de bactéries dans l'eau, le sol et les sédiments. Des espèces de *Pseudomonas, Alcaligenes, Bacillus* et autres, en font partie. Elles sont en générales des bactéries hétérotrophes aérobies facultatives.

La dénitrification se fait par différentes étapes : NO_3^- donne NO_2^-, puis NO_2^- donne NO (oxyde nitrique = monoxyde d'azote) puis N_2O (protoxyde d'azote) puis en N_2 (diazote).

Excrétion azotée des animaux :
Pour les Mammifères (et l'ensemble des animaux produisant de l'urée = **animaux uréotéliques**)
AA → urée : l'urée ou carbamide (DCI) est un composé organique de formule chimique $CO(NH_2)_2$. Il est produit par le foie lors du catabolisme des acides aminés et éliminé dans l'urine. L'urée est ensuite minéralisée par les bactéries et les champignons du sol en ammonium.

Les téléostéens d'eau douce sont **ammonotéliques** : élimination des déchets azotes sous forme d'ammoniac NH_3.

Les oiseaux et les insectes sont **uricotéliques**, ils évacuent de l'acide urique ($C_5H_4O_3N_4$) à l'état pseudo-cristallin, ce qui permet une économie d'eau.

Réduction des nitrates en ammonium par les végétaux et les champignons
Réduction des nitrates en nitrites :
La première étape, $NO_3^- \rightarrow NO_2^-$ est catalysée par une enzyme, la nitrate-réductase, qui est située dans le hyaloplasme, et cette réaction consomme du $NADH+H^+$ (qui est ré-oxydé en NAD^+).

Réduction des nitrites en ion ammonium :
La deuxième étape, $NO_2^- \rightarrow NH_4^+$ est catalysée par l'enzyme nitrite-réductase, qui est localisée dans les plastes, et nécessite un cofacteur réduit, la ferrédoxine, (qui est ré-oxydée).

Assimilation de l'azote minéral en azote organique
La voie GS GOGAT permet le passage azote minéral en azote organique (voir figure).

Elle utilise un acide aminé, le glutamate, et un acide organique pour produire deux glutamates (dont un est réinvesti).

Chez les champignons, il existe une autre voie : la voie utilisant l'enzyme GDH : glutamine déshydrogénase, souvent mitochondriale : NH_4^+ + α cétoglutarate NADH → glutamate + H_2O+ NAD^+.

Formation des autres acides aminés par trans-amination :
Les autres acides aminés sont formés à partir de l'acide glutamique par des enzymes spécifiques, les transaminases :
Acide organique 1 + AA 1 → un autre acide organique + un autre AA.
Il existe une vingtaine de transaminase.

2.4. Bilan : un cycle de l'azote.
A partir du **document 7**, identifier les principaux réservoirs et les principaux flux. Représenter un cycle de l'azote simplifié. A partir du **document 8**, discuter le devenir d'une fertilisation azoté dans un sol.

3.- Couplage entre cycle du carbone et cycle de l'azote
Les cycles du carbone et de l'azote sont interdépendants.

Le rapport C/N ou rapport massique carbone sur azote est un indicateur qui permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol.

Le rapport C/N est très élevé pour la matière végétale fraîche (50 à 150 pour la paille) et diminue tout au long de sa décomposition en se stabilisant autour de 10 à 30 suivant le type d'humus.

Mull : C/N allant de 8 à 15
Moder : C/N allant de 15 à 25
Mor : C/N > 25

A partir des documents 9 à 11 et du complément 2 : commenter la notion de couplage entre cycle de l'azote et du carbone.

	Taille des réservoirs en Gt de C (Giga tonnes de carbone = 10^9 t = 10^{15} g C) *[10^{15} = pétagramme = Pg]*	
	Valeur préanthropique	Valeur actuelle
Atmosphère	589	589 +240 = 829
Biomasse aérienne	650	650 – 30 = 620
Biomasse sol	1500	1500
Sédiments continents Dont charbons et pétroles	78 10^6 1940	78 10^6 1940 – 365 = 1575
Océans, eaux profondes (HCO_3^-, CO_3^{2-})	37 100	37 100 + 155 = 37 255
Eaux de surface	900	900

Document 1 : taille de quelques réservoirs de carbone sur Terre. Source : S. Kandasamy and B. Nagender Nath, 2016

