

III Les cycles biogéochimiques et leurs perturbations

L'interaction continue qui s'exerce entre facteurs abiotiques et organismes vivants d'un écosystème s'accompagne d'une circulation ininterrompue de matières entre biotope et biocénose sous forme de substances alternativement minérales et organiques.

Il existe donc un flux continu de matière qui circule entre les organismes vivants et le milieu ce qui a pour conséquence de faire passer de nombreux éléments de l'état organique à l'état minéral et inversement. Ce recyclage permanent plus ou moins rapide correspond au cycle biogéochimique.

Les cycles biogéochimiques représentent un mécanisme fondamental dans le maintien de l'homéostasie (stabilité) de la biosphère et contribue à assurer sa pérennité.

Les êtres vivants ont besoin d'une quarantaine d'éléments pour fabriquer leur protoplasme. Les plus importants ou éléments majeurs sont : le carbone, oxygène, hydrogène, le phosphore, le soufre dont l'importance est supérieure à 1 mg/kg. Et les oligo-éléments dont l'ordre d'importance est inférieure à 1 mg/kg. Les oligoéléments sont souvent à l'état de traces et ils sont aux nombres d'une trentaine. Leur absence entraîne une carence ; ils sont les constituants des vitamines ou enzymes (Tab.3.1.1). Les cycles biogéochimiques les plus importants intéressent les 04 éléments (C, N,P et S), un corps simple H₂O et divers oligo-éléments comme le calcium, le potassium, le sodium, le magnésium.

Ainsi, ces éléments sont sans cesse transformés en matière biochimiques (glucides, lipides, acides aminés ...etc.) par les végétaux autotrophes puis utilisés par les hétérotrophes puis par les microorganismes qui décomposent en dernier lieu (excréta ; détritux végétaux et cadavres) en éléments minéraux qui retournent dans le sol, les eaux et l'atmosphère. Ils seront repris par les autotrophes et ainsi de suite. Ce passage alternatif des éléments entre le milieu inorganique et matière vivante est désigné sous le terme de cycle biogéochimique.

Remarque : 7 autres oligo-éléments indispensables pour les animaux supérieurs ont été mis en évidence depuis plus d'une trentaine d'années ce sont : le cobalt ; le molybdène ; le sélénium ; le chrome ; le vanadium ; le fluor et le nickel.

Tableau 3.1.1: Composition chimique de la matière vivante chez l'homme et dans la luzerne comparée à la composition de l'écorce terrestre.

Eléments	Homme	Luzerne	Ecorce terrestre
Carbone	19,37	11,34	0,03
Hydrogène	9,31	8,72	0,14
Azote	5,14	0,825	0,005
Oxygène	62,81	77,35	46,60
Phosphore	0,63	0,71	0,12
Soufre	0,64	0,10	0,05
Total des éléments majeurs	97,90	99,05	46,945
Calcium	1,38	0,58	3,63
Sodium	0,26	0,03	2,40
Potassium	0,22	0,17	2,83
Magnésium	0,04	0,08	2,09
Chlore	0,18	0,07	0,02
Total des éléments biogènes	2,06	0,93	10,97
Fer	0,0050	0,0027	5,00
Silicium	0,0040	0,0093	27,72
Zinc	0,0025	0,0004	0,007
Rubidium	0,0009	0,0005	—
Cuivre	0,0004	0,0003	0,0045
Brome	0,0002	0,0001	—
Etain	0,0002	—	—
Manganèse	0,0001	0,0004	0,10
Iode	0,0001	—	—
Aluminium	0,0001	0,0025	8,13
Piomb	0,0001	—	0,001
Total des oligoéléments	0,0136	0,0162	40,9625

3.1 Le cycle de l'eau (= H₂O)

L'eau fait partie de notre environnement naturel tout comme l'air que nous respirons et la terre qui nous porte et nous nourrit ; elle constitue un des éléments familiers de notre vie quotidienne. L'eau est un élément essentiel et indispensable à la vie. Elle n'est pas uniquement source d'hydrogène et d'oxygène. Elle représente le constituant le plus abondant dans la matière vivante.

- L'homme : 65%
- Les champignons : 80%
- Certains végétaux : 95%

3.1.1. Répartition de l'eau dans la biosphère.

L'eau se rencontre dans les trois compartiments de la biosphère : atmosphère, hydrosphère, et la lithosphère. Et sous ses trois formes : gazeuses ; liquides et solides. Presque les $\frac{3}{4}$ de la surface terrestre sont recouverts par l'hydrosphère (soit 363 millions

km² sur un total de 510 millions de km²). Les océans représentent 97% de la masse totale présente dans la biosphère (Tab.3.1.2 et 3.1.3)

Tableau 3.1.2 : Estimation de la répartition de l'eau (HUTCHINSON, 1957)

Localisation ou forme	Millions de km ³
océans	1380
Roches sédimentaires	210
Calottes glaciaires	16.7
Eaux souterraines	0.25
Vapeurs d'eau atmosphérique	0.013

Tableau 3.1. 3 : Répartition de l'eau % total (BEAUMGARTNER et REICHEL, 1975).

Localisation ou forme	%
Océans	97.39
Eaux souterraines	2.01
Lacs et rivières	0.58
Atmosphère	0.02
Total	100
Dont eaux douces	2.6

3.1.2. Les mouvements de l'eau à la surface du globe :

L'évaporation nappes liquides (océans, lacs, oueds....etc.) se fait sous l'influence ou l'action de l'énergie solaire. Cette évaporation produit une humidité atmosphérique. Elle se condense sous forme de nuages. Après refroidissement de ces derniers, ils amènent les précipitations sous formes de pluies ou de neige. Les eaux de pluies sont absorbées par le sol (**infiltration**). Elles retournent vers les nappes phréatiques et superficielles. Ainsi, les 7/9 des précipitation retombent à la surface des océans et les 2/9 sur les continents. La majeure partie du cycle de l'eau (7/9) s'effectue donc entre l'océan et l'atmosphère. (Fig.3.1.1). Les eaux parvenues à la surface des écosystèmes terrestres vont être (Fig.3.1.1) :

- **Interception** : en effet, la végétation a une importante fonction écran. Elle intercepte et évapore dans l'atmosphère une partie des précipitations avant qu'elles ne parviennent au sol. Ainsi, dans les régions tempérées, **l'interception** peut atteindre 25 % des précipitations totales. L'eau, qui traverse le feuillage

pénètre directement s'égoutte ou s'écoule (ce qui a une importance capitale pour les petites biocénoses distribuées en surface des troncs, feuillages etc.)

