

Chapitre III : Cycle de la matière

III.1. Circulation de la matière dans les écosystèmes

Bien que le cycle de carbone et le cycle des éléments minéraux soient souvent considérés comme deux problèmes majeurs, leurs études va de pair en effet la connaissance du cycle minéral nécessite au préalable l'étude de l'évolution de la matière organique à travers l'écosystème car cette dernière est un agent essentiel de la circulation des éléments biogènes **RAPP, 1971**.

III.1. 1. Définition : L'étude des communautés qui s'intéressent aux interactions entre organismes (effets de la compétition/prédation, mécanismes de coexistence des espèces, etc.) et supposent que les propriétés des écosystèmes découlent de ces interactions.

III.1. 2. Model général

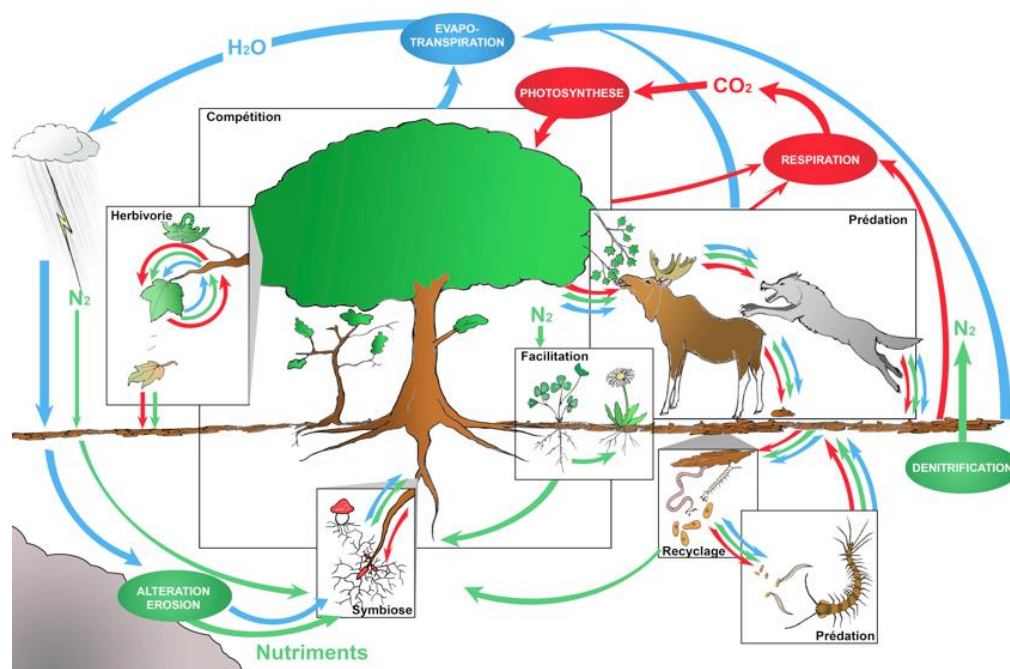


Figure 4 Schéma général du Cycle de la matière dans l'écosystème

En écologie les écosystèmes intègrent d'une façon plus globale les flux de **matière** et **d'énergie** dans les écosystèmes (stockage du carbone dans les forêts, recyclage de l'azote, etc.) et considèrent quant à eux que c'est les caractéristiques **physico/chimique** de l'environnement qui structure les écosystèmes et régulent leur fonctionnement. Les végétaux autotrophes possèdent la faculté de

constituer à partir de l'énergie solaire, gaz carbonique de l'atmosphère, de l'eau et des éléments minéraux du sol leurs propre matière organique ; la répartition de cette matière organique et son transfert dans l'écosystème constitue ce qu'on appelle le cycle de carbone ou cycle de matière organique selon qu'on adopte l'approche énergétique ou l'approche quantitative pondérable.

Exemple : dans les formations basses on étudie le cycle de carbone et dans le cas des formations forestières on étudie le cycle de la matière organique et ceci en raison des difficultés méthodologiques liées au matériel d'étude.

Ce cycle peut être décrit comme suit :

*Le point de départ est représenté par la végétation où s'effectue l'assimilation (carbone, éléments minéraux) qui serviront à la synthèse des substances nouvelles, leurs transports et leurs répartition à travers l'organisme dans les organes de croissance, à cette phase de production succèdent une série d'étapes cataboliques à cause des séquences des organes corporels et leurs retour au sol formant la litière, après une période plus au moins longue sera transformée et décomposée par la microflore et la faune du sol, elle formera aussi des molécules organiques stables des acides humiques ou bien elle libèrera des éléments minéraux qui seront remis au végétaux donc c'est la minéralisation

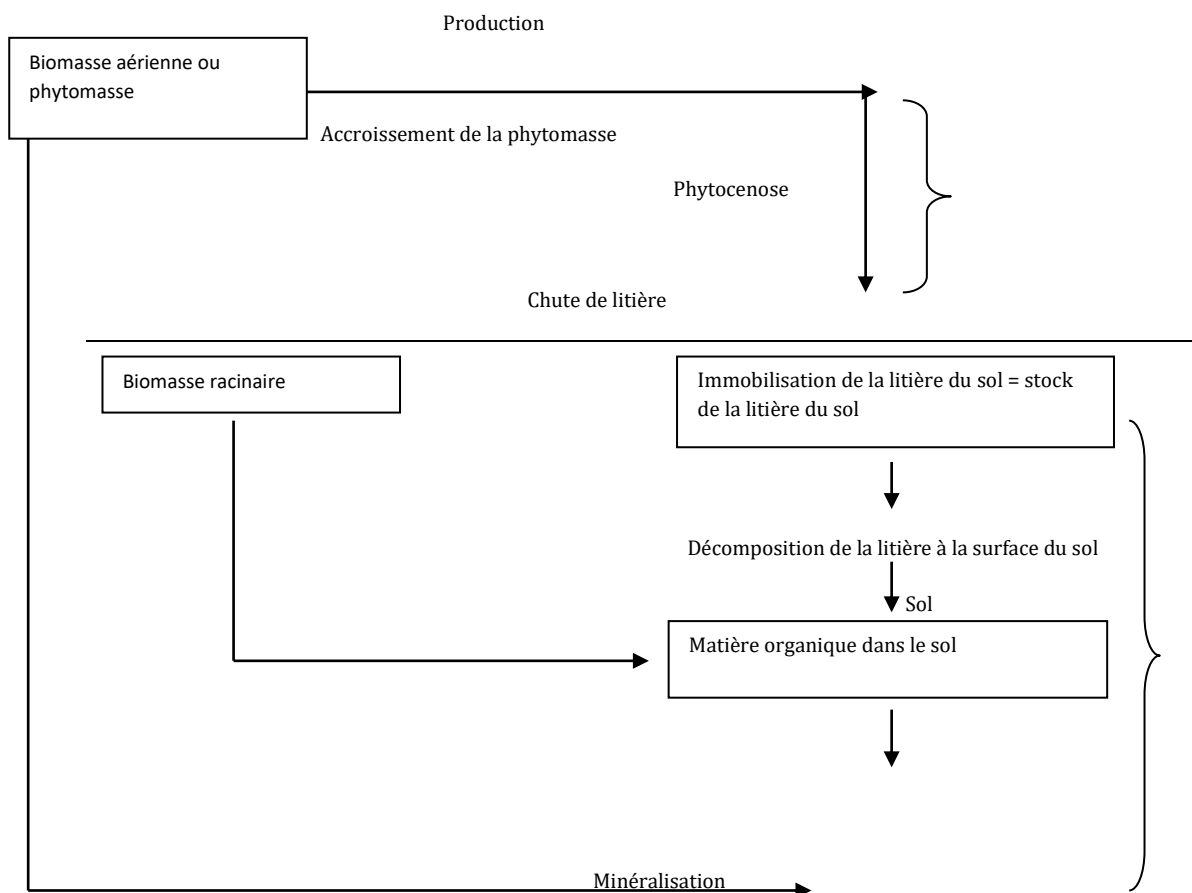


Figure 5 Cycle de la matière organique dans un écosystème forestier

Les compartiments sont représentés par la biomasse aérienne ou phytocenose

Le stock de la matière organique dans le sol

Le flux représente le transfert de la matière organique d'un compartiment à un autre

a- Le 1^{er} flux : interne au premier compartiment et porte sur l'accroissement de la phytomasse.

b- Le 2^{eme} flux situé entre la phytocenose et le sol, concerne les retombées de litière

c- Le 3^{eme} transfert succède directement et représente la décomposition de la litière à la surface du sol.

III.2. Les grands types de cycles biogéochimiques et leurs perturbations

III.2.1. Le cycle de l'eau

L'eau conditionne l'existence des êtres vivants. La connaissance de sa répartition et de son évolution dans un écosystème donné est d'une importance primordiale (bilan hydrique). L'importance de l'étude du cycle de l'eau est plus marquée dans la région méditerranéenne et dans les zones arides et semi-arides où l'eau constitue un facteur limitant aussi bien pour le développement du tapis végétal que pour les activités humaines. Cependant peu de travaux ont été réalisés sur ce sujet dans la région méditerranéenne.

L'influence de la couverture végétale sur le cycle de l'eau est très importante (la réciproque est également vraie).

* par les différentes phases

* les processus physiologiques qui influent sur le cycle de l'eau

* les bilans

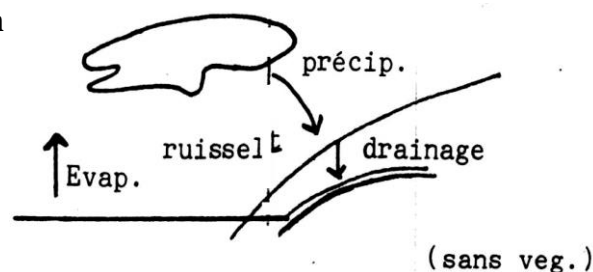
*influences de certains facteurs sur le bilan de l'eau

1- Généralités

C'est le constituant le plus abondant des êtres vivants, 60 % du poids de l'Homme., 95 % du poids des végétaux, les graminées des prairies en contiennent jusqu'à 79 %.

Les grands mots de l'eau sont bien connus

Evaporation



Précipitation

Au sein des écosystèmes les phases qui se succèdent peuvent être classées comme suit : Interception, pénétration, évapotranspiration, infiltration, ruissellement, drainage

La végétation a un rôle d'écran interceptant et évaporant une partie de l'eau dans l'atmosphère.

L'eau qui traverse le feuillage passe par les étapes suivantes : * pluviollessivage, *égouttement,*écoulement.

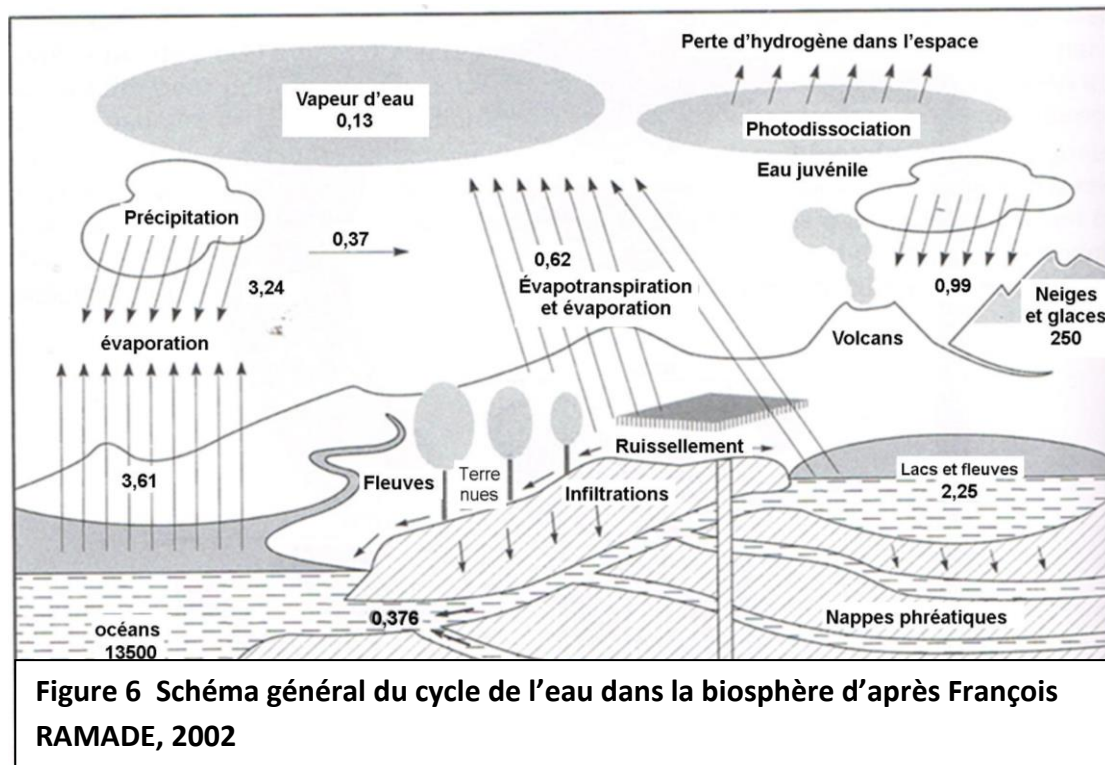
Dans un écosystème forestier la couverture arborescente joue un rôle très important sur le cycle de l'eau :

*eau interceptée par les cimes, *égouttement, *écoulement

Quantité totale de l'eau sur terre : 1 400 millions de km³. 97,2% dans les océans dont le renouvellement se fait en 2 800 ans.