	Flux en Gt par an (Pg an^{-1}).	
	Valeur préanthropique	Valeur actuelle
Atmosphère vers océan	60	80
Océan vers atmosphère	61,7	79,4
Respiration de tous les êtres vivants	107,2	118,8
Photosynthèse	108,9	123
Biomasse vers sédiments	faible	faible
Combustion des charbons et pétrole	négligeable	7,8
Déforestation	négligeable	1,1
Upwelling	101	101
Downwelling	103	103

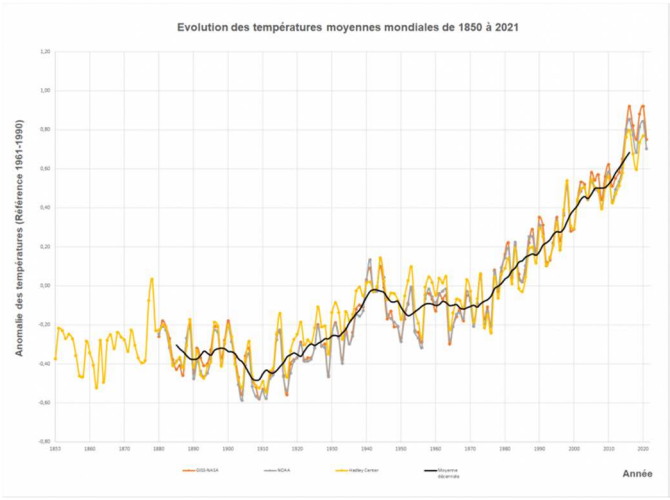
Document 2 : principaux flux. Source : S. Kandasamy and B. Nagender Nath, 2016

Réservoirs	Taille (Gt C)	Temps résidence (ans)
Atmosphère	750	4
Océan	38 000	430
Végétation	550	5
Sols (C_{org})	1 500	27
Sols (C_{min})	1 500	?
Croûte terrestre (C_{min})	120 10^6	325 10^8
Croûte terrestre (C_{org})	23 10^6	290 10^8
dont combustibles fossiles	4 000	600[a]

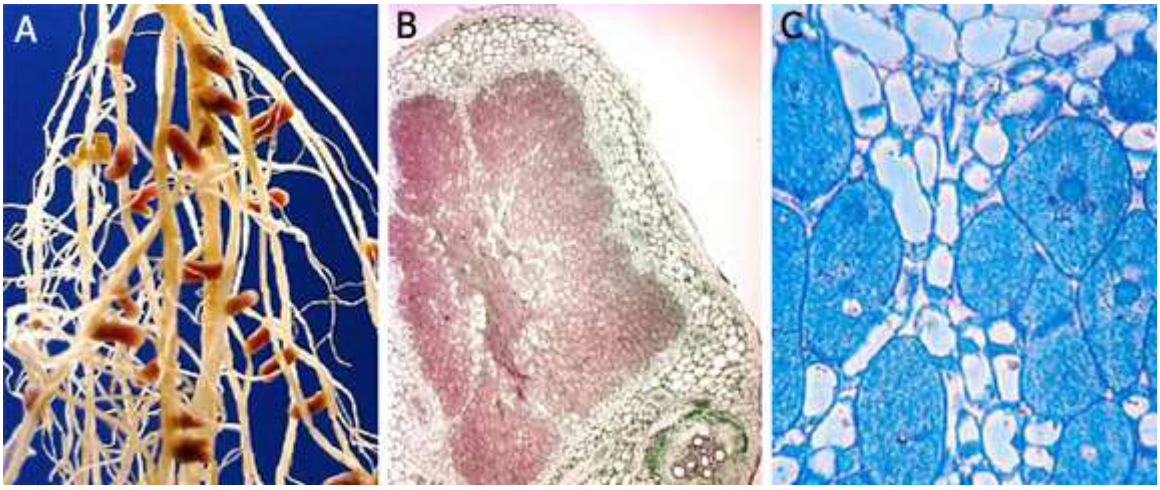
a. Les 600 ans donnés pour les combustibles fossiles correspondent à leur épuisement total en supposant une consommation se poursuivant au rythme actuel

Tableau 1.2. Temps de résidence du carbone dans ses principaux réservoirs

Document 3 : temps de résidence. Tableau 1.2 dans Baudin et al. Géologie de la matière organique. Vuibert. 2007.



Document 4 : évolution de la température moyenne sur Terre, augmentation actuelle de 1,25°C / 1850. Source : https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations#:~:text=1%2C25%20%C2%B0C%20L,)%20ex%2Daequo%20avec%202016.