- **Evapotranspiration** : on appelle évapotranspiration la quantité d'eau évaporée physiquement additionnée à celle qui est transpirée biologiquement. La quantité d'eau transpirée par les plantes est généralement grande d'autant plus grande que leur alimentation en eau est meilleure. Ainsi, un Bouleau évapore par jour 75 l d'eau ; un Hêtre 100 l/j ; un hectare de forêt évapore 20 à 50000 l/j. Cette évapotranspiration du couvert végétal vaporise chaque année des quantités considérable d'eau. Egalement, une culture qui produit 20 T de matière végétale à l'hectare (poids frais) nécessite l'utilisation de 2000 t d'eau (au minimum). Par ailleurs, dans le Bassin du Congo, il a été montré que la majeure partie de l'apport pluvial est assurée par l'évapotranspiration de sorte que le bassin vit en économie fermée (Fig.3.1.2)
- **La percolation ou infiltration** joue un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres. Elle assure la réhydratation des sols qui emmagasinent l'eau surtout dans les couches superficielles riches en humus et en matière vivante. Les mousses par exemple jouent un rôle important dans le processus de rétention de l'eau dans les sols forestiers. L'infiltration assure aussi l'alimentation des nappes phréatiques (Fig.3.1) et des rivières souterraines.
- **Le ruissellement** est le dernier agent du cycle de l'eau en milieu continental. Ce paramètre varie en sens inverse de l'ETP et de la percolation. En effet, il augmente par la destruction du couvert végétal. Il représente l'agent principal de l'érosion des sols. L'eau perdue par ruissellement est d'autant plus grande que la pente est importante et que le couvert végétal est faible.

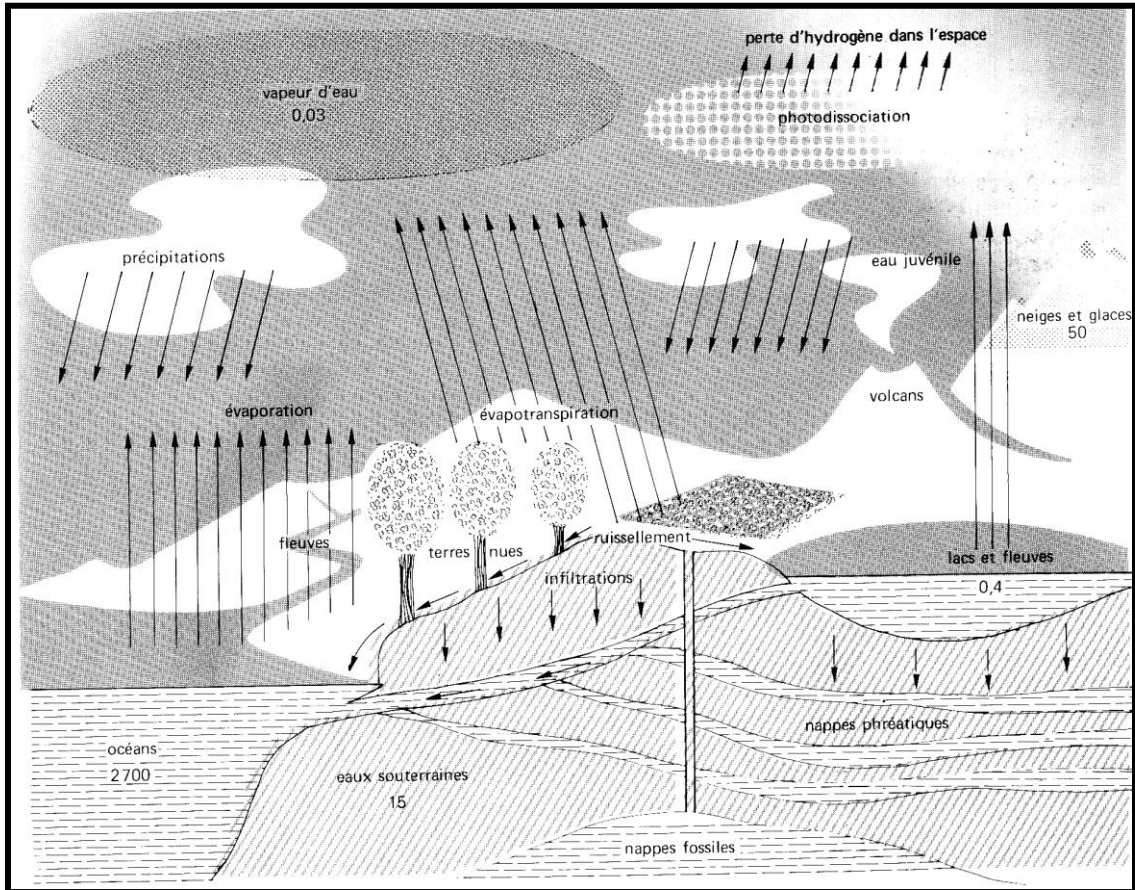
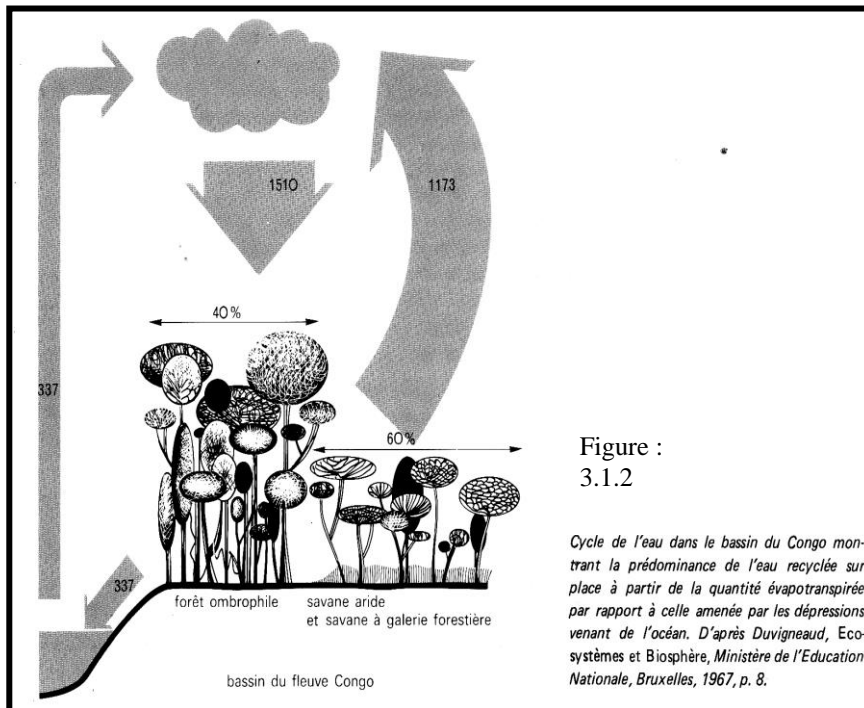