Sur les continents, les eaux souterraines sont la plus importante humidité du sol : 65 000 km² nappes 8 M km³

La consommation d'eau augmente, elle est de l'ordre de 1/50^e des ressources disponibles. Elle varie avec le degré de développement, problème de pollution, et de l'Homme utilise de plus en plus l'eau douce des continents et la rejette à la mer.



Pendant la période de pluie l'eau arrive au niveau du sol une partie part par drainage et ruissellement. **PENMAN, 1970**

Le surplus de l'eau nécessaire à l'alimentation du sol part en drainage profond.

Le bilan d'eau peut s'exprimer par la relation suivante.

Les pertes ou les gains par ruissellement

$$P + p \pm R = ET + D \pm \Delta_s$$

P : Précipitation en mm, **p** : apports II aires rosée, **R** : ruissellement, **ET** : évapotranspiration, **D** : Drainage, Δ_s : variation. des réserves en eau du sol

Réserve en eau du sol :

$$S = P + p (I + R + ET + D) + N$$

$$\uparrow \text{Interception} = P - (E_c + E_g)$$

S : Réserve en eau du sol, **D** : Drainage, **I** : Interception, **Eg** : égouttement, **Ec** : écoulement, **N** : apport par la nappe, **R** : ruissellement

2- Les différents états de l'eau dans le sol

La source précipitation, l'eau de ruissellement superficiel et hypodermique (horizon supérieur), l'eau de gravité entraînée par la pesanteur circule dans les pores grossiers appelé le drainage

L'eau de retenue occupe les pores moyens et fins < 10 μm environ.

Les forces capillaires et d'absorption sont suffisamment élevées pour s'opposer aux forces de gravité le sol retient l'eau avec énergie variable pour une quantité d'eau déterminée la force de succion est cette force de succion exprimée en cm d'eau = pF Exemple pF 1,8 pour les sables et 4,2 argiles

Capacité au champ (c) c'est la capacité maximale d'eau retenue par le sol par les capillaires ex : mesure pluie plus ressuyage de 3 jours

Point de flétrissement (f) c'est la valeur limite de l'eau liée (non absorbable par les racines - mesure - presse au niveau des membranes

eau utile quantité d'eau stockée par le sol

3- L'absorption de l'eau par la plante

3.1- absorption racinaire

Les poils absorbants sont abondants surtout chez les plantes herbacées et plus rares chez les arbres où des mycorhizes interviennent souvent.

C'est la succion ou "déficit dépression de diffusion" DPD qui intervient.

S : pression de succion

$$S = TL - T$$

TL : osmotique

T : de turgescence

3.2- Absorption de l'eau atmosphérique

Cette absorption est surtout importante dans les régions où les brouillards sont fréquents. Cette quantité d'eau peut constituer l'appoint nécessaire pour permettre la subsistance de certaines plantes surtout dans les régions arides.

4- Transpiration

4.1- Transpiration stomatique

L'ouverture des stomates est fonction des conditions hydriques du milieu.

4.2- Transpiration articulaire

C'est un mouvement mécanique, des parois des cellules qui s'élargie ou rétrécit le diamètre de l'ostiole ce mouvement est dû au variation de turgescence des cellules stomatiques.

Une forte turgescence de ces cellules entraîne la déformation des parois fines et élastiques opposées aux parois épaisses et cutnisées, les pressions qui s'exercent alors sur ces parois rigides les écartent les uns des autres.

Lorsque les stomates sont fermés, elle varie considérablement d'une espèce à l'autre

0,36 mg/g/mn Bouleau ou hêtre

0,60 mg/g/mn Chêne rouvre

0,96 mg/g/mn Pin sylvestre

Les tiges, les troncs et les bourgeons et fleurs transpirent également.

4.3- Mesures de la transpiration

Permet la montée de la sève par l'appel foliaire, facilite l'absorption racinaire toujours par l'appel foliaire et assure le refroidissement de la plante :

1g H₂O évaporée nécessite 537cal

La transpiration peut être nuisible à la plante, en milieu sec et très chaud les systèmes de régulations ne sont pas suffisants et le départ de l'eau conduit au flétrissement et parfois à la mort.

*pesée - après avoir coupé

*cloche + absorbant

*pesée de l'eau perdue par le potomètre

4.4- Valeurs

100 à 500 mg/h/dm² de surface foliaire.

5) Bilan et dynamique de l'eau dans l'écosystème forestier

5.1- Apport d'eau atmosphérique

Les plantes d'une forêt sont conditionnées par les réserves en eau du sol qui dépendent de la pluviosité (on devrait tenir compte aussi des apports sec. (rosée brouillard). En prenant uniquement la pluie. **SAVOIE, 1988.**

$$P_i = E_g + E_c + I_n$$

P_i : Pluie incidente.

E_g : Egouttement

E_c : Ecoulement

I_n : interception nette et $I_n = P_i - (P_s + P_t)$ **P_s** : précipitation au sol

P_t : précipitation le long du tronc

a- les pluies incidentes

La pluie incidente mesurée par des pluviomètres on utilise aussi des pluviographes, certains auteurs trouvent la différence au niveau des sites de l'emplacement des pluviomètres.

*Exemple au niveau d'un écosystème forestier on utilise des pluviomètres perchés situés au niveau des couronnes des arbres on enregistre les valeurs suivantes : 94 - 95% dans ce cas on arrive à une sur estimation de l'égouttement de 8 à 10%.

*évaluation par des pluviomètres sur sol nu, et selon les différents types du couvert végétal soit en hauteur dont les quantités d'eau dépendent des perturbations aérodynamiques.

b- Pluiolessivage :

La quantité d'eau qui atteint le sol et qui dépend de la densité et de la nature du couvert végétal.

* **Interception**: c'est l'eau retenue par le couvert végétal, après un certain temps l'eau retenue est évaporée à l'exception d'une toute petite quantité qui peut être absorbée au niveau des organes végétaux aériens. Cette proportion dépend de l'intensité de la fréquence et de la durée des chutes de pluie autant que de la structure de la végétation.

*Pour une valeur maximale de 5 mm/j → 25 mm de pluie interceptée

*pour des averses de 2,5 mm → 55 % d'interception entre 5 à 12 mm représente → 25 % d'interception et plus de 40 mm → 10 % d'interception

***L'écoulement :**

L'écoulement traverse les troncs pour arriver au niveau pieds des arbres. La mesure de l'écoulement se fait par des collecteurs posés sur quelques arbres puis on procède au rapport au total. La variation enregistrée dépend de l'angle d'insertion des branches, de l'écorce des arbres (lisse ou rugueux).

AUSSENAC, 1975 a montré que le phénomène est corrélé à la distribution des racines des espèces à grande écoulement, les racines ramifiées et dense autour des troncs.

***L'égouttement :**

La disposition des pluviomètres moins faible de capacité, l'eau d'égouttement passe à travers le feuillage est étudié selon les surfaces réceptrices. Les pluviomètres placés selon un réseau géométrique ce dispositif est complété par un autre dispositif appelé : pluviomètre auge. L'écoulement et égouttement ne sont pas immédiats.

Ils sont d'autant plus élevés que rugosité et porosité sont élevés. L'interception est fonction de l'espacement et de la disposition des plantes, de la hauteur et de la structure. La litière et l'humus retiennent des quantités d'eau variable.

Sur le plan dendrométrique l'écoulement varié selon les différentes surfaces totale de la station, de la surface terrière et de la hauteur d'eau

Souvent on place 10 pluviomètres en raison de l'hétérogénéité, méthode au hasard

*interception moyenne annuelle	17 à 60 % sous peuplements, forestiers
	17 à 24 % sous feuillus
	31 % sous chêne vert.

6) Dynamique de l'eau dans le sol

6.1 - Ruissellement et infiltration

Une fraction de l'eau qui arrive au sol peut ruisseler (la plus grande partie s'infiltrer). Le ruissellement peut être considéré comme l'excédent d'eau par rapport à l'infiltration du fait qu'il commence lorsque le taux de précipitation dépasse le taux d'infiltration lorsqu'il n'y a plus possibilité d'emménagement local.

Pour connaître les possibilités de ruissellement à la surface du sol on calcule l'intensité des pluies les plus fortes qu'on compare aux possibilités de perméabilité du sol en connaissant la porosité du sol :

$$P = \frac{D - D'}{D \times 100}$$

P porosité du sol

D densité apparente du sol et **D'** densité réelle.

Le ruissellement augmente avec l'intensité ces précipitations et la perméabilité du sol.

L'infiltration dépend de la capacité d'absorption des couches superficielles.

*Pour les sols cultivés 78 mm/h

*Pour les sols naturels 36 mm/h

6.2 - drainage :

Lorsque les propriétés du sol sont favorables, une partie de l'eau infiltrée peut percoler par gravité à travers les horizons exploités par les racines : c'est l'eau de drainage si l'eau s'accumule : nappes perchées qui peuvent se déplacer latéralement.

Les mesures par la méthode en cases lysimétriques pour les différents types de sols utilisés

Comme exemple : sous une pluviosité de 350 mm sol nu 12% en sol lourd, et sol équilibré 22% et sous paillés 33% et 32%.

Il est connu que le mouvement de l'eau devient très lent quand la teneur en eau d'un sol atteint la capacité au champ on considère que cette dernière est la limite supérieure de l'H₂O mise en réserve au sol et utilisé par les végétaux.

le sol couvert de végétation offre une quantité importante d'eau à la disposition des plantes ; quand la capacité au champ est atteinte le drainage devient faible.

$$D = \gamma P^3$$

P : pluviosité

D : drainage

$$\gamma = (1/0,15t) - 0,13$$

6.3 - réserve en eau utile

Caractéristique d'un sol : La réserve en eau utile arrive à son maximum cela veut dire que le taux d'humidité à la capacité de rétention au champ, donnée par point de flétrissement : pF 2,5 à 3, pF 4,2. **IBRAHIM, et al, 1982**

7) L'évapotranspiration

Phénomène naturel très important, ce paramètre est considéré le plus délicat à estimer dans un écosystème. C'est la somme de la transpiration par les plantes, ETR réelle ETP potentiellement quand le sol est bien approvisionné en eau.

7.1 - ETP :

La notion d'ETP a été introduite en 1948 par THORNTHWAITE c'est le premier phénomène qui occupe une place importante dans le cycle de l'eau l'ETP est

influencé par les facteurs climatiques (H%, vent,) et aussi la d'eau disponible au végétal selon la fréquence de la recharge \longrightarrow ETP \longrightarrow ET \longrightarrow ET max

L'ETP représente la perte d'eau d'un couvert végétal dense et en alimentation en eau continue la perte en eau dépend des conditions climatiques (non par le sol).

ETP peut être traité par deux concepts :

a- Concept THORNTHWAITE où l'ETP correspond à la limite vers laquelle tend l'évapotranspiration d'un couvert végétal qui ne souffre d'une aucune restriction d'eau.

b- Concept de PENMAN L'ETP correspond au pouvoir évaporant actuel de l'environnement atmosphérique exprimé en termes d'énergie. Dans ce cas la contrainte est **énergétique**

Elle correspond à la perte d'eau globale en phase gazeuse de la transpiration cuticulaire et stomatique du végétal et l'évaporation du sol.

c- Méthodes analytiques, méthodes empiriques à partir de facteurs climatiques

TURC donne la formule suivante : $ETP \text{ (mm/mois)} = 0,40 \frac{t}{E + 10} (I_g + 50)$

0,40% (exception faite pour le mois de fév. 0,37), t variation moyenne mensuelle de l'air sous abri.

Ig radiation globale d'origine solaire, directe et diffusée en (cal./cm²/j.)

$$I_g = I_g A (0,18 + 0,62 \quad h/H)$$

IgA : l'énergie de la radiation qui atteindrait le sol si l'atmosphère n'existait pas (mêmes unités que Ig), **h** : durée d'insolation en heures, **H** : durées atmosphériques des j. exprimée en heures.

La valeur maximale est enregistrée en juillet, et la valeur minimale en décembre et janvier. En période chaude l'ET dépasse 35 mm/mois cas de la Steppe : 70 mm/mois

L'ETP caractérise un sol bien pourvu en eau, quand les réserves la plante réduit sa consommation. L'ETP est alors < à l'ETP potentielle c'est l'ETP réelle.

7.2 - l'ETR C'est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration cuticulaire et stomatique d'une culture ou d'un peuplement naturel s'alimentant avec la réserve hydrique du sol et des précipitations. Turc estime l'ETR à partir de l'ETP, les méthodes de mesures sont nombreuses : *Estimation de ETR par les cases lysimétriques, *Evapotranspiromètre pesable, *Estimation de ETR par l'analyse de la fluctuation quotidienne de la nappe par les appareils :

Limnigrammes exprimé par la relation

S : surface de la nappe

ETR=mS

m : porosité du drainage

*Estimation de l'ETR par la formule du bilan hydrique :

*Méthode de Mc GOYAN utilisation de la teneur de l'eau en fonction du temps

*Estimation $ETR = 0,9 ETP$

$$ETR = P + R - s$$

$\Delta s = \sum \text{entrées} - \sum \text{sorties}$
--

P : pluies totale mensuelle

R : réserve en eau utile du sol

s : Déficit du sol en eau évaporable au début du mois.

Pratiquement, si l'apport d'eau atmosphérique est suffisant pour maintenir le profil à la capacité de rétention au champ, c'est l'ETP qui représente le phénomène actif d'évapotranspiration.