Document 5 : Rhizobium A = vue racine avec nodosité, B = CT partielle d'une nodosité, C = détail tissu infecté. Nodosité de Fabacées. Source : http://www.plantes-botanique.org/

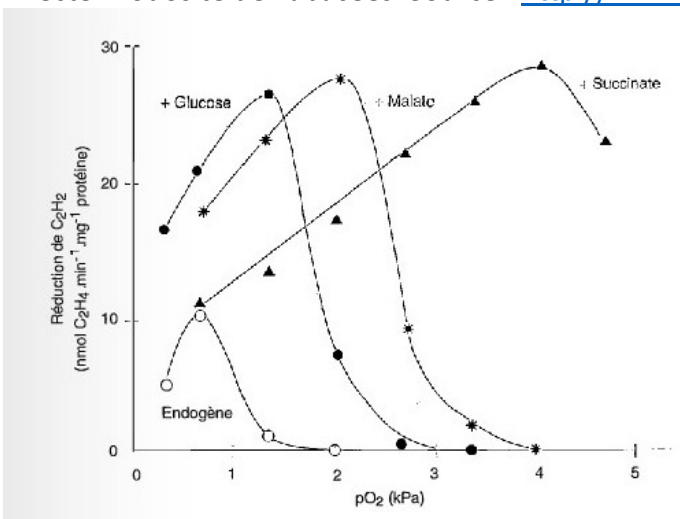


Figure 7.2 – Effet de la pO_2 sur la réduction de C_2H_2 par des bactéroïdes isolés de nodosités de féveroles, en présence de différents substrats carbonés.

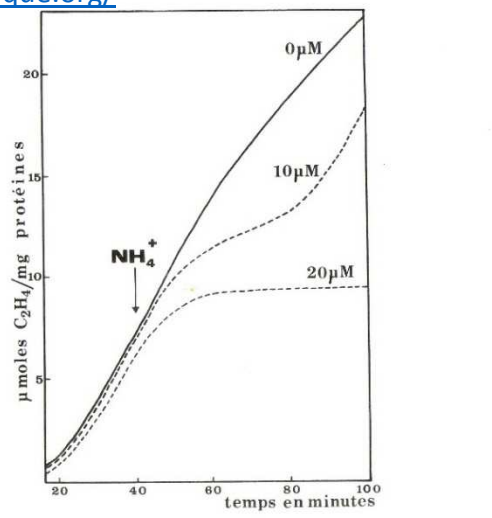
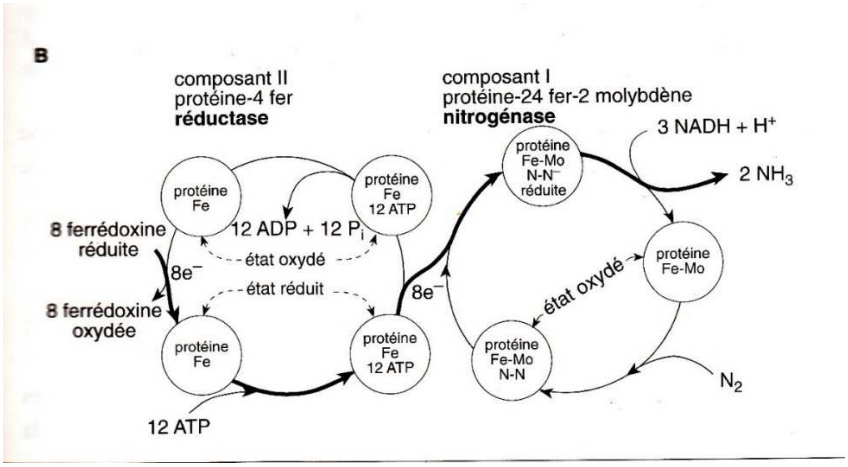


FIG. 3.12. – Inhibition de la fixation de l'azote par l'ammoniac chez *Rhodopseudomonas capsulata*. La flèche indique le moment de l'incorporation de NH_4^+ (sous forme de $(NH_4)_2SO_4$) dans les cultures aux concentrations de 10 ou 20 µmoles. La culture témoin est représentée en trait plein (d'après Meyer et coll., 1978).

Document 6 : fixation symbiotique du diazote
A gauche, dans Morot-Gaudry. L'assimilation de l'azote chez les plantes. 1997.
A droite : dans Blondeau. Fixation biologique de l'azote atmosphérique. Vuibert. 1980.



Complément 1 : réduction du diazote. Dans Laval-Martin. Physiologie végétale ; Tome 1. Hermann. 1995.