Figure 3.1.1 : Schéma général du cycle de l'eau (in



3.2. Cycle du Carbone (C)

3.2.1. Introduction.

- Le carbone est l'élément essentiel primordial de toutes les substances organiques. Le carbone constitue l'élément biogène primordial : élément central de la chimie organique.
- La photosynthèse, chez les plantes vertes, fixe le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air dans les cellules de la plante ; et c'est là que les organismes hétérotrophes s'approvisionnent pour leurs besoins en carbone. Le cycle du carbone s'effectue entre le gaz carbonique et les êtres vivants. La source du carbone est sous forme de CO_2 pour tous les organismes vivants.
- C'est le plus parfait des cycles biogéochimiques par la suite de la grande vitesse à laquelle cet élément circule entre les divers milieux inorganiques et à l'intérieur des communautés des êtres vivants par les réseaux trophiques.
- Il est sous deux formes minérales prépondérantes
 - a) L'état de carbonates (roches, dépôts...etc.
 - b) A l'état gazeux CO_2 , qui représente la forme circulante du carbone organique.

3.2.2. Le cycle proprement dit (Fig. 3.2.1)

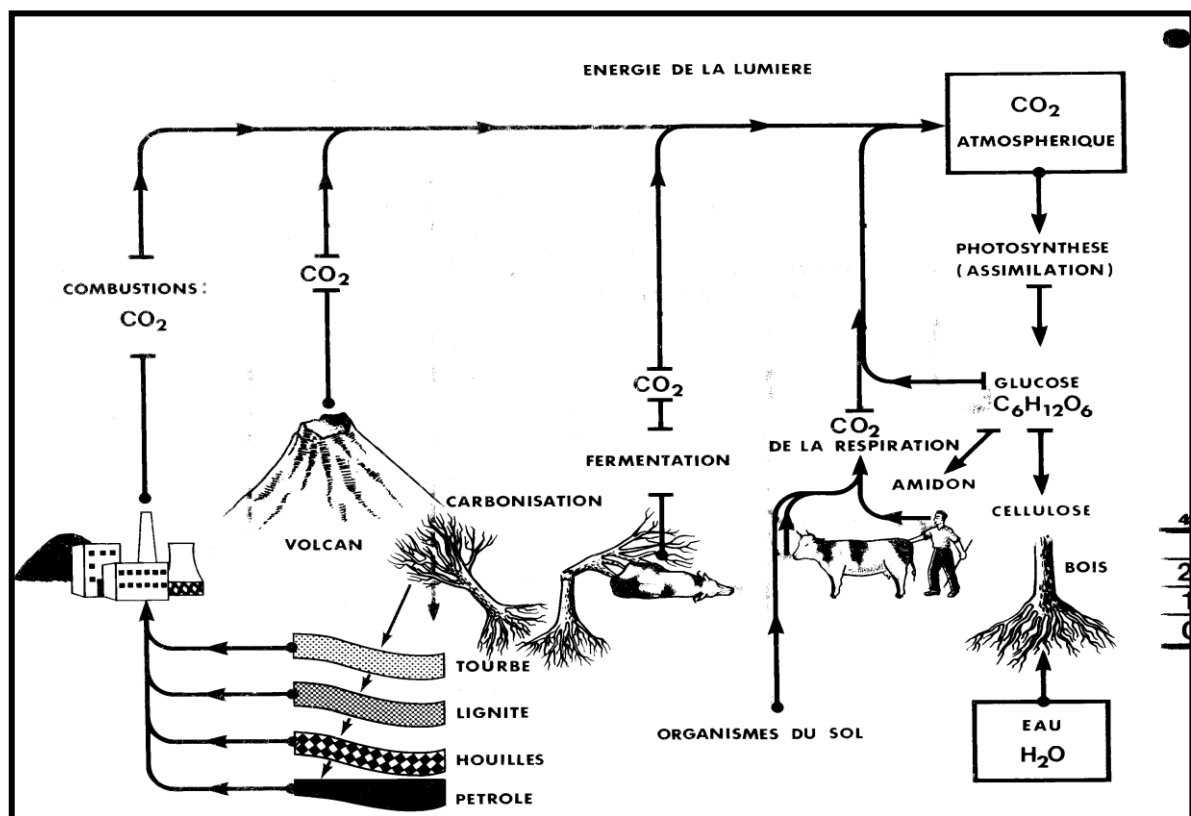
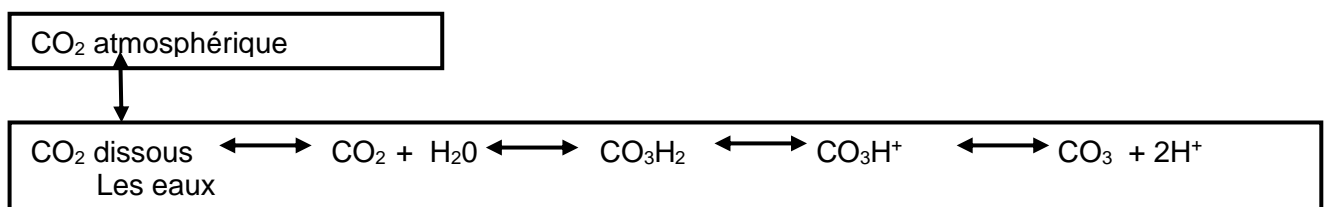
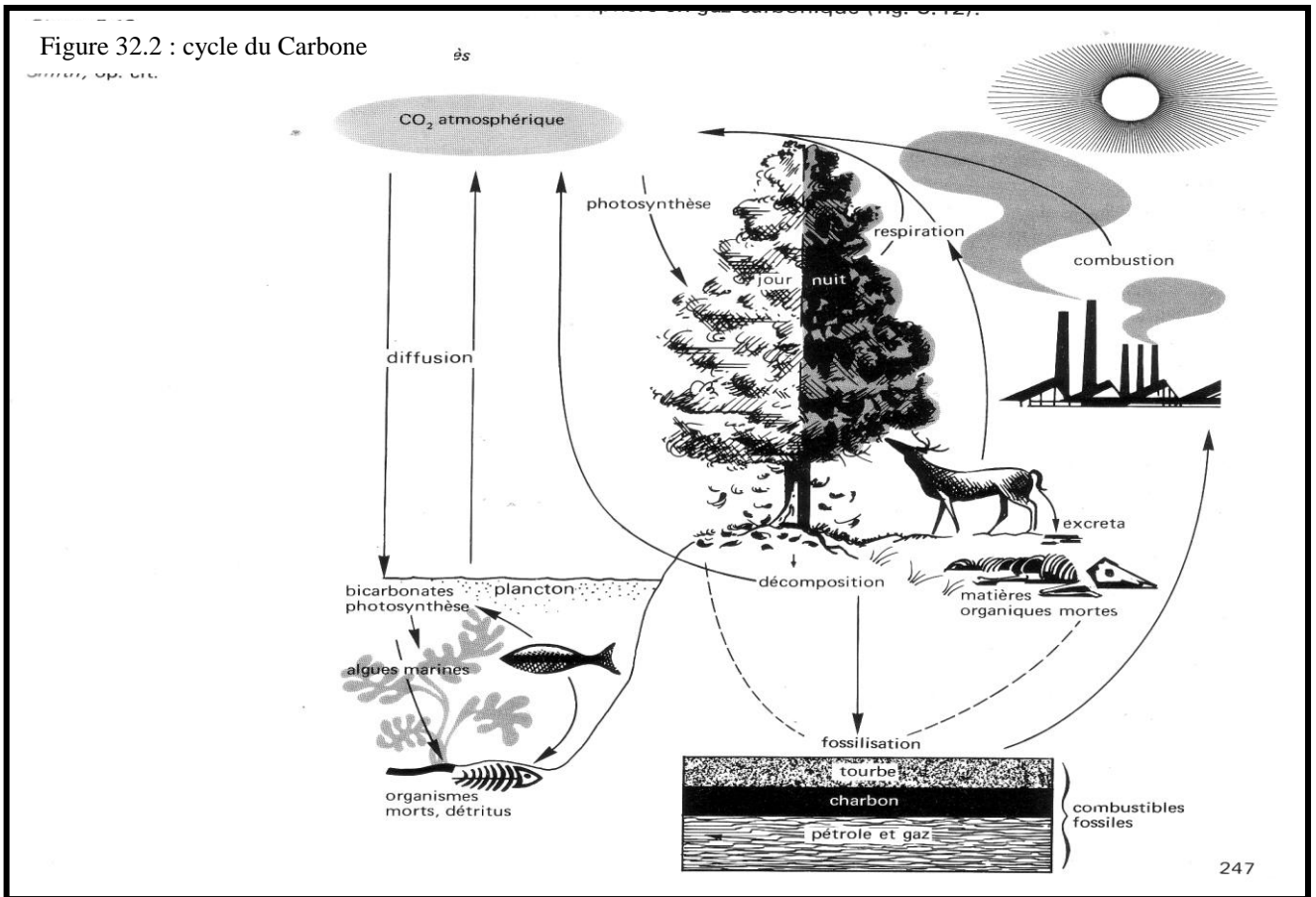