Dans le cas d'un déficit en eau, au contraire, l'ETR prend le relais et représente l'évapotranspiration véritable.

Selon **TURC, 1961**, dans le premier cas l'ETP est situé entre le mois de novembre et le mois d'avril, et dans le 2^e cas (ETR) est positionné dans la saison sèche et chaude.

AUSSENAC, 1970, l'ETR des peuplements forestiers est élevé avec l'âge jusqu'à un maximum qui varie suivant l'espèce et le biotope jusqu'à l'âge de 80 ans. Cette évolution est liée au développement des racines et des feuilles.

Remarque : plusieurs formules interviennent dans l'évaluation d'ETP et ETR, le choix dépend de la précision à chercher, possibilité de son application et la disponibilité des équipements.

8) Influence de quelques facteurs sur certaines composantes du bilan de l'eau :

* précipitations incidentes journalières,

*intensité des précipitations (plus l'intensité est élevée plus l'égouttement est élevé.

*Plus le vent est plus fort plus la variation l'égouttement est important.

*température

* pouvoir évaporant de l'air

*L'influence de la végétation se résume comme suit par la biomasse, la surface foliaire et la morphologie des plantes, le couvert végétal, la position des troncs des espèces, densité et l'âge.

Les variations de l'égouttement : l'égouttement augmente quand on s'éloigne du tronc.

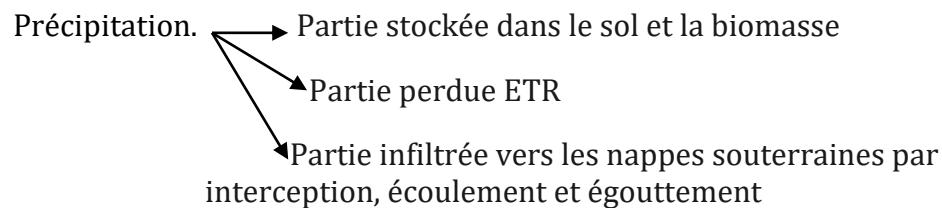
Les variations de l'écoulement augmente avec l'importance des précipitations incidentes, influence de la grosseur du tronc, il est important chez les résineux que chez les feuillus et fort en hiver qu'en été.

Le nombre des tiges (densité) : plus la densité est élevé plus les variations de l'écoulement est important

c) variations de l'interception : elle varie avec l'importance des précipitations incidentes importante chez les feuillus la différence entre été et hiver est de l'ordre de 5 %.

*importance des processus physiologiques et de la composition du tapis végétal

*Le couvert forestier permet une redistribution des précipitations incidentes.



Certaines espèces sont mieux adaptées aux économies d'eau, en région méditerranéenne la perte par ETP dépasse les précipitations annuelles (période de déficit en eau).

*L'eau transporte les éléments minéraux solubles (nitrates...)

*éléments d'eutrophisation et de pollutions liées à l'eau.

III.2.2 Les types gazeux

III.2.2.1. LE CYCLE DE L'AZOTE

L'azote est un constituant majeur des végétaux il intervient dans la formule des acides aminés, dans toutes les protéines végétales ainsi dans divers bases puriques, pyrimidines et coenzymes. Dans l'atmosphère on rencontre une très grande quantité de l'azote soit un taux de 80%, mais les végétaux ne peuvent pas se bénéficier de cet azote à l'état gazeux. Par exception on a une seule famille celle des Fabaceae qui se nourrit directement de l'azote atmosphérique les autres végétaux se nourrissent des formes combinées de l'azote. **CLARK F. et ROSSWALL1979**, Le cycle de l'azote se distingue de celui des autres éléments par l'origine atmosphérique des apports et la diversité de ses formes chimiques.

*dans l'atmosphère l'azote N_2 apporté au sol est sous forme organique, la végétation assimile de l'azote minéral ($NH_4 + NO_3^-$)

*De nombreux organismes interviennent

*Ce cycle est à la fois complexe et parfait

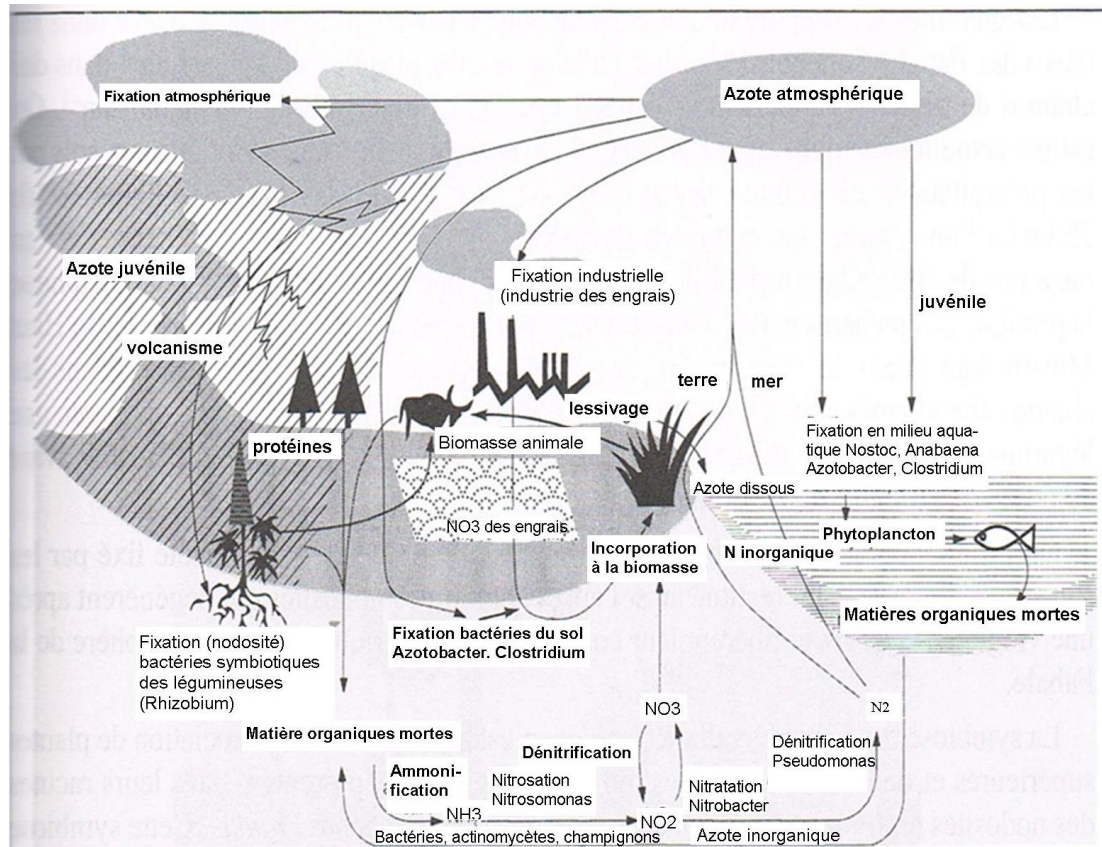


Figure : 7 Schéma du cycle de l'azote d'après RAMADE, 2009

A - Caractéristiques du cycle de l'azote

1- La vitesse de recyclage

Elle est très importante car elle conditionne la disponibilité pour les organismes.

Il est important de connaître les variations en fonction des facteurs écologiques.

2- Le cycle de l'azote est très lié à celui du carbone

RAMADE, 2009 : L'azote est associé au carbone dans toutes les substances protéiques. Cependant il existe des différences avec le cycle du carbone. L'atmosphère est riche en azote et pauvre en CO_2 mais l'azote ne peut être utilisé que par un nombre restreint d'organismes. L'intervention des êtres vivants dans le cycle de l'azote est très hiérarchisée.

B- Les économies d'azote dans les écosystèmes

B.1- La fixation d'azote atmosphérique

DELWICHE 1970 considère que les gains de l'azote sont statuéés par la fixation et les pertes sont représentées par dénitrification et lessivage, les différents types de fixation d'azote atmosphérique ou apports d'azote au sol. La fixation biologique qui représente $44 \cdot 10^6$ t/an selon (symbiotique ou non) c'est de cette façon que les plus importantes quantités rentrent dans la biosphère : $44 \cdot 10^6$ dans continents et $10 \cdot 10^6$ dans océans. La fixation physicochimique qui se produit par

les décharges électriques des orages. Elle correspond à $7,6 \cdot 10^6$ t/an Cette quantité d'azote est apportée par les pluies.

B.2 La fixation biologique

L'azote n'est pas directement fixé par les plantes supérieures mais il est fixé par des bactéries ou des algues bleues soit par des bactéries associées aux racines de certaines familles de végétaux on a deux types de fixateurs : Fixateurs libres : bactéries, algues exemple azotobacter (*Beijerincka*, cyanophyceae) et les fixateurs associés comme le cas des *Rhizobium* et les légumineuses.

B.3 - Les microorganismes fixateurs : La fixation est le fait d'algues bleues, de champignons ou de bactéries soit en aérobiose (*Azotobacter*) et en anaérobiose (*Clostridium*) terrestres et aquatiques. Les germes symbiotiques comme *Rhizobium* sont des bactéries banales, difficiles à identifier dans le sol là où elles ne fixent pas l'azote. **DOMMERGUES et MANGENOT, 1970**

B.4 - L'enzyme de la fixation : La nitrogénase est un complexe enzymatique formé de 2 protéines : Ferroprotéine et molybdoprotéine.

Le rôle des hydrogénases les quelques souches de *Rhizobium* synthétisent une hydrogénase codée par un gène unique "hup".

Les rendements énergétiques de ces bactéries sont très augmentés meilleur production des plantes haies.

B. 5 - Fixation par les bactéries libres

Certaines bactéries hétérotrophes nécessitent des composés organiques comme source d'énergie, qui doivent disposer de carbone organique pour se développer, certaines souches peuvent résister à la salure, d'autres très sensibles aux carences en présence des substances toxiques provenant des litières et le pH neutre optimal 4,5 et 10, l'humidité, O_2 , T° comprise entre 25 et 30°.

B.6- Fixation par les algues bleues

On dénombre environ 60 espèces fixatrices, les quantités d'azote fixé vont de quelques kg/ha/an en régions tempérées à 100 kg/ha/an en régions tropicales (engrais vert) et certaines algues bleues vivent en symbiose des lichens. En fait les Bryophytes aux Angiospermes s'installent dans nodosités ou colonisent simplement des méats des tissus végétaux.

Exemple : *Azolla* (fougère aquatique) a ses feuilles pourvues de chlorophylle sur la face dorsale et la face ventrale est pourvue de lobes où se trouve *Anabaena azdlae* qui n'existe pas libre.

Hépatiques et Nostoc : *Gymnospermes : nodules racinaires (*Nostoc*).

B. 7 - Fixation symbiotique par les légumineuses

Cette fixation symbiotique par les légumineuses joue un rôle important dans l'enrichissement en azote des biotopes.

*Le sol ne doit pas être trop acide.

*Dans cette famille les nodosités renferment des Rhizobium.

*Un grand nombre d'espèces sont concernées 12. 000 Légumineuses.

*Certaines cultures fixent de 50 à 300 kg/ ha/an.

Le Rhizobium est difficile à identifier à l'état libre.

A chaque espèce correspond des bactéries particulières.

L'intérêt économique : vente de cultures de rhizobium dans le but d'augmenter les rendements en azote du sol par enfouissement des organes aériens. ($\frac{1}{2}$ l'N \approx 200Kg/ha).

B.8 - Fixation symbiotique chez les non Fabaceae.

Il existe des Actinomycètes tels que *Frankia* associés à des espèces végétales réparties dans plusieurs familles de plantes à fleurs (Casuarinales, Myrte, Fagales Rhamnales, Coriariales, Rosales). Ce sont des bactéries filamenteuses croissant comme des microchampignons infestent les plantes dites actinorhiziennes, l'activité fixatrice se situe dans des vésicules (Endophytes), cette symbiose permet la colonisation de sols particulièrement pauvres en azote.

Exemple : Parmi les arbres tropicaux, les *Casuarina* sont particulièrement intéressants pour la régénération des sols grâce à leur association avec *Frankia* (nodules sur radines). Ces arbres à croissance très rapide peuvent servir de brise vent en région désertique et protéger les cultures des vents de sable ou servir à fixer les dunes.

B.9- Fixation rhizosphérique

On appelle rhizosphère la zone d'action des excréments racinaire, à ce niveau la croissance des bactéries est assurée par les *Pseudomonas*, *Azotobacter* et *Azospirillum*.

B.10- En milieu aquatique

Il existe différentes bactéries fixatrices mais le rôle principal dans la fixation d'azote atmosphérique est dû à plusieurs sortes d'algues bleues photosynthétiques telles que : *Anabaena*, *Nostoc*, *Trichodesmum* Evaluate à 10-10⁶ t/an la quantité d'azote fixée par les océans.

B.11- Quantités fixées et applications

Pour la fixation par les bactéries libres les quantités fixées dépendant de la température et de l'humidité. Pour la fixation symbiotique les quantités fixées dépendent de l'activité photosynthétique de la plante donc de la phénologie en

hiver sous nos climats elle sera ralentie suite à des variations journalières d'éclairement. L'apport par les légumineuses est en moyenne de 200 kg ha (50 à 200 kg d'engrais sur un champ de blé en culture intensive) et de 500 kg/ha/an dans un champ de trèfle (150 à 400 kg/ha/an).

B.12- La fixation physicochimique et industrielle

Cet azote est apporté au sol par les eaux de pluies ou sous forme d'engrais fabriqués par l'industrie et évalué à 30- 10⁶ t/an.