	Quantité d'azote en millions de t	Flux annuel en millions de t par an
Biosphère aérienne terrestre	11 000	
Sol	100 000	
Atmosphère	$3{,}9\ 10^9$	
Fixation biologique sur terre		140
Dénitrification sur terre		130
Recyclage litière		1200
Engrais et autres activités humaines		90
Fixation électrochimique		10
Lessivage vers les océans		36
Océan	$22\ 10^9$	
Recyclage dans l'océan		6000
Sédiments	$0{,}5\ 10^9$	
Enfouissement dans les océans		10
Dénitrification à partir des océans		110
Fixation biologique dans l'océan		30

Document 7 : quelques données sur le cycle de l'azote. Source : encyclopédia universalis. Les tailles des réservoirs (dans les ellipses) et les flux annuels (flèches) sont exprimés en millions de tonne d'azote.

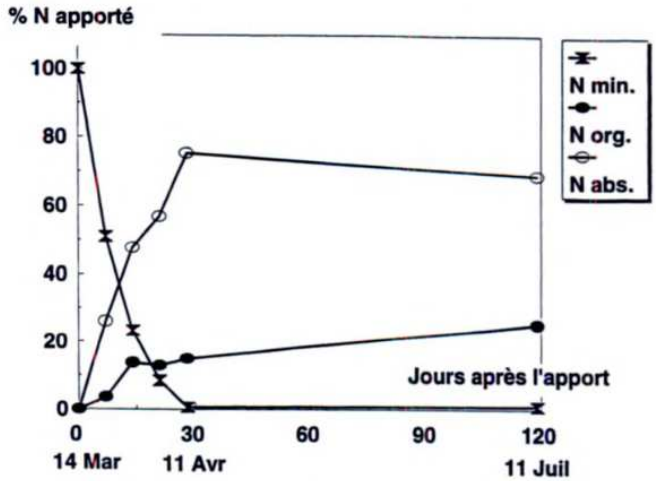
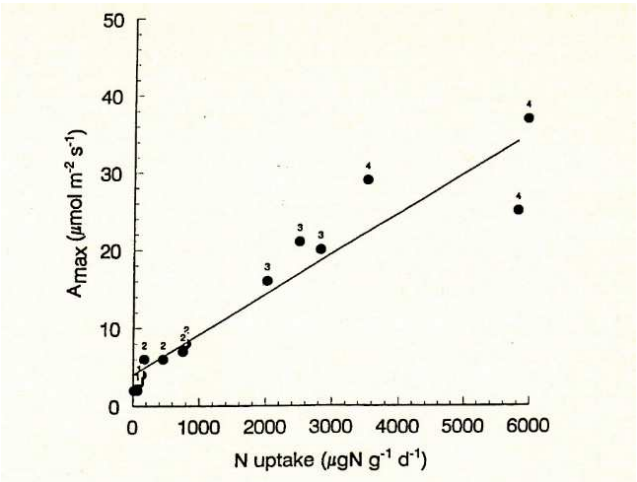


Figure 2. Evolution au cours du temps de l'azote de l'engrais apporté sur culture de colza d'hiver. N sous forme minérale et organique dans le sol, absorbé par la culture. Apport de 140 kg N/ha le 14 Mars 1995 sous forme de solution azotée.Essai ^{15}N du Rafidin en sol de craie, 1995 (INRA-ADEME-CETIOM).

N min : Azote sous forme minérale dans le sol ; N org : azote sous forme organique dans le sol ; N abs : azote absorbé par les plante

Document 8 : devenir de l'azote apporté sous forme d'engrais. D'après Nicolardot 1997.