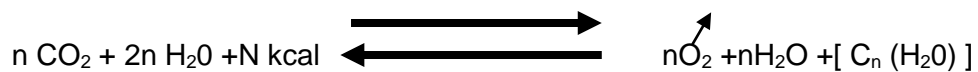
Figure 3.2.1: Cycle du carbone et oxygène

- a) Deux phénomènes biologiques fondamentaux conditionnent la circulation du carbone dans la biosphère :
- La photosynthèse (absorption du CO_2 et rejet d' O_2)
 - La respiration (rejet d' CO_2 et absorption d' O_2)
- b) L'atmosphère renferme 340 ppm d'anhydride carbonique seulement, malgré cette faible concentration, c'est au dépens de ce gaz carbonique atmosphérique que les végétaux autotrophes assurent toute la production primaire des continents. Ainsi, à l'échelle de toute la biosphère cette production a été estimée à quelques 164 milliards de tonnes/an de matières organiques sèches (WHITTAKER et LIKENS, 1975), cela correspond à plusieurs dizaines de milliards de tonnes fixées annuellement par la photosynthèse.
- c) Comme le taux de gaz carbonique atmosphérique demeure constant au cours des temps (approximativement) ; cela suppose une grande mobilité du carbone et la présence d'un autre réservoir que l'atmosphère qui joue un rôle régulateur dans la circulation du gaz carbonique.
- d) L'océan représente ce réservoir : la teneur en CO_2 dissous est équivalente à 50 fois la masse totale du CO_2 atmosphérique.
- e) Les échanges de CO_2 entre l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère se traduisent par l'ensemble des réactions (Fig. 3.2.2) suivantes :





- f) L'anhydride carbonique atmosphérique et celui dissous dans les eaux constituent l'unique source de carbone inorganique à partir de laquelle toutes les substances biochimiques constituant la cellule vivante grâce à l'assimilation chlorophyllienne. Si nous considérons l'équation photosynthétique et celle de la respiration dans le cas des glucides nous avons :



- g) 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 équimoléculaires (Fig. 3.2.3)

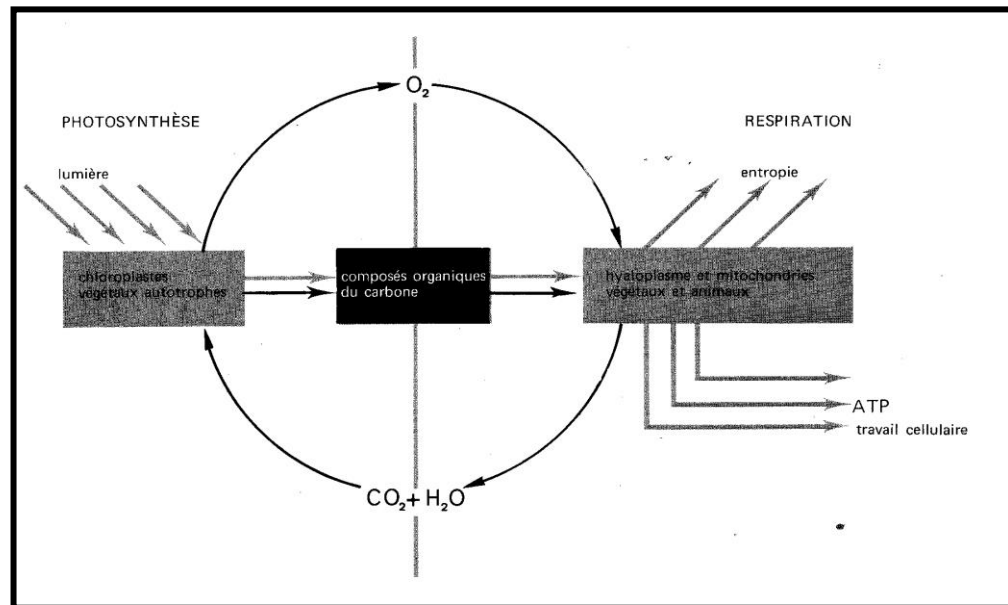


Figure 3.2.3: Cycle de la matière et flux de l'énergie au niveau cellulaire. Remarquer l'exacte complémentarité de la photosynthèse et de la respiration en ce qui concerne la circulation des éléments.