Les pluies apportent \simeq 10 kg/ha/an d'azote mais les pluies acides peuvent aller jusqu'à 80 kg/ha/an.

La pluie ramène 25 M t/an d'azote au sol en partie fixée par ionisation ou décharge électrique. Les continents peuvent émettre des oxydes d'azote ou de l'ammoniac (dénitrification), l'océan qui est alcalin doit libérer des quantités importantes de NH₃.

B.2. Dénitrification : Elle est estimée à 43 10⁶ t/an se produit dans les sols présentant un excès de nitrates. Les Pseudomonas sont des bactéries qui emploient les nitrates comme source d'oxygène pour dégrader le glucose et former de l'ATP (anaérobies).

B.2.1. Lessivage

1 - L'importance du phénomène (liée à la solubilité de l'azote).

On estime la quantité de 30.10⁶t d'azote exporté des continents vers les océans par les cours d'eau, les 10.10⁶t d'azote nitrique et 20. 10⁶ t d'azote organique.

S'il n'y avait pas dénitrification on assisterait à une eutrophisation des continents. Cette perte dans les sédiments n'est pas compensée par l'apport des roches éruptives mais par le dégagement d'azote juvénile d'origine volcanique (les animaux qui mangent des poissons il y a retour aux continents).

2- La minéralisation et nitrification

Les premiers agents (Nitrification) vont faire passer NH₄-----> NO₂⁻

Les deuxième agents (Nitrification) agissent juste après les nitreuses NO₂⁻--->NO₃⁻

Bactéries nitriques ClNH₄ -----> Cl⁻ + NH₄⁺

H₂O -----> H⁺ + OH⁻

 NH₄⁺ + OH⁻ -----> **NH₄OH** Forme de pénétration dans les végétaux

Les végétaux peuvent se nourrir directement de NH₄OH dans le cas de déficit de NO₃⁻

3- Nitrates : Les nitrates sont la source préférentielle en azote pour les végétaux supérieurs, cela a été mis en évidence par le chercheur français Boussingault

(1860). Il a cultivé des plantes de tournesols dans des pots de terre stérile enrichit de nitrates et il a obtenu un rendement croissant avec la quantité de nitrate ajoutée. Sachant que la terre stérile est dépourvue de microorganismes

En agriculture $\text{KNO}_3 \rightarrow \text{K}^+ + \text{NO}_3^-$

$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$

$\text{H}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{HNO}_3$ forme de pénétration chez les végétaux
mais ces derniers préfèrent les nitrates que NH_4OH ;

Les nitrates puisés des sols seront rapidement assimilés et se trouvent incorporés dans les acides aminés.

$\text{NO}_3\text{H} \rightarrow \text{NO}_2\text{H} \rightarrow \frac{1}{2} (\text{HO}-\text{N}=\text{N}-\text{OH}) \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NH}_3$

Nitrate Nitrite Acide hyponiteuse// Hydroxylamine

On a pu mettre en évidence au niveau de la plante la seule étape le passage de nitrate en nitrite : $\text{NO}_3\text{H} \rightarrow \text{NO}_2\text{H}$ se fait par le nitrate réductase

Cette réduction des nitrates se fait au niveau des racines et des feuilles.

C - Azote organique :

Les organismes saprophytes (plantes qui se nourrissent de la matière organique en voie de décomposition utilise la matière organique des cadavres. Ce processus est dit : putréfaction parmi les principaux produits de la putréfaction les gaz (CH_4 , CO_2 et NH_3), les amines tels que méthylamine et la cadaverine et les sels ammoniacaux des composés azotés (Acides aminés puriques) ; certains végétaux supérieures saprophytes tel que : *Monotropa hypophitis* mais l'utilisation de l'azote organique par les végétaux reste exceptionnel, elle se produit dans les cas suivants :

*les plantes parasites tel que les cuscutes, qui contiennent dans leurs suçoirs des enzymes qui hydrolyse des protéines des plantes hôtes et les produits azotés de cette décomposition seront utilisés directement par les parasites (Azote organique).

*Les plantes carnivores secrètent dans les urnes spéciales ou à l'extrémité de certaines poils glandulaires des enzymes protéolytiques qui digèrent les proies captées.

	minéra	N ammoniacal	Nitrites	Nitrates
Acides	----->	NH_4	----->	NO_2^-
Aminés	ammonification	Nitritation	Nitratation	

Transformations de l'azote dans le sol

Une partie de l'azote contenue dans la biomasse (végétaux. et animaux.) est sans cesse restituée au milieu sous forme de débris organiques d'excréments et de cadavres.

Les litières correspondent à l'ensemble des résidus déposés à la surface du sol, elles sont essentiellement de nature végétale. Les protéines et autres formes d'azote organique sont attaquées pour les organismes bio-réducteurs tels que :

Bactéries hétérotrophes, actinomycètes et champignons

Ils produisent l'énergie dont ils ont besoin par la décomposition de l'azote organique.

C.1- Décomposition des litières

a) l'humification

Certaines formes d'azote sont stabilisées sous forme de phénols et corps comprenant des groupements NH_2 - CH - NH - CH

L'azote dans les chaînes est stable alors que les AA et les Amino sucres sont directement mobilisables.

La lignine est une source importante d'azote. Comme pour la cellulose sa dégradation est liée à l'humidité.

La décomposition des litières en poids peut être évaluée par le coefficient de Jenny

$$K = \left(\frac{\text{chute annuelle}}{L + \text{chute annuelle}} \right) \times 100 \quad L : \text{litière}$$

Ce coefficient s'applique assez bien à l'azote car l'azote quitte lentement les litières et lorsqu'un groupement vieillit l'azote s'accumule dans les litières il s'agit d'un moder.

Pour le Mull : disparition rapide des tannins par les vers de terre, moisissures, bactéries champignons)

Moder : Fixation par les racines mycorhizes

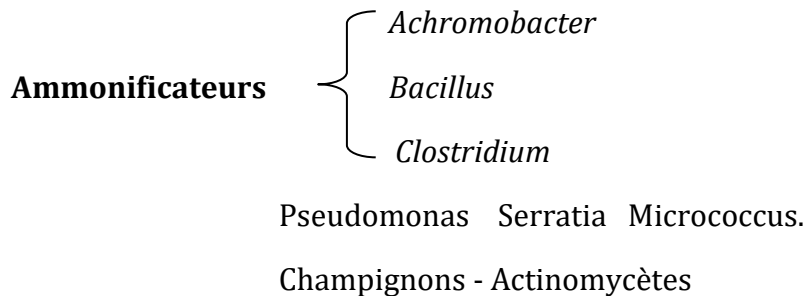
Humus : réservoir d'azote détourné du turnover normal 1 à 3 % de l'azote est minéralisé chaque année association aux argiles - tannins (polyphénols difficiles à dégrader produits bruns)

Mor ou dismoder : acides fulviques et humiques très vieux C/N élevé. Les des humificateurs sont les actinomycètes, levures, champignons filamenteux, clitocybes moisissures blanches La faune joue un rôle émiettement, enfouissement les vers de terre déstabilisent les tanins. **DUCHAUFFOUR, 1984.**

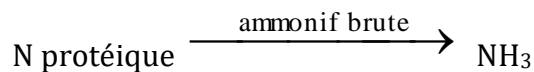
C.2. L'ammonification = minéralisation

De nombreux organismes hétérotrophes (bactéries, actinomycètes, champignons) vivent de substrats organiques en libérant de l'azote inorganiques NH_4^+ (l'énergie est utilisée par les bactéries).

La dégradation anaérobie des protéines est essentiellement le fait de *Clostridium*.



Ammonification nette et ammonification brute



Variation dans immobilisation= forme ammonification nette

Facteurs écologiques régissant la minéralisation dans le sol :

Quelques soient les conditions écologiques où un sol se trouve placé et si on reste dans les limites compatibles avec la vie ce sol renferme toujours un certain nombre d'espèces adaptées.

* températures : c'est l'élévation de température stimule le mieux.

* humidité : température et humidité agissent ensemble, sur le remouillage d'un sol a un effet très stimulant sur la minéralisation

*pH 4 → 9 mais souches adaptées : une forte acidité ralentit l'activité

*végétation (biomasse et nature → substances inhibitrice. On parle de "*priming effect*" pour l'effet d'activation dû à l'apport de glucose et débris frais qui augmentent la minéralisation.

*La faune par mise en contact en particulier au niveau des agrégats (ver de terre) de la matière organique et des minéraux et bactéries peut activer la minéralisation.

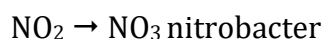
C.3. - La nitrification

L'azote ammoniacal est oxydé sous forme de nitrites lorsque les conditions sont favorables. Une partie de l'azote ammoniacal peut être absorbée par les végétaux au niveau racinaire et une partie peut être utilisée par les bactéries nitrifiantes pour produire leur énergie métabolique.



Les nitrosomonas transforment l'ion ammonium en ions nitrites NO₂ en présence d'oxygène et d'eau.

En milieu océanique la première bactérie nitrifiante connue *Nitrosocystis oceanus* est une autotrophe qui se suffit d'ammoniac et de CO₂, elle est plus fréquente dans les eaux septentrionales que tropicales.



a- Facteurs

Les bactéries nitrifiantes autotrophes utilisent seulement le carbone du CO₂ et des carbonates, ne constitue pas ce n'est pas un facteur limitant pour Cark mais le facteur limitant pour la nitrification.

Le magnésium et le phosphore sont indispensables à faible dose.

pH : les bactéries nitrifiantes sont neutrophiles ou basiphiles optimum : pH 6,8 et 9. Les Nitrosomonas semblent plus tolérant vis à vis du pH que Nitrobacter.

*Les variations de la température d'activité minimale est plus faible pour nitrosomonas que pour nitrobacter (28° à 36°C).

*Substances inhibitrices les bactéries nitrifiantes sont très sensibles à l'action des composés toxiques tels que les chlorates, les acides aminés, antibiotiques, effet acidité de litière chez les résineux.

*les fortes concentrations en NH₄ sont inhibitrices (engrais) aération les bactéries autotrophes nitrifiantes sont des micro aérobies stricts.

*L'accumulation de nitrites est peu fréquente, elle est liée à NH₃ > NH₄⁺ et un pH élevé. Elle entraîne une toxicité et une dénitrification.

b- Contrôle de nitrification

L'intérêt de lessivage provoque l'accumulation excessive de nitrates dans les végétaux présente une toxicité pour les animaux produits inhibiteurs utilisés : dicyanbdiamide.

Tableau 3 Influence de la matière organique sur de la nitrification (cas de quelques espèces).

	C%	N %	pH	en % TN	
				N&aminé	Nitrifie
Luzerne	3.1	0,31	6,5	37,6	4,6
Brome	3.1	0,29	6,2	34,4	2,9
Maïs	2,5	0,27	6,4	31.7	3,1

D. Bilans azotés dans différents milieux

D.1- Landes : l'importance du cycle de l'azote dans l'évolution des écosystèmes et le rôle des incendies sur le cycle.

D.2- Déserts : Le problème de la désertification : Les déserts occupent 20% de la surface du globe et les zones semi-arides plus de 15%. AIDOU, 2003.

Zones arides sont caractérisées par absences des précipitations et parfois des années sans pluie. Les régions semi arides Pmm > 250 mm d'eau grandes variations des réserves en azote est souvent la présence de beaucoup de magnésium, les sols sont alcalins qui encouragent la volatilisation de NH₃.

Ce qui permet de dire que ce sont des régions sans plantes vasculaires

Le rôle des croutes participe à la fixation d'azote par des cyanobactéries soit libres, soit dans des lichens symbiotiques, activité lors des réhydratations C/N bas; chaque pluie entraîne une minéralisation occasionnelle. SKUJINS et *al.*, 1981

Dans le cas des régions avec plantes vasculaires telles que : Spermatophytes éphémères ou pérennes

La pluie joue un rôle dans le cycle de semence à semence (ephémérophytes) surtout au niveau du cycle interne.

Rôle des légumineuses dans les déserts sont résumé ci-dessous

*Avantage de la compétition interspécifique mais beaucoup de légumineuses tel que Acacia ne semblent pas ondulés en zones très arides.

*Dans les déserts avec des nappes profondes le genre *Prosopis* qui est nodulé au niveau de la nappe ; la minéralisation dans un sol désertique équilibre la fixation et la dénitrification.

*L'eau fossile présente dans les déserts doit être préservée, les déserts dont érosion (vent, pluie) provoquent une redistribution de l'azote importante.

*L'irrigation pose souvent plus de problèmes difficile à résoudre les populations indigènes trop pauvres pour utiliser des fertilisants : fertilisation, volatilisation et dénitrification.

*L'introduire et produire les espèces pour faciliter la rétention de l'azote et de l'eau dans la biomasse et les micros habitats). Les points cités au-dessus jouent un rôle très important dans le cycle de l'azote pour freiner la désertification

Rôle des animaux : Les termites augmentent la minéralisation par endroits en utilisant les termitières (mortes) comme fertilisant.

D.3- Forêt méditerranéenne : En histoire de l'agriculture des Forêt méditerranéenne la diminution de l'azote est en fonction de la fréquence des incendies. (Pluie en période froide) JUDICAEL, 2006.