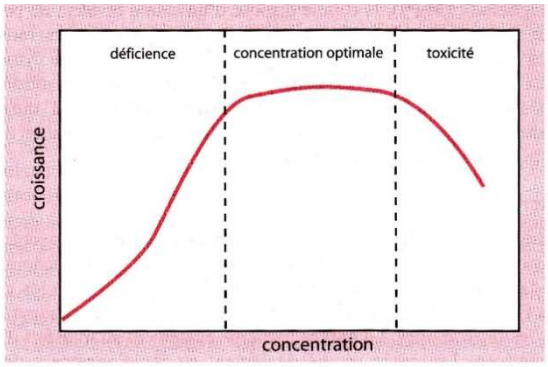
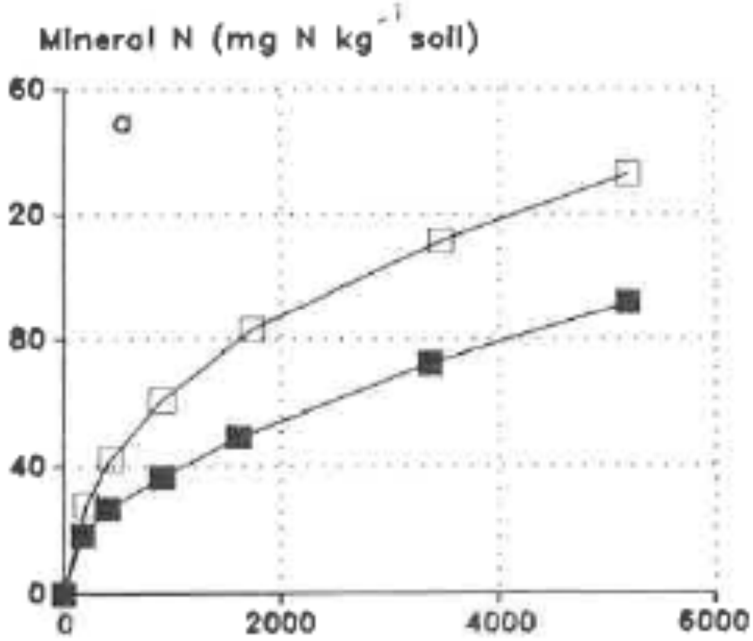


Figure 2.1 – **Influence de la concentration en élément minéral nutritif sur la croissance d'une plante.**

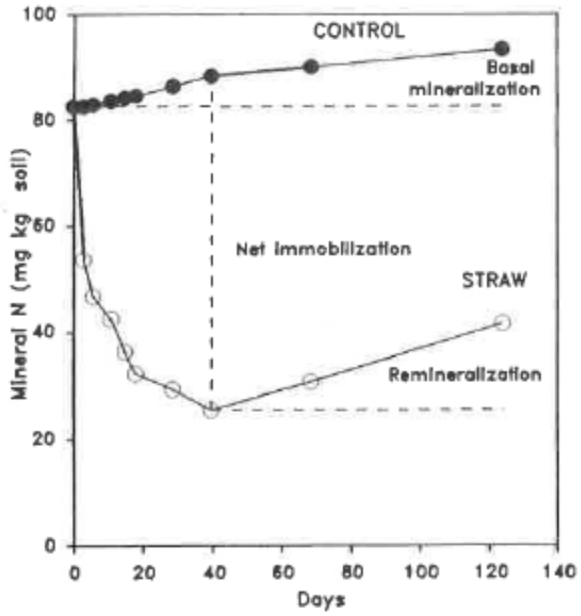
Document 9 : relation entre cycle de l'azote et cycle du carbone

À gauche : prélèvement de l'azote et photosynthèse par différents végétaux.

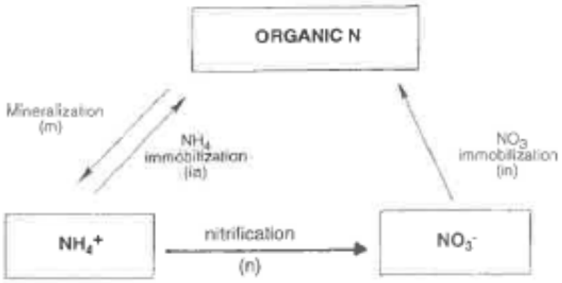
N uptake = vitesse d'absorption de l'azote, A max = vitesse maximale de photosynthèse en condition optimale de lumière, t° et eau. 1 = Vaccinium vitis-idae, Calluna vulgaris, Rhododendron ponticum : mycorhizes types éricoïdes ;2 = Betula pendula, Fagus sylvatica, Quercus robur : ectomycorhizes ; 3 = Potentilla reptans, Verbena officinalis, Eupatorium cannabinum : mycorhizes vésiculaires ; 4 = Senecio vulgaris, Lolium perenne, Triticum aestivum : sans mycorhizes. ; Dans Leclerc et al. Ecophysiologie végétale. 1999. Publication Université de Saint Etienne. **À droite :** effet de la dose d'azote sur la croissance. Dans Morot-Gaudry et al. Biologie végétale nutrition et métabolisme. Dunod ; 2009.