- h) 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. Détritus végétaux, plantes mortes, excréta et cadavres représentent une fraction importante des productions primaires et secondaires. Ces substances organiques résiduelles subissent une dégradation oxydative, dont les nombreux saprophytes (tels les vers de terre) et bactéries du sol sont les agents actifs, qui décomposent et les minéralisent par voie aérobie. Il existe aussi, cependant, une voie anaérobie, celle des fermentations, qui conduit à une décomposition partielle des substrats avec dégagement de gaz carbonique.
- i) En milieu terrestre, il se produit souvent un ralentissement du cycle du carbone. Ainsi, les matières organiques ne sont pas entièrement minéralisées mais transformées en un ensemble complexe de composés organiques acides formant une masse de couleur sombre, que l'on dénomme l'humus. Associé aux argiles, celui-ci constitue le complexe absorbant du sol, qui joue un rôle fondamental dans la rétention et la circulation des sels minéraux nutritifs. C'est donc un agent essentiel de la fertilité des sols.
- j) Dans diverses circonstances, les matières organiques ne sont pas entièrement minéralisées par voie aérobie et s'accumulent dans diverses formations sédimentaires. Il se produit une stagnation, sinon un blocage du cycle du carbone,

dont la formation de tourbe constitue un exemple actuel. C'est ainsi, que dans le passé, se sont constitués les formidables dépôts de charbon, de pétrole et autres hydrocarbures fossiles ou de calcaire en milieu aquatique, ce qui représente aussi une forme de stagnation du cycle du carbone.

- k) L'ensemble de ces phénomènes correspond à un épicycle de la circulation générale du carbone dans la biosphère. On peut donc considérer, en conclusion, que depuis le début du quaternaire jusqu'à l'avènement de la société industrielle moderne, que le cycle du carbone dans la biosphère était pratiquement parfait. La plupart de la production primaire annuelle, était décomposée par la respiration des autotrophes et hétérotrophes et le gaz carbonique rejeté compensait de façon quasi rigoureuse la quantité de gaz carbonique retirée de l'atmosphère par la photosynthèse.

3.2.3 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.

3.3. Le Cycle de l'azote (N₂) :

3.3.1 Introduction :

L'azote est un composant essentiel des protéines et des acides nucléiques. Ce sont les éléments de bases très complexes et indispensables à la matière vivante. Les acides nucléiques déterminent les caractéristiques héréditaires et, par le biais de la synthèse protéique, l'individualité biochimique de toutes les plantes, animaux et microorganismes.

3.3.2 Cycle :

- a) C'est certainement un des cycles le plus complexe et le plus parfait à la fois. Il y a une activité ininterrompue des microorganismes qui ramènent l'azote au sein des différentes divisions biologiques (3.3.1) ;

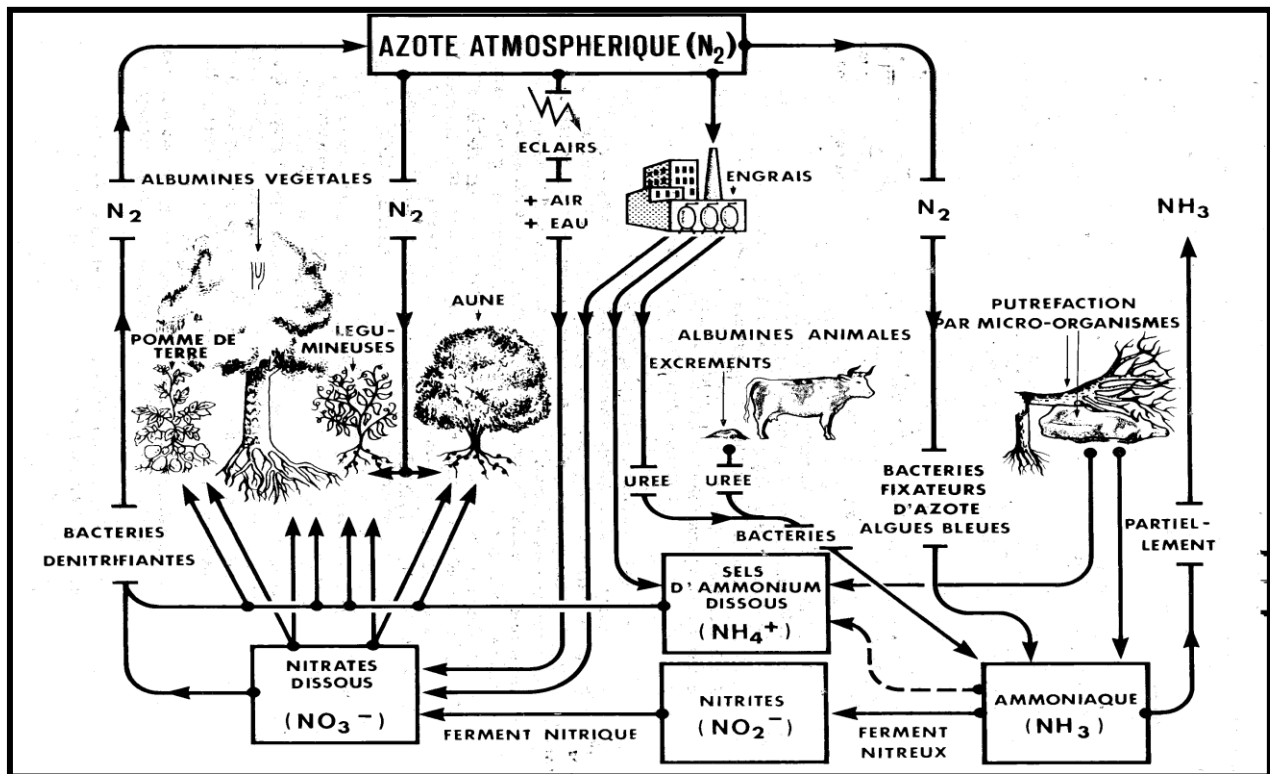


Figure 3.3.1. : Cycle de l'azote.