Les Incendies → provoquent les pertes en azote et le surpâturage

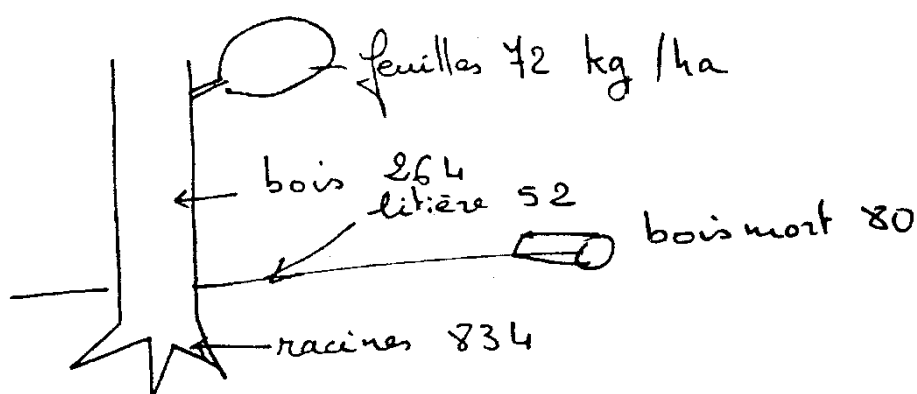
Après le feu on assiste à l'installation des légumineuses comme végétation II^{aire} (avantage lié à la variation de humidité) : Exemple **LOSSAINT ET RAPP, 1971** a donne les résultats dans une forêt de chêne vert : arbres 763 kg/ha, arbustes 15,3, increment 13,2, stock litière: 150, décomposition: (Jenny) 25,8, pluies + pluviollessivage : 16,1 (15,6 + 0,5)

D.4. Tundra localisé à une latitude de + 60° N, les plantes vasculaires et mousses représentent 2% de la matière organique la plus grande partie de la litière mousse_brune_au_sol. Les mousses et sphaignes absorbent l'azote de surface. La production est limitée par l'azote assimilable.

Le rôle des herbivores, est bien marqué au niveau de la forêt riche en matière organique morte au sol. Les qualités différentes des feuilles – mousses, la présence des herbivores est lié là où les plantes sont plus riches en azote.

D.5. Forêt tropicale humide (climat)

Les pertes d'azote soluble sont caractérisées par des précipitations de 3500 mm d'eau, une diversité de 300 espèces, le sol peu fertile très sableux et très lessivé, C/N élevé et minéralisation rapide



La faible quantité des nitrates et forte présence de d' NH_4 , la dénitrification rapide le turnover très rapide peut être quelque mois < 1 an et les tourbières existent en climat tropical quand le sol n'est pas assez oxygéné

E- Impact de l'Homme sur le cycle de l'azote

L'Homme influe sur le cycle de l'azote par plusieurs actions (feu, mécanisation, récoltes et animaux) par des techniques de stimulation biologique du sol, les

assolement faisant une plus grande place aux légumineuses, l'entretien organique du sol (compostage), les amendements calcaires et magnésiens augmente le pH. **DANIEL CÔME.1992.**

F- Cycle de l'azote et environnement : augmentation de la teneur en azote fixé par les continents l'azote fixé industriellement double tous les 6 ans.

La culture des légumineuses augmente l'enrichissement des nappes aquifères dans des proportions qui deviennent dangereuses pour la consommation humaine, de plus les déchets des animaux et de l'Homme sont évacués dans les rivières les lacs et la mer. Ils provoquent une eutrophisation et la pollution.

L'enrichissement exagéré des continents en azote est selon **DELWICHE, 1970** de 9 M de t/an ce qui peut être le danger le plus grave qui menace l'Homme.

Par la résistance aux engrais minéraux industriels, l'augmentation des dénitrifiant ce qui oblige une recherche de solution technologiques réduisant les dangers du à l'excès d'azote. **LAABIR, 2010**.

Tableau 4 Bilan du cycle de l'azote au niveau de la biosphère continentale et évaluation de sa perturbation par rapport de nitrates anthropogènes (RAMADE, 2002)

Sources naturelles	Production ou rejets annuels d'azote nitrique (106 t)
Fixation d'azote dans les sols par les processus abiotiques et par les végétaux et les bactéries	140
Sources anthropogènes	
Engrais	80
Légumineuses et autres végétaux cultivés fixateurs d'azote	40
Usage des combustibles fossiles	20
Incendie de la biomasse végétale	40
Drainage des zones humides	10
Défrichage des terres	20
Total des sources anthropogènes	210

I- Perturbation du cycle d'azote

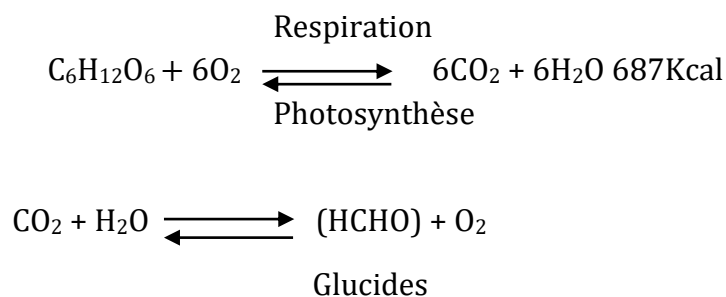
La teneur de l'azote fixé par les continents tend à augmenter ; en effet l'azote fixé industriellement sous forme d'engrais double tous les 6ans ; la culture des légumineuses augmente d'au moins 10% la quantité naturellement fixée. Ainsi les sols et les cycles biologiques des écosystèmes peuvent s'enrichir progressivement en azote par lessivage. Ainsi les nitrates peuvent alors enrichir les nappes aquifères dans des proportions qui deviennent très dangereuses pour la consommation humaine. De plus les déchets organiques (déjections animales et humaines très riches telle l'urée) sont évacués dans les rivières, les lacs et la mer, ils provoquent l'eutrophisation, cette dernière liée souvent au fonctionnement des écosystèmes aquatiques, puisque les fleurs d'eau en sont la conséquence. En effet il y a une multiplication démesurée de petites plantes entraînant une consommation totale de l'oxygène pendant la nuit et par conséquent la mort par asphyxie de tout respire dans l'eau. Tous les organismes supérieurs crèvent provoquant un pourrissement et une fermentation.

L'eau dégage des odeurs nauséabondes. Tout ceci montre encore une fois qu'il est préférable de ne pas perturber l'équilibre normal de la nature.

III.2.2.2. Le cycle du carbone

1. Généralités

Le cycle se confond en partie avec les flux d'énergie les sources de carbone sont nombreuses et variées roches calcaires d'origine biogène atmosphère (le stock dans l'atmosphère est plus (beaucoup plus important que celui dans les océans (acide carbonique dissout dans l'eau). Le cycle s'effectue avant tout entre CO₂ et les êtres vivants. Le CO₂ de l'atmosphère est de 0,03% ou 340 ppm ou les bicarbonates dissouts dans l'eau fournissent le carbone servant de base à l'élaboration de la matière organique.



L'hydrogène est fourni par la photolyse de l'eau dont l'oxygène se dégage dans l'atmosphère. Au cours de la décomposition le carbone est souvent remis en circulation sous forme de CO₂.

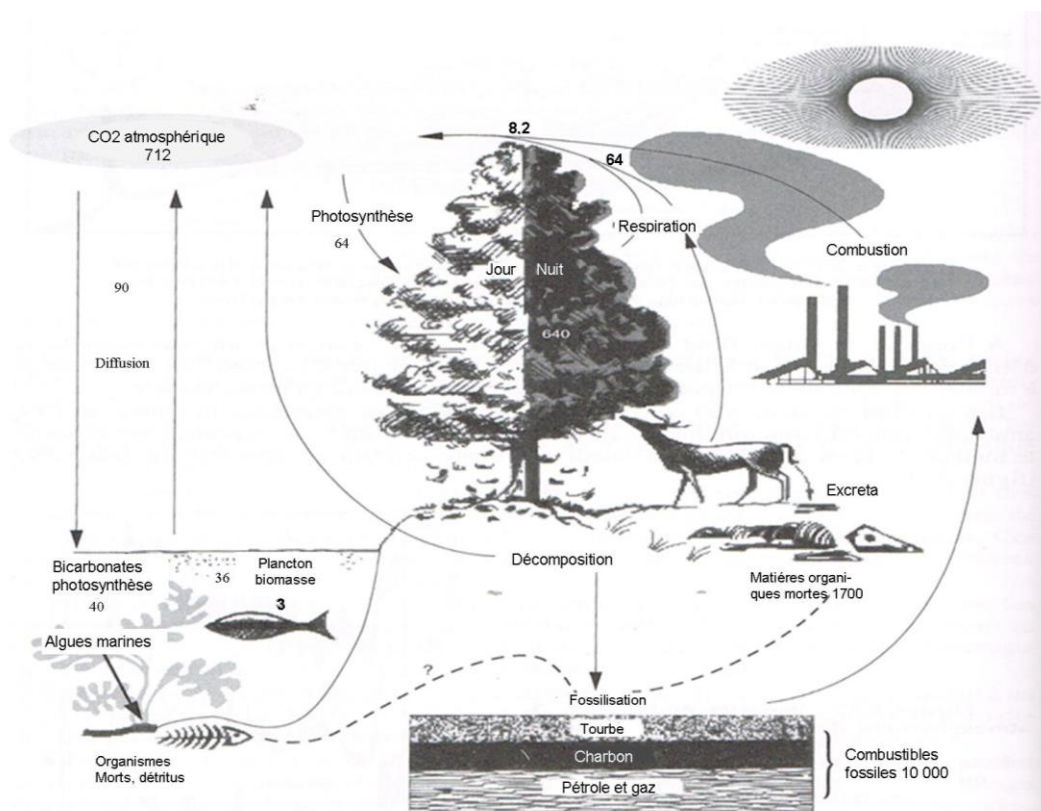


Figure 8 Cycle de carbone dans la biosphère d'après RAMADE, 2003

2. Circulation du carbone dans le sol

Le carbone contenu dans l'humus entraîne une stagnation du cycle, associé à l'argile l'humus constitue le complexe absorbant du sol avec une vitesse de circulation plus au moins grande.

Il peut y avoir stockage important de matière organique au niveau du sol (tourbe).

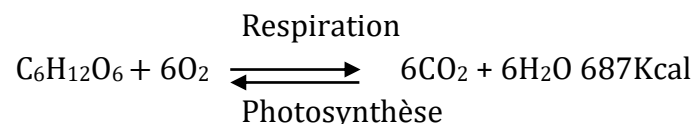
La chaîne des saprophytes ne peut fonctionner par manque d'air et acidité → accumulation (hydrocarbures)

Dans l'eau il peut également se produire une stagnation lorsque le carbone s'accumule sous forme de Ca CO_3 . (Craie, calcaires, tufs...)

CO_2 { Respiration (consommation d' O_2 en même quantité molaire que CO_2) ↓
Fermentations

La production d'énergie cellulaire est le fait de la respiration liée à la chaîne respiratoire et les phosphorylations oxydatives.

Si nous considérons l'équation photosynthétique et celle de la respiration dans le cas des glucides nous avons :



En définitive, la respiration aboutit à des effets rigoureusement opposés à ceux de la photosynthèse ; elle consomme de l'oxygène et dégage du gaz carbonique dans des proportions équimolaires.

La respiration n'est pas seulement le fait des autotrophes et des hétérotrophes animaux. Dans chaque écosystème, les matières organiques ne sont pas entièrement utilisées dans les chaînes alimentaires de prédateurs.

a- La décomposition : se fait soit par les dégradations oxydatives (respiration du sol) soit par fermentations anaérobies. Les modifications du cycle du carbone par la photosynthèse et la respiration engendrent des phénomènes antagonistes qui conduisent à équilibre.

Remarque cycle de carbone était quasiment parfait pendant les années 1850, mais actuellement l'usage des combustibles fossiles et les déforestations modifient ces équilibres. **LOSSAINT ET RAPP, 1971b.**

L'accumulation de carbone dans divers produits fossiles : charbon (houille formée dans de grandes zones marécageuses du carbonifère au Permien).

Pétrole mélange d'hydrocarbures liquides (solides et gazeux dissouts) estimé à 82 à 87% carbone.

Le kérosène matière organique insoluble représente 1000 fois plus que le carbone mais son exploitation reste difficile.

Actuellement les combustions augmentent le taux du CO₂ de l'atmosphère (avec le nombre élevé des fabrications de chaux). La comparaison faite au milieu du siècle dernier 268 ppm de CO₂ dans l'atmosphère mais actuellement on a plus de 340 ppm

Les taux minimum de CO₂ sont observés à la fin du printemps et les taux maximum en hiver quand la végétation est inactive.

b- Accroissement annuel

L'effet de la déforestation des forêts primitives en cultures et la déforestation par oxydation de l'humus qui accentue l'écart.

La modélisation des changements climatiques en rapport avec les activités humaines est important à définir, ainsi on prévoit pour 2050 une augmentation de température de 1 à 5° pour un doublement de la quantité de CO₂ et le niveau de la mer de 50 cm.

Ce n'est pas seulement le CO₂ mais aussi les différents gaz tels que protoxyde d'azote, méthane et l'effet de serre.

Ce phénomène est différent des pollutions atmosphériques locales (villes) → problème arbres, plus acides.

La cassure de la couche d'ozone par des engins thermonucléaires, hydrocarbures chlorofluorés, bombes aérosols aux fréons.