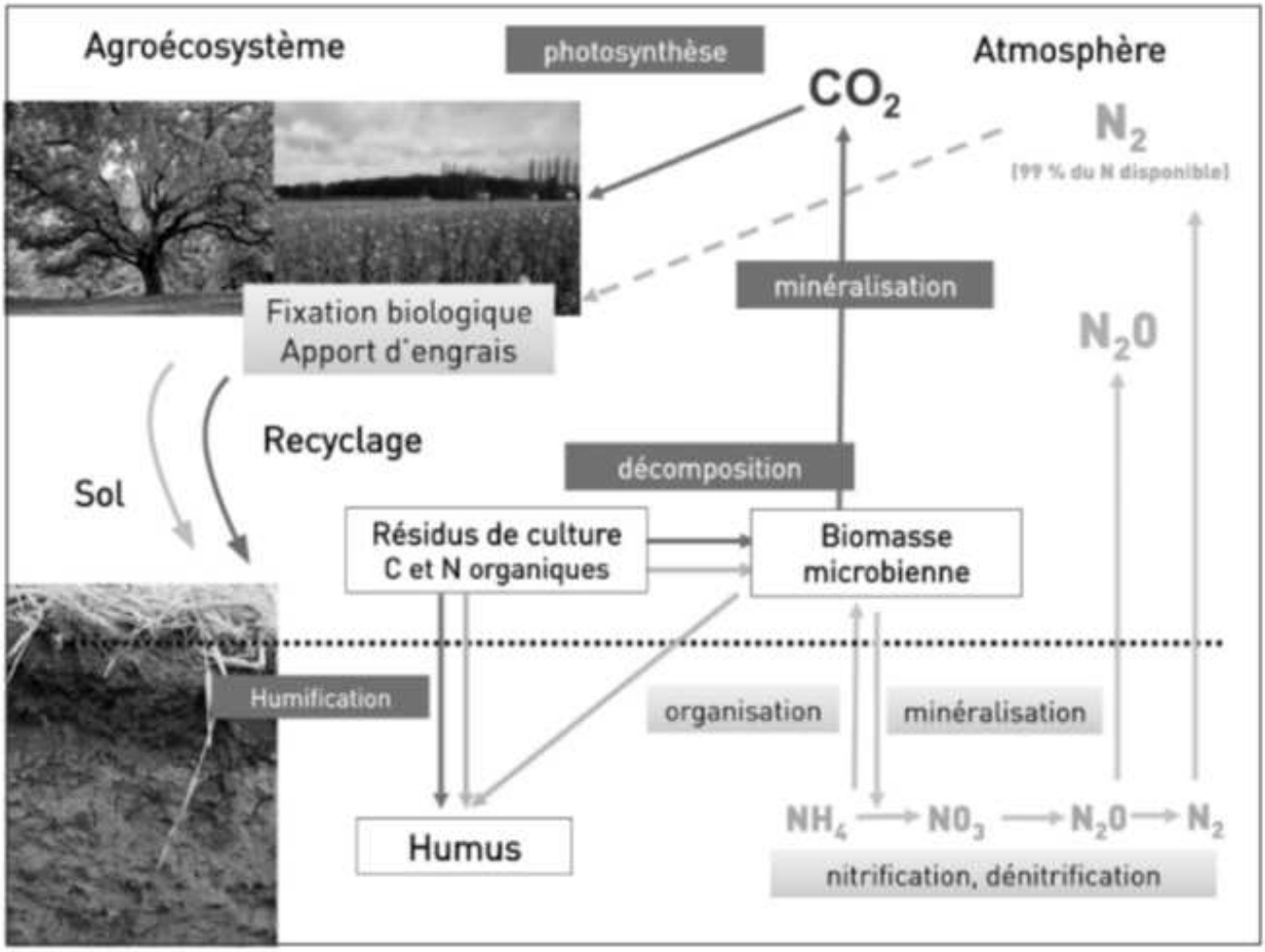
Document 10 : cinétique de minéralisation de l'azote mesurée par la quantité d'azote minéral (mg N par kg de sol) en fonction du temps (ici, mesuré par un temps « thermique : °C.jours). Carrées vides : sol en présence de résidus de betterave, carrées pleins : sol sans ajout de résidus de betteraves. Source : B. Mary et S. Recous, 1994.



Paille C/N = 100
Humus C/N = 9
Biomasse microbienne C/N = 8



Document 11 : quantité d'azote minéral dans un sol après ajout de paille (straw) ou non (control). Source : B. Mary et S. Recous, 1994.



Complément 2 : carbone, azote et interdépendance des cycles. Source : J.F. Briat et D. Job, Les sols et la vie souterraine, des enjeux majeurs en agroécologie. Edition Quae.