b) Malgré sa très grande complexité, le cycle fonctionne bien et rapidement. L'air qui contient 79% de N_2 est à la fois le grand réservoir et la soupape de sûreté du système. Il alimente constamment le cycle de plusieurs façons :

- i. La voie inorganique : les décharges électriques qui se produisent lors des orages synthétisent, à partir du N_2 et du O_2 de l'air, des oxydes d'azote, qui sont amenés au sol par les pluies ; une fixation photosynthétique de N peut être aussi avoir lieu ; ainsi il a été estimé de 1 à 10 kg d'azote nitreux ou nitrique pouvant être fournis à l'écosystème par ha et par an. Il existe aussi un apport d'azote par le volcanisme.
- ii. La voie organique : c'est par la voie biologique que la plus grande quantité d'azote rentre dans la biosphère. En effet, l'azote atmosphérique ne peut être utilisé sous forme moléculaire que par de rares organismes bactériens fixatrices d'azote et les Cyanophycées (algues bleues). Ces bactéries sont soit :
 - a. Aérobies (libres) tel Azotobacter ;
 - b. Anaérobies (libres) tel Clostridium
 - c. Photosynthétiques (libres) tel Rhodospirillum,

- d. Symbiotiques (fixées aux légumineuses) tel Rhizobium (sont de puissants fixateurs d'azote.

La quantité fixée biologiquement est de 44 millions de tonnes de N/ha/an au niveau des continents et 10 millions de tonnes de N/ha/an au niveau des océans par les Cyanophycées (Trichodesmum, Nostoc, Anabena...etc.) et diverses bactéries nitrifiantes.

- c) L'azote ainsi élaboré par ces nombreux microorganismes terrestres et aquatiques est absorbé par les végétaux et transformé en acides aminés puis en protéines et il se transmet ainsi dans tous les niveaux trophiques (les végétaux ne peuvent souvent utiliser l'azote que sous forme nitrique ou ammoniacale).
- d) Comme les végétaux utilisent l'azote que sous forme nitrique ou ammoniacale donc l'azote organique (matière organique) est minéralisée sous l'action des microorganismes hétérotrophes qui agissent à la suite les uns des autres et qui appartiennent au groupe des décomposeurs (fig. 3.3.2).
- e) Ces substances nitrites et nitrates sont absorbées sous cette forme par les plantes et transformées en AA et protéines et ainsi de suite...
- f) Lorsqu'il y a un excédent de nitrates des bactéries de la dénitrification (Pseudomonas) font retourner l'azote moléculaire à l'atmosphère en décomposant les nitrates. On estime à 43 millions de tonnes de N/ha/an la quantité ainsi rendue à l'atmosphère.

3.2.3 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 6 ans ; 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 N 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 en azote telle l'urée) sont évacués dans les rivières, les lacs et la mer ; ils provoquent l'eutrophisation.

Ainsi, cette eutrophisation (pollution organique) nuit 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 ce qui 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.

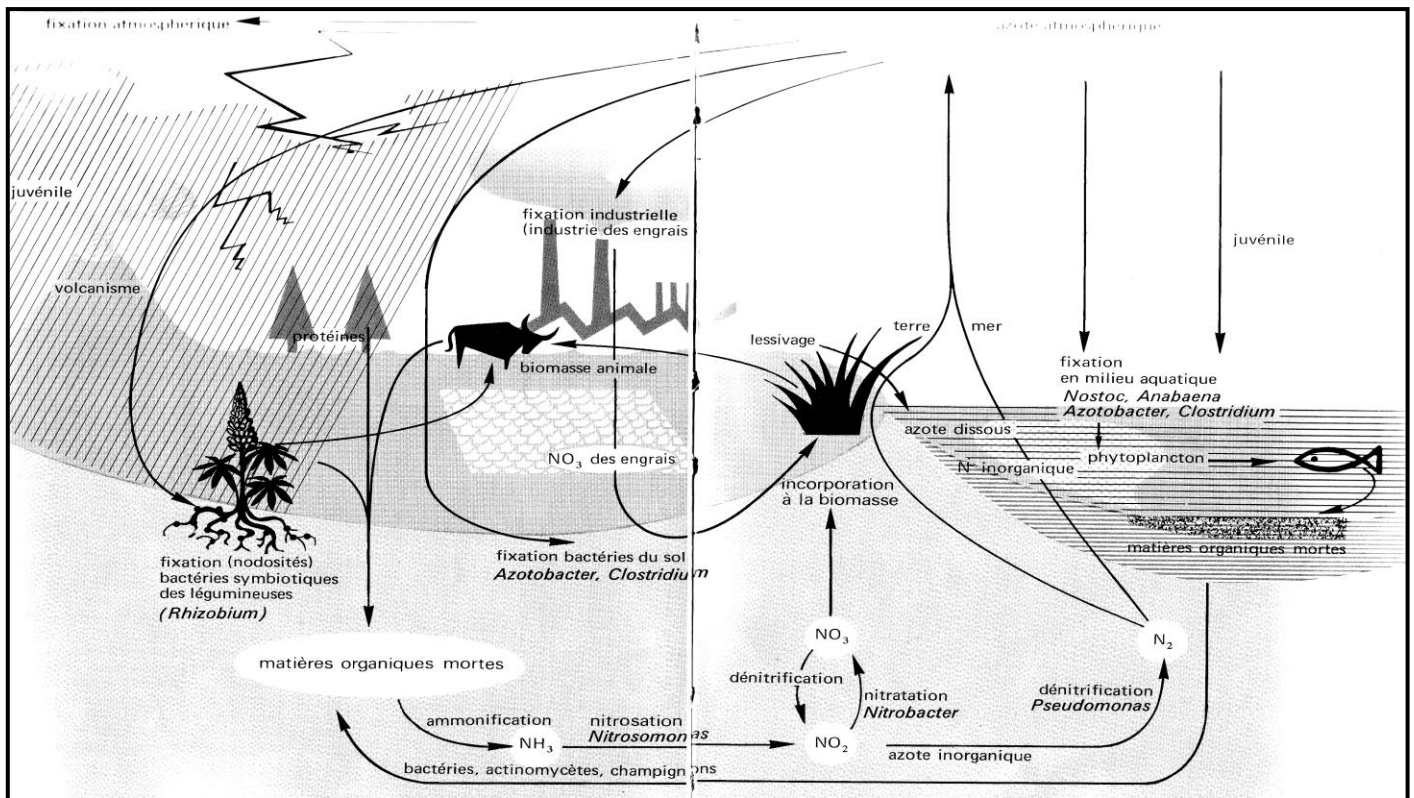


Figure 3.3.2 : Cycle de l'azote. (Etapes de la décomposition de MO ramenant l'azote dans l'écosystème ou la dénitrification en présence de microorganismes) (D'après Ramade, 1984).