3. Perturbation du cycle de carbone :

Depuis une date récente, l'homme a inversé le sens de ce phénomène puisqu'il utilise comme combustible des masses de plus en plus importantes d'hydrocarbures fossiles ce qui enrichit l'atmosphère en CO₂ (13% pour les 50 dernières) ce qui induit : Une augmentation certaine de la photosynthèse. En revanche cette augmentation du CO₂ tend à faire augmenter la température dans l'air dont le résultat est le phénomène de l'effet de serre. Ce mécanisme pourrait faire fondre les calottes polaires et amener des inondations des continents.

III.2.2.3. Cycle de l'oxygène

1. Généralités

L'oxygène apparaît quantitativement comme le principal constituant de la matière vivante. Si l'on tient compte de l'eau présente dans les tissus, le corps humain renferme par exemple 62,8% d'oxygène et 19,4% de carbone. Si l'on se rapporte à l'ensemble de la biosphère, cet élément figure encore en premier rang des corps simples devant le carbone et l'hydrogène.

Il est étroitement lié à celui du carbone, la majorité de l'O₂ atmosphérique est produit par la photosynthèse des producteurs primaires (plantes vertes), sa valeur est de 21% d'O₂ dans l'air. L'enrichissement de l'atmosphère en O₂ est lié à la présence des organismes photosynthétiques

Le cycle de l'oxygène est fort compliqué, par suite de son aptitude à donner de multiples combinaisons chimiques et à se présenter sous diverses formes. Il en résulte l'existence de nombreux épicycles qui s'effectuent entre la lithosphère et l'atmosphère, ou entre l'hydrosphère et les deux autres milieux. L'oxygène atmosphérique et de nombreuses roches superficielles (sédiments calcaires, dépôts ferrugineux) sont d'origine biogène.

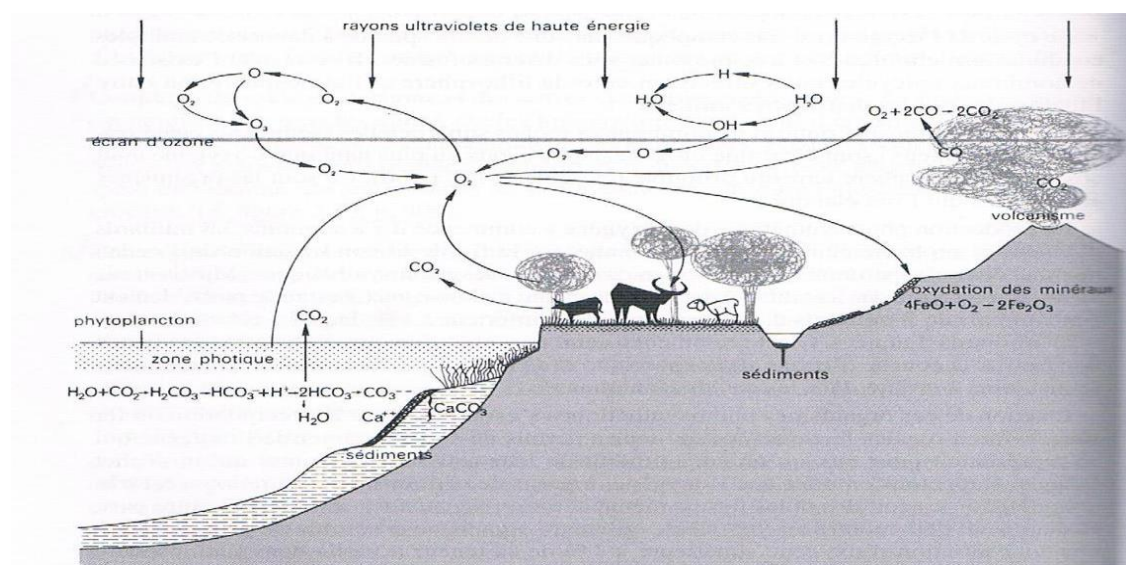


Figure 8 Cycle de l'oxygène d'après RAMADE, 2009

La production photosynthétique de l'oxygène a commencé il y a au moins 3,8 milliards d'années et probablement 4 milliards d'années à la fin de la condensation de l'océan mondial dès qu'apparurent les premiers micro-organismes photosynthétiques **MOJZSIS et al. 1996**. L'oxygène a dès lors diffusé dans l'atmosphère mais son taux y est resté probablement pendant près de 2

milliards d'années à un niveau inférieur à 1 %, lequel a été atteint vers - 2,5 milliards d'années

L'action de ces organismes photosynthétiques est traduite par la précipitation du fer sous forme d'oxydes ferriques, ce qui leur a permis de se débarrasser de l'oxygène qui ne représentait qu'un sous-produit de leur activité et en plus qu'un déchet toxique. La formation d'un écran d'ozone capable d'arrêter les radiations UV les plus dangereuse dans la haute atmosphère à partir du moment où l'oxygène a atteint une concentration dans l'air égale à 1%.

Le cycle de l'oxygène s'effectue en majeure partie entre l'atmosphère et les êtres vivants (voir fig8), sa production et son dégagement sous forme gazeux, lors de la photosynthèse, s'opposent sa consommation par les hétérotrophes lors de la respiration qui conduit à la dégradation des molécules organiques. Le cycle de l'oxygène apparaît en grande partie comme l'image inversée de celui du dioxyde de carbone, les mouvements de l'un s'effectuent dans le sens opposé de ce de l'autre.

Selon certains auteurs la production de l'oxygène par le phytoplancton marin aurait provoqué une hausse considérable de sa teneur vers la fin du Précambrien où il aurait atteint une concentration de 7 %, valeur égale au tiers de sa teneur actuelle dans l'atmosphère. La polymérisation d'une partie de l'O₂ en ozone (protection), blocage du cycle du carbone (charbon, formation, tertiaire) libération de grandes quantités d'Oxygène.

III.2.2.4 Cycle du soufre

1. Généralités

Le soufre est un élément indispensable à tous les êtres vivants. Une série d'acides aminés, des protéines contiennent du soufre (méthionine, cystine cystéine, kératine chez les animaux..). Il participe à la structure tertiaire

2. Origine : En milieu aérobie : si la quantité d'oxygène est suffisante, l'ion sulfate se forme dans le sol et dans l'eau par oxydation du soufre ou même d'hydrogène sulfuré(H₂S) gaz qui s'échappe des sédiments anaérobies profonds, réintégrant ainsi le cycle. Le H₂S, gaz mal odorant très toxique, s'oxyde pour donner du soufre. Cette réaction se produit pendant la chimiosynthèse, au cours de laquelle une certaine énergie se libère. Cette énergie est alors utilisée par les bactéries pour élaborer leur propres substances organiques, grâce à un processus de photosynthèse, des microorganismes pigmentés parviennent à participer à une assimilation d'acide carbonique et à oxyder H₂S ce qui donne du soufre. Si le milieu ambiant reste aérobie, le soufre sera à nouveau transformé en ions sulfate sous l'action d'autres microorganismes.

3. En milieu anaérobie :

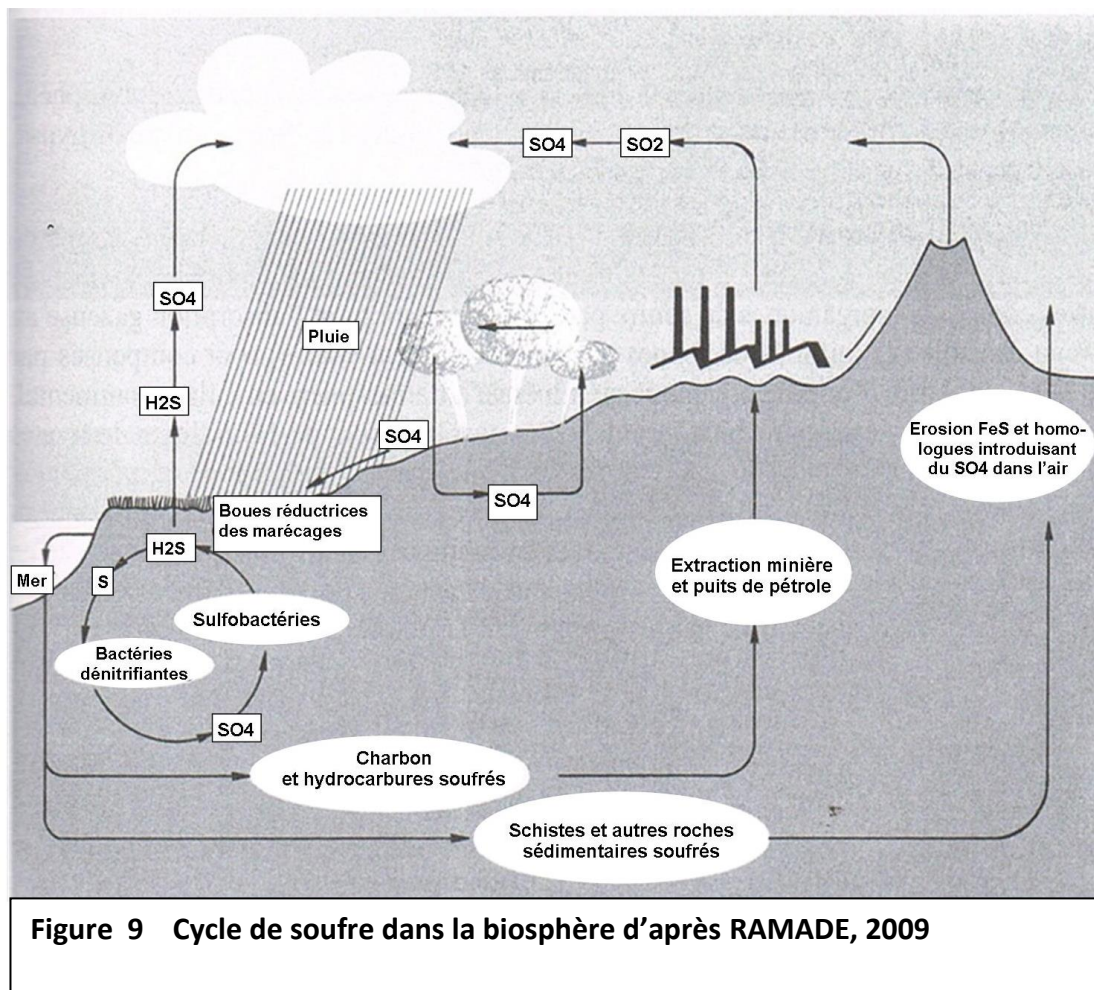
Aux endroits où on rencontre des ions sulfates dans des conditions anaérobies, par exemple dans la vase noire sous la couche superficielle de flaques de boue,

les bactéries réductrices transforment les sels en H_2S . Ce gaz remonte et est à son tour oxydé

L'autre importance que révèle le cycle de soufre, est l'influence positive qu'il exerce sur le cycle du phosphore le phosphore qui est généralement présent dans des concentrations limitées, est transformé en ions solubles à partir d'une substance insoluble chaque fois que les sédiments contiennent du sulfure de fer. La roche mère contenant des pyrites FeS_2 ou des chalcopyrates ($CuFeS_2$) et ensuite de la décomposition de la matière organique qui en contient très peu.

Le soufre est absorbé par les racines qui deviennent sulfurés (Cystine, cystéine, méthionine) les hétérosides sulfurés SO_4 s'accumule dans les feuilles : cas gypsophytes sur le sol ces dernières conduit à la mort des plantes (fig 9)

Microorganismes sulfurés ($S \rightarrow H_2S$) qui peut se dégager dans l'atmosphère ou dans l'eau, sous les formes des sulfures où ils seront oxydés) et on parle de l'oxydation en sulfates. En dehors du soufre d'origine organique il peut s'introduire dans le cycle des quantités importantes de soufre apportées par l'atmosphère et l'eau de pluie dans les régions industrielles (fumées) de 2 à 260 kg/ha/an.



4. Perturbations.

Ce cycle est supposé en équilibre dans l'écosystème en absence d'intervention humaine.

L'importante perturbation humaine, se résume dans les sources de soufre existante dans l'atmosphère, les embruns (sulfates) de taille minuscules de l'ordre des cristaux de gypse avec une production de 44×10^6 t/an.

L'usage des combustibles fossiles s'est traduit par une profonde perturbation du Carbone et du soufre car le charbon renferme 1 à 5% de Soufre, les fuels lourds 2 à 6% et la diminution du pH des eaux de pluies.

Les végétaux souffrent de l'excès d'anhydride sulfureux les lichens sont de bons indicateur.

La chute du pH au niveau des lacs entraine la baisse de la productivité primaire des phytoplanctons.

III.2.2.5. Cycle du phosphore

1. Généralités

Le phosphore constitue un des composants essentiels de la matière vivante. Il se rencontre à des taux relativement élevés. En effet, il a une grande importance du point de vue biologique on le trouve dans diverses molécules phosphorylées tels que nucléotides ou encore les phospholipides.

Le cycle du phosphore est assez simple et qualifié d'ouvert du fait de la sédimentation qui a lieu dans les couches profondes des océans. Le phosphore est en effet constamment prélevé au cycle. En outre, les minéraux et les sols contenant du phosphore sont sans cesse lessivés, par les eaux de pluies. On constate ainsi un gain et une perte constante à l'extérieur du cycle (fig 10)

La minéralisation de la matière morte libère en outre du phosphore, tant sur terre que dans l'eau. Les organismes eux-mêmes rejettent directement des phosphates dans leurs excréments ; ces phosphates réintègrent donc le milieu ambiant. C'est sous cette forme que ces sels sont absorbés par les végétaux. A partir de ce moment-là ils circulent dans la chaîne alimentaire. Au sein de l'océan, le phosphate en solution est fixé dans le cytoplasme du phytoplancton qui en passant par le zooplancton aboutit dans l'organisme des poissons, des oiseaux et chez l'homme. Lorsque la minéralisation d'organismes marins morts s'opère à de très grandes profondeurs, ces phosphates sont perdus.