3.4. Cycle du soufre

3.4.1 Introduction :

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... etc.) il participe à la structure tertiaire.

3.4.2 Cycle :

- Le soufre est en majeure partie d'origine sédimentaire ; même si on le trouve de plus en plus sous forme gazeuse conséquence de la combustion (Figure 3.4.1)
- Les microorganismes jouent un rôle déterminant à différents niveaux du cycle (selon le pH, présence absence de lumière, présence absence d'oxygène) (Fig. 3.4.2 et Fig. 3.4.3)

Figure 3.4.1 : Le Cycle du Soufre

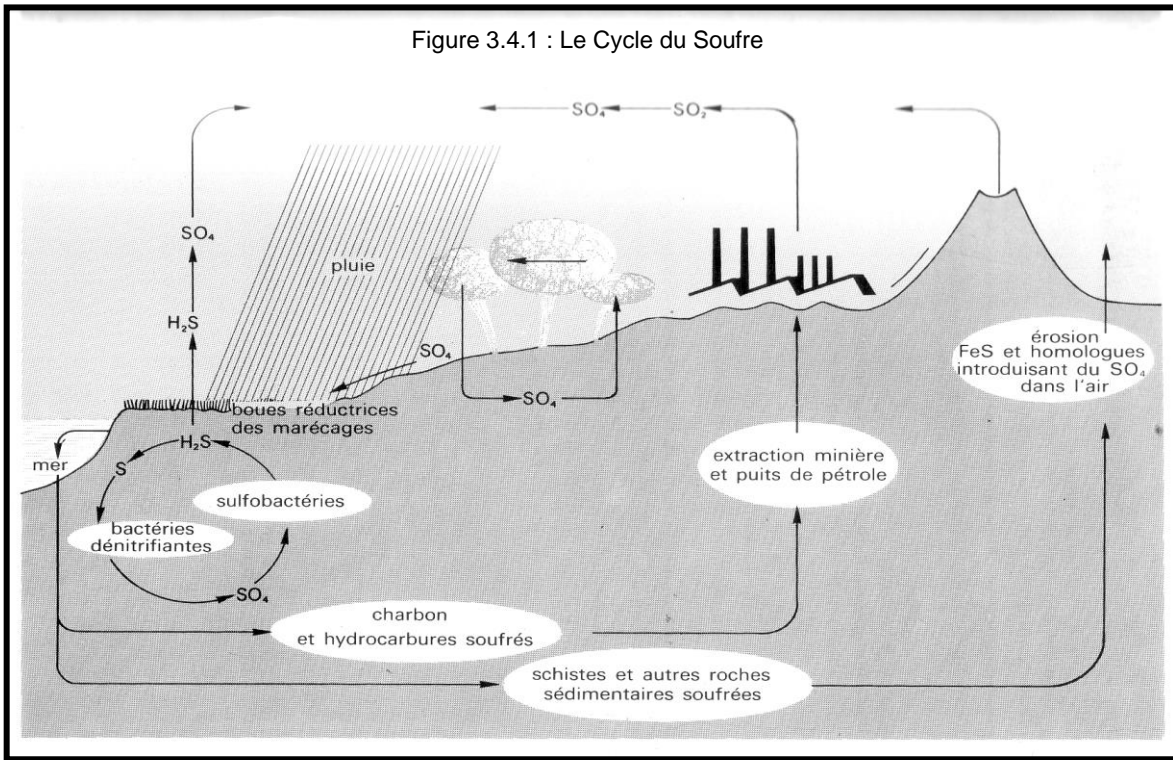
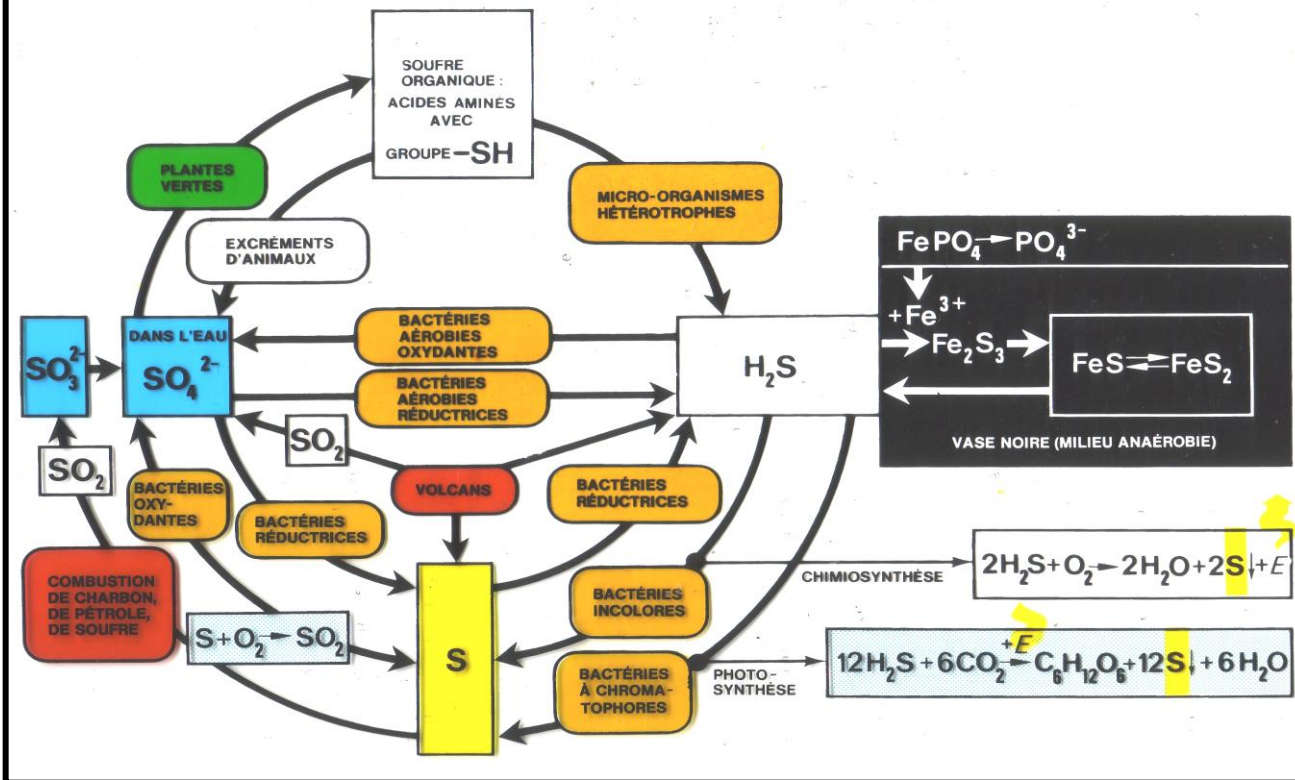