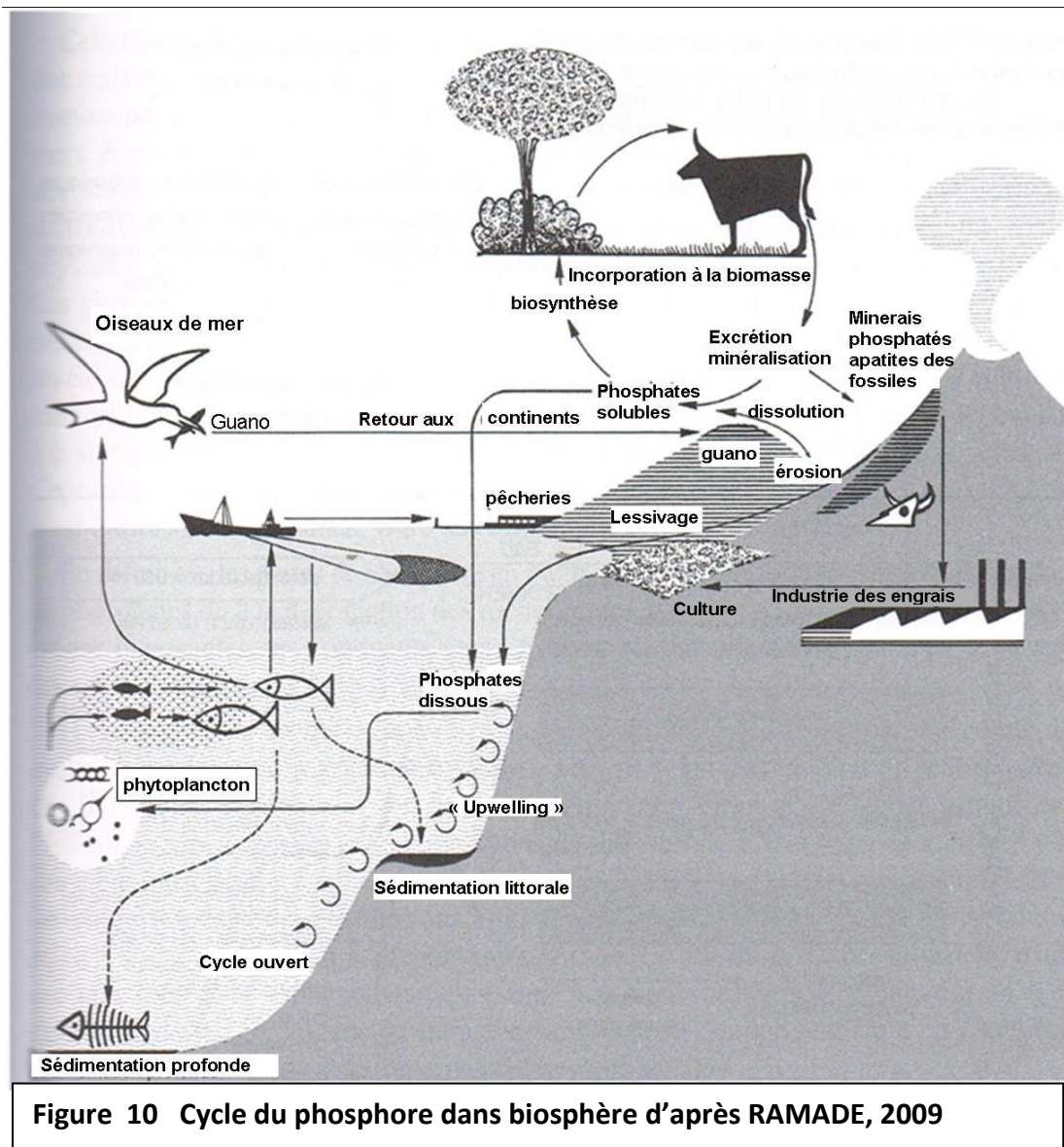


Figure 10 Cycle du phosphore dans biosphère d'après RAMADE, 2009

Les oiseaux marins qui nichent sur les rochers côtiers mais qui vont chercher leur nourriture en mer (tel lescor), ramènent de grande quantité de phosphate vers le milieu terrestre (=guano). L'homme ramasse ces déchets (=guano) pour les utiliser comme engrais pour l'agriculture (6000t/an de P). Ce qui est loin de compenser les 2000000 tonnes de phosphates extraites chaque année des gisements et lessivés rapidement après utilisation comme engrais. Ainsi le phosphate constitue et constituera encore longtemps un facteur limitant pour la fertilité et donc pour la productivité de région étendue de la terre.

III.2.3.6 Les cations biogènes

Les cycles des nutriments minéraux forment la quasi-totalité de la matière des êtres vivants ; ces derniers ne peuvent pas vivre s'ils ne contiennent pas des quantités suffisantes de certains cations tels que:

K (potassium) ; Ca (calcium) ; Mg (magnésium), parfois Na (Sodium) se sont les macros éléments minéraux ou poly nutriments parce qu'ils sont nécessaires en grandes quantités. Fe (fer), Mn (manganèse) ou méso nutriments. B(bore), Zn(zinc), Cu(cuivre), Mo(molybdène), V(vanadium) et l'anion Cl(chlore) se sont les oligoéléments, il ne faut que de faibles quantités appelés éléments traces (ppm). Certains de ces éléments sont nécessaires à la plante et non aux animaux. **CLEMENT et TOUFFET, 1980.**

Sur le sol (terre ferme), la source de cations biogènes est principalement le sol qui les reçoit des roches mères, mais l'apport par les pluies n'est pas négligeable. Ils sont absorbés par les racines puis distribués dans les divers organes végétaux. Cependant ils tendent à s'accumuler dans les feuilles, ainsi ils servent de nourriture aux herbivores et entrent dans la chaîne trophique des consommateurs de divers ordres. La minéralisation des déchets et cadavre ramène les cations biogènes dans le sol au niveau des racines et le cycle semble ainsi pouvoir continuer perpétuellement. Dans les forêts, il peut y avoir des ralentissements momentanément par accumulation dans le bois et surtout dans les écorces des arbres.

1. Perturbation du cycle

Si la forêt est coupée et brûlée pour livrer le sol à la culture le cycle est rompu. Le capital biogène ainsi minéralisé est exporté par les produits agricoles et lessivés par les pluies et le sol perd sa fertilité. Si on détruit l'humus (ramassage ou autres) on enlève ce réservoir d'aliments, on rompt alors le cycle dont l'ampleur s'amenuise et comme dans le cas précédent on passe à une végétation à biomasse réduite de lande ou de pelouse.

III.2.4. Interprétation de l'étude des cycles

1. Transfert et cycles des éléments biogènes au sein des écosystèmes

Le transfert des éléments biogènes (et autres éléments chimiques) suit deux directions principales qui sont nommés suivant OVIINGTON, 1968 : le cycle biologique qui est un cycle fermé et le cycle géochimique qui est un cycle ouvert sur le monde extérieur. Nous prendrons comme exemple des écosystèmes forestiers, qui présentent un maximum de complexité.

2. Le cycle biologique

C'est la circulation des éléments biogènes au sein de l'écosystème. Bien qu'on puisse l'étudier à une échelle séculaire, annuelle, saisonnière ou journalière, c'est également le cycle annuel qui a retenu jusqu'ici l'attention.

Le cycle biologique annuel se compose de :

L'absorption par les racines d'éléments chimiques du sol

La restitution au sol d'une partie de ces éléments par la chute de litière (feuilles d'arbres, bois mort, plantes herbacées du sous-bois en décomposition, écorce, lichens ou mousses épiphytiques, écailles de bourgeons, pollen, anthères, chatons, fleurs, cupules, fruits, cadavres et excréments de consommateurs divers), eau de lavage de la phytocénose par les pluies (eau d'égouttement et d'écoulement), sécrétions radiculaires, racines mortes. La rétention de l'autre fraction des éléments absorbés dans les organes pérennants de la phytocénose essentiellement dans l'incrément annuel des organes ligneux. L'absorption, qui correspond à une évaluation grossière des besoins de la biocénose, est naturellement la somme des éléments retenus et des éléments restitués

$$\text{Absorption} = \text{rétention} + \text{restitution}$$

Les éléments retenus s'ajoutant une année à l'autre à la biomasse de la forêt en croissance ; forment la minéralomasse de la phytocénose **DUVIGNEAUD, 1980** ce contenu total en éléments minéraux divers varie naturellement avec l'âge et le type forestier.

Le cycle des éléments biogènes peut s'étudier par des cartes de distribution biogéochimiques. Il a été constaté que les divers types de forêts tempérées, c'est toujours le Ca qui est absorbé en plus grande quantité, quel que soit le type de forêt : un ha de forêt de feuillus contient 4 fois plus de Ca qu'un ha de forêt de pin et 2 fois plus de Ca qu'un ha d'autres conifères. Par contre le K prélevés par ha de résineux (pins exceptés) , en est de même de P. la forêt de pin , déjà beaucoup plus pauvre en Ca , ne prélevé que la moitié de K et de P prélevés par les autres forêts. Il est à noter que dans les trois types de forêts étudiés (feuillus, pin et autre conifères) le Ca et K sont essentiellement localisés dans les organes ligneux (75% du Ca total dans les écorces et bois des feuillus ; 50% dans les bois et écorces des conifères).

Conclusion : le cycle géochimique est un cycle ouvert, une sorte de flux provenant du monde extérieur et branché sur le cycle biologique.

III.2.5. Classification des écosystèmes en fonction du cycle : la biosphère et les écosystèmes

C'est dans un environnement climatique et géologique en perpétuel changement que la diversité biologique s'est constituée au fil des temps, telle que nous l'observons actuellement. Ce patrimoine biologique est l'héritage de la longue histoire de l'évolution des espèces dans des écosystèmes qui ont connu d'importantes modifications. De la molécule à l'individu, de l'espèce à l'écosystème, il existe à l'intérieur du monde vivant plusieurs niveaux d'organisation correspondant à des structures de plus en plus complexes pour caractériser cette diversité des écosystèmes, la diversité des espèces et la diversité génétique. **TEYSSÉDRE, 2010**

Sous la pression des activités humaines, la diversité biologique s'appauvrit à un rythme sans précédent : les milieux naturels sont détruits ou dégradés, les ressources vivantes sont surexploitées et les pollutions déciment de nombreuses espèces. En outre les changements climatiques consécutifs à l'effet de serre modifient les limites actuelles de la distribution géographiques des espèces et des écosystèmes. **OZENDA P, (2002 et 1982)**. La protection de la biodiversité passe en priorité par une protection des écosystèmes. Tel est l'enjeu de l'approche écosystémique qui vise à trouver un compromis entre protection de l'environnement et contraintes du développement économique.

1. Des micro- organismes à la biosphère : vers la diversité des écosystèmes

La terre est conventionnellement divisée en une série de sphères :

La lithosphère (1907, de lithos : pierre) désigne la partie superficielle du globe terrestre constituée de roches solides.

La biosphère (1842, de bios : vie) enveloppe vivante de la terre correspondant au volume de toutes les formations et matières vivantes couvrant la surface du globe, tant sur les continents qu'au sein des mers : sols, associations végétales et animales.

L'hydrosphère est constituée par les eaux marines et continentales superficielles et souterraines. Ensemble considérable, les océans, les mers, les lacs recouvrent 71% de la surface de la terre (soit 362000000 km²) et le volume des eaux marines représente 97,3 % de l'eau de la planète (1962200000 Km³).

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure le globe, sa composition varie fortement selon l'altitude.

La diversité des écosystèmes cache l'inégalité répartition de la biodiversité. 12 pays recèlent 70 % des espèces vivantes de la planète. Les scientifiques ont aussi défini des « hot spots= zones névralgiques de biodiversité » au nombre de 18 qui n'occupent que 0,5% des terres émergées. Ils contiennent pourtant 49955 espèces plantes (végétaux supérieurs) endémiques, soit 20% des plantes connues.

Dans le domaine marin côtier on parle de plus en plus du concept de large marins écosystèmes (LME) qui sont des régions d'environ 200000 km²

caractérisée par une certaine identité du point de vue de l'hydrologie, la bathymétrie, la productivité et des relations trophiques. Les 50 LME identifiés à l'échelle mondiale produisent 95% des prises annuelles de poissons.

2. Classification de la productivité primaire des continents :

On peut classer comme les écosystèmes qui couvrent la surface des continents

*Silva (forêts de tous types 42.10^6Km^2 , soit 28,5%

*Saltus (Steppes, prairies et pâturages permanents naturels ou anthropogènes) : $37 10^6 \text{Km}^2$, soit 25%.

*Ager (cultures) : $15 10^6 \text{Km}^2$, soit 10%.

*Desrtus (déserts ou semi déserts naturels ou artificiels, surfaces occupées par les localités et industries humaines, zones enneigées en permanence, principalement du continent antarctique) environ 42.10^6Km^2 , soit 31%.

*Toundra (semi déserts sur pergétisol) : environ $8 10^6 \text{Km}^2$, soit 5,5%.

L'efficacité optimale de la photosynthèse est faible ; en moyenne de 1% de l'énergie solaire annuelle incidente est retenue par la surface chlorophyllienne, mais l'efficacité varié en fonction des différents types d'écosystèmes, parce que la surface assimilatrice est fort variable, parce que sous de nombreux climats, beaucoup de végétaux perdent leurs organes assimilateurs pendant une partie plus ou moins longue de l'année. Ainsi en moyenne seulement 0,3% de la radiation solaire globale annuelle est utilisée, soit 0,6% de la radiation photosynthétiquement active (RPA).

III.3. La phénologie

1. Définition

La phénologie est l'étude de la stratification de la biocénose dans l'espace et dans le temps ou les différentes fluctuations, autrement dit la phénologie est l'étude du rôle joué par les climats dans certains phénomènes végétaux (et animaux !) liés aux saisons. La phénologie peut être définie comme la répartition dans le temps des étapes clés du cycle de vie d'une espèce, en synchronie avec les variations de son environnement (température, durée du jour, humidité...).

En effet, l'interdépendance des organismes ou point de vue de la place qu'ils occupent dans la biocénose conduit à la structure particulière de l'écosystème forêt organisé en strates : deux strates ligneuses dominant, l'une arborescente, l'autre arbustive ; leur couvert crée un microclimat (température, lumière, humidité) auquel sont adaptées la strate herbacée et la strate muscinale. Cette stratification correspond à une utilisation rationnelle de l'énergie solaire.

2. Méthodes

En pratique, il s'agit de disséquer et de comprendre la relation entre les saisons et la nature. Une thématique d'actualité. Elle s'observe également au niveau des organes souterrains ou elle répond à une exploitation rationnelle des minéraux du sol. Les racines de certaines plantes n'exploitent que la zone superficielle du sol, d'autres descendent plus profondément j'usqu'à atteindre la roche mère : telles les plantes ligneuses. Un autre caractère structural est la succession dans le temps de phases de développement en rapport avec l'évolution du couvert forestier. Cette succession des vagues de floraison ou de végétation, que l'on appelle aussi « phénophases », s'observe le plus nettement dans les forêts établies sur sols frais et riches en éléments minéraux. C'est dans telles conditions , que se développe le mieux un groupe socio écologique de plantes « vernaales= de printemps », caractérisées par un cycle biologique relativement (fluctuations saisonnières) , en effet , la richesse du milieu permet à ces plantes printanières d'accumuler pendant la courte période de végétation des réserves alimentaires suffisantes pour le printemps suivant telle est le cas par exemple la ficairie (*Ranunculus ficaria*) qui développe ses feuilles dès le mois de février-mars, est la première avec l'Anémone Sylvie (*Anemone nemorosa*) à fleurir la forêt puis se succèdent sous les frondaisons confluentes la primevère (*Primula elatior*), la cardamine (*cardamine pratensis*), la violette des bois (*viola silvestris*). En été lorsque le couvert approche de sa plus grande densité, on assiste à la floraison estivale du Lamier jaune (*Lamium galeobdolon*) puis des graminées forestières (*Millium effusum*, *Deschamia caespitosa*). Le lierre (*Hedera helix*), ayant conservé le rythme tropical de la famille des Araliacées fleurit en automne. Les phénophases les plus importantes pour la forêt caducifoliée sont celles qui correspondent à la période de floraison de chaque essence forestière, puisque de la longueur de cette période dépend la qualité de matière assimilée. **WHITE et al, 1997.**

Il suffit de faire des moyennes pour l'ensemble du couvert forestier afin de distinguer une phénophase feuillée et une autre défeuillée, ainsi dans la chênaie à charme, la phénophase feuillée est d'environ 200 jours, et la défeuillée de 165 jours.

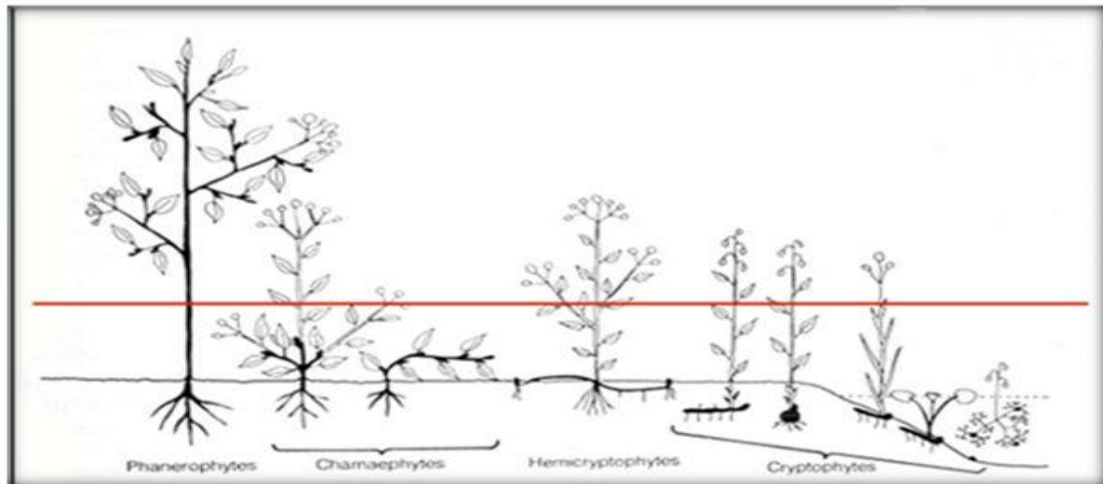


Figure 11 Les types biologiques selon la classification de Raunkiaer, 1934.

3. Les types biologiques des végétaux

La végétation est caractérisée par sa physionomie et ses variations qui sont les résultats des types biologiques qui la composent. Cette physionomie peut être exprimée par le spectre biologique qui est la proportion des divers types biologiques. On distingue cinq types fondamentaux reconnus par Raunkiaer (1934).

Les phanérophytes et nanophanérophytes sont représentées par des plantes (arbres, arbustes, arbrisseaux et lianes) dépassant 25cm de hauteur.

Les chaméphytes sont formées de sous arbrisseaux, herbes et plantes subligneuses ne dépassant pas 25 cm de hauteur.

Les hemicytophytes regroupent les plantes basses à bourgeons pérennants situés au ras du sol.

Les géophytes constituent des plantes dont les organes de conservation sont souterrains (rhizomes, bulbes, tubercules).

Les thérophytes ou plantes annuelles passent la mauvaise saison à l'état de graine.

A ces types fondamentaux, on peut ajouter les hydrophytes ou plantes aquatiques à l'exception du plancton et les épiphytes arboricoles qui sont des plantes supérieures vivant sur les phanérophytes. Les types biologiques permettent de faire une appréciation qualitative de la végétation en rapport avec les conditions climatiques. Ils expriment, par le spectre biologique, l'adaptation aux divers milieux. Ainsi, le spectre biologique d'une forêt diffère de celui d'une végétation adventice par la prédominance des phanérophytes l'abondance des épiphytes et l'absence des géophytes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIDOUD A., 2003** - Fonctionnement des écosystèmes méditerranéens : Laboratoire d'Écologie Végétale, Université de Rennes 1 : 50p
- AUSSENAC G., 1970** - Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Annales des sciences forestières*, 1970, 27 (4), pp.383-399. HAL
- BARBAULT R., 2008** - Ecologie générale ; Structure et fonctionnement de la biosphère, 6ème édition. Dunod (Eds.), 390p, pp247 à 251.
- BOURLIERE F., 1973** - The comparative ecology of rain forest mammals in Africa and tropical America: some introductory remarks. Pp 279-292
- CABANETTES A. et RAPP M., 1981**- Biomasse minéralomasse et productivité d'un écosystème à pins pignons (*Pinus pinea* L.) du littoral méditerranéen. III croissance. *Acta botanica- Oecol.Plant.*, 2
- CLARK F. et ROSSWALL., - 1979** - Terrestrial nitrogen cycle *Ecological Bull.* 33.
- CLEMENT. B. et TOUFFET. J., 1980** - Réparation et évolution de la matière organique et des éléments biogènes dans la lande mésophile des Monts d'Arrée. *Bull. Ecol .t.11* (3), 307-314.
- DAJOZ R., 2006** - Précis d'écologie, Dunod (Ed.), 631p, pp 27 à 31.
- DANIEL CÔME., 1992** - Les végétaux et le froid Herman Editeurs Sciences et Arts 599p.
- DELWICHE C., 1970** - The nitrogen cycle, *Scientific American*, 223(3), 137-146.
- DOMMERGUES Y. et MANGENOT F., 1970** - Ecologie microbienne du sol. Masson Ed. Paris 796 p
- DUCHAUFOUR, Ph., 1984** - Pédologie. Masson, Collection "Abrégés", 220 pp
- DUVIGNEAUD P., 1980** - La synthèse écologique, Doin, 1980.
- DUVIGNEAUD P., 1982** : La synthèse écologique, Populations, communautés, Ecosystèmes Biosphère, Noosphère, 2eme édition, Paris, 380p.
- FRITZ S, 2003** - The global land cover for the year 2000, harmonization, mosaicing and production of the global land cover 2000 database (beta version).
- FRONTIER S ; PICHOD VIALE D ; LEPRETRE A ; DAVOULT D ; LUCZAK C ; 2008** - Ecosystèmes. Structure, Fonctionnement, Evolution, Dunod (Eds.), 558p.
- HANIFI N. et TOUFFET, J., 1989** - Régénération par les semences dans les Hautes Plaines steppiques algériennes. In : Actes du 16ème Congrès International des Herbages, Nice (France). pp. 1601-1602.
- IBRAHIM M., RAPP M., LOSSAINT P., 1982** - Economie de l'eau d'un écosystème à *Pinus pinea* L. du littoral méditerranéen. *Annales des sciences forestières*, 1982, 39 (3), pp.289-306.HAL.

- JUDICAEL M., 2006** - Effet des essences forestières sur la biodégradation des matières organiques : impact sur la dynamique et le cycle du carbone, et de l'azote des éléments minéraux. Thèse Doctorat, université de Nancy 1, 308p.
- LAABIR M., 2010** - Eutrophisation –Milieu marin –Micro algues toxiques et cycles biogéochimiques: Azote, Phosphore et silice. Equipe Ecologie du Plancton, Laboratoire Ecosystèmes Lagunaires, UMR UMII-CNRSN°51Pl. E. Bataillon, Montpellier.70p
- LAMOTTE M., 1969** - Représentation synthétique des aspects statiques et dynamiques de la structure trophique des écosystèmes. *In C.R. Acad. Sci., Paris, Ser.D, T. 268, pp 58-65*
- LOSSAINT P. et RAPP M., 1971** - Répartition de la matière organique, productivité et cycles des éléments minéraux dans des écosystèmes méditerranéens 597-617. In: Productivity of forest ecosystem (P. Duvignaud Ed). Paris UNESCO 1971 a
- LOSSAINT P et RAPP M., 1971-** le cycle de carbone dans les forêts de *Pinus halepensis* 213- 216 In : (P. Duvignaud Ed). Paris UNESCO 1971b
- MADGWICK M.A. et OVINGTON J.D., 1959** - The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plots. *Forestry, 32, 14-22*
MIRCEN journal, 1986, 2, 161- 176
- MOJZSIS S.J., HARRISON T M., PIDGEON R T., - 2001-** Oxygen isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the earth surface 4,300 myr ago. In *Nature, 409, n° 6817, pp. 178 – 181.*
- ODUM H.T. 1957** - Trophic structure and productivity in silver spring, Florida. In *Ecol. Monog; 27, pp.55-112.*
- ODUM, E.P., 1971-** Fundamentals of Ecology. Ecologie Doin 1971.
- OVINGTON J.D., 1968** - Plant biomass and productivity of prairie, savanne oakwod. *Ecol. Ogy 44 – 52 - 63*
- OZENDA P., 2002-** Perspectives pour un géobiologie des montagnes Presse Polytechniques et universitaires de romandes 195p
- OZENDA P., 1982** - Les végétaux dans la biosphère. Doin Editeurs. Paris. 431p.
- PENMAN H .L., 1970** - The Water Cycle *In Scient.Amer.223.n°3. pp 99-108*
- RAMADE F., 2002-** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement Paris, Dunod. 2002.
- RAMADE F., 2003** - Eléments d'écologie : Ecologie fondamentale: Paris, Mc Graw Hill, (1984), 3eme édition, Dunod, 2003.
- RAMADE F., 2009** - Eléments d'écologie. Ecologie fondamentale, 4ème édition. 688p

RAPP M., 1971- Cycle de la matière organique et des éléments minéraux dans quelques écosystèmes méditerranéens. Dynamique saisonnière de deux sols en climat tempéré. Edit. C. N. R. S. Paris VII, 253 p.

RODIN L.E. et BAZILEVICH N. I., 1967 - Production and mineral cycling in terrestrial vegetation, *Edimbourg, Oliver and Boyd*

SAVOIE J.M., 1988 - Bilan hydrique relation avec le comportement et la régénération du Hêtre. *Acta oecologica. Oecol. Plant.* 9.3. 285-300.

SKUJINS J et ALLEN M. F., 1986 - Use of Mycorrhizae for Land Rehabilitation

TEYSSÉDRE A., 2010- Les services écosystémiques, notion clé pour explorer et préserver le fonctionnement des socio-écosystèmes. *Regards et débats sur la biodiversité*, SFE, Regard n°4 octobre 2010. URL <http://www.gvm.jrc.it/glc2000>.

TURC, L., 1961 - Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron*, 12(1), 13-49.

WHITE, P.E. THORNTON, AND S.W. RUNNING., 1997- A continental phenology model for monitoring vegetation responses to inter annual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 217-234.