Figure 3.4.2 : Cycle du Soufre montrant la participation des microorganismes et aussi la libération du phosphore

CYCLE DU SOUFRE



c) Les autotrophes absorbent l'ion sulfate pour élaborer les acides aminés soufrés (méthionine, cystine cystéine... kératine...etc., qui ont un rôle dans les ponts disulfurés : rôle dans la structure tertiaire). Le soufre organique ainsi constitué va se retrouver à chaque maillon de la chaîne trophique. La matière organique morte ainsi que les excréments fournissent à nouveau des ions sulfates à l'environnement et ainsi de suite...

d) Comment se forme l'ion sulfate ?

- 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 (fig. 3.4.2) ou même d'hydrogène sulfuré (H_2S) gaz qui s'échappe des sédiments anaérobies profonds, réintégrant ainsi le cycle. Le H_2S , gaz mal odorant très toxique, s'oxyde pour donner du soufre. Cette réaction se produit pendant la chimiosynthèse (1), au cours de laquelle une certaine énergie se libère. Cette énergie est alors utilisée par les bactéries pour élaborer leurs propres substances organiques. Grâce à un processus de photosynthèse (2), des microorganismes pigmentés parviennent à participer à une assimilation d'acide carbonique et à oxyder H_2S , 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 ;
- En milieu anaérobie : aux endroits où on rencontre des ions sulfates dans des conditions anaérobies, par exemple dans la vase noire (Fig. 3.4.2) sous la couche superficielle de flaques et de boue, les bactéries réductrices transforment les sels en H_2S . Ce gaz remonte et est à son tour oxydé ;

e) l'autre importance que revêt le cycle du soufre, est l'influence positive qu'il exerce sur le cycle du phosphore (Fig. 3.4.2). 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.

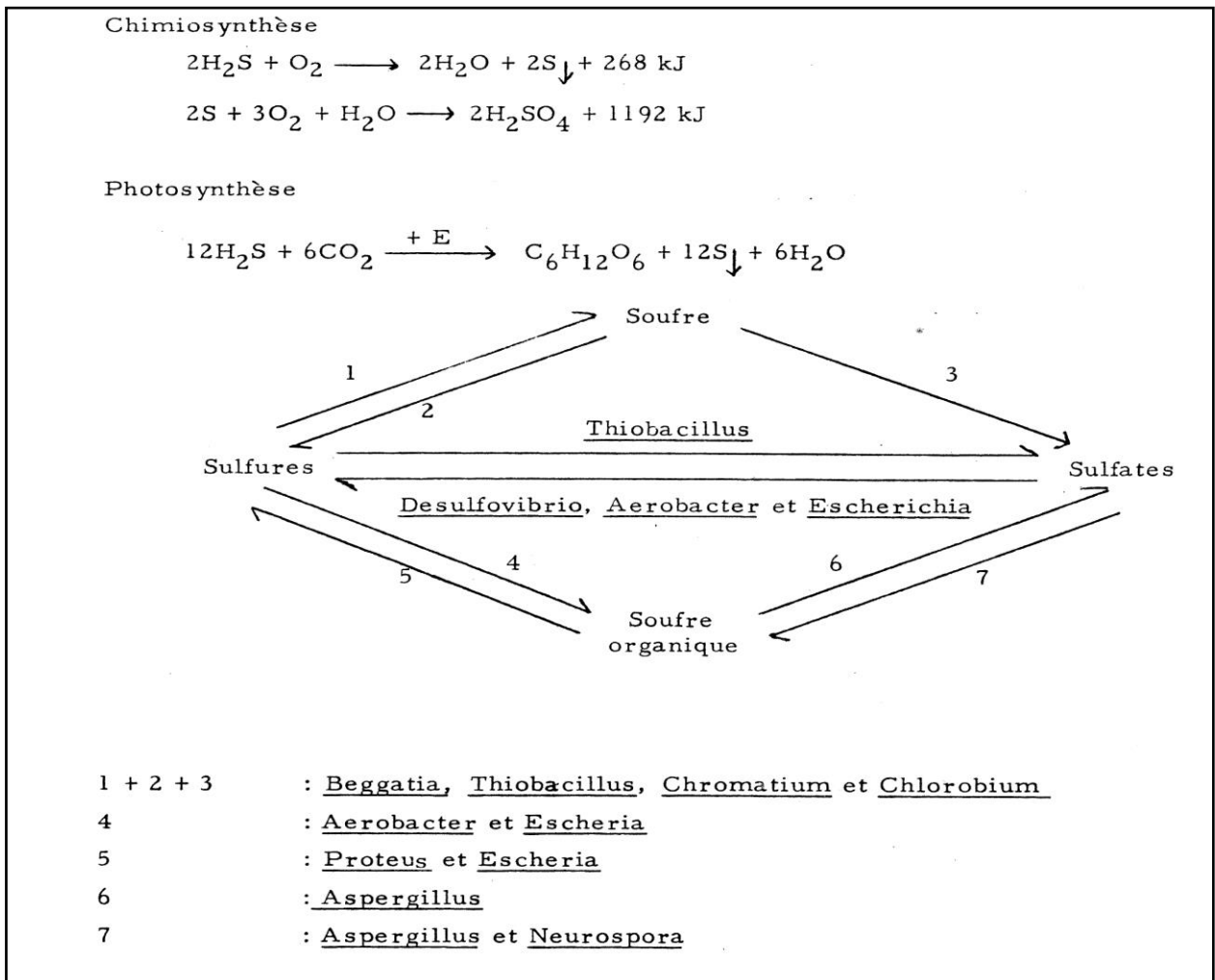


Figure 3.4.3 : schéma des réactions chimiques lors du cycle du soufre. Et les microorganismes qui y participent.

3.4.3. Action de l'homme.

Le dioxyde de soufre (SO_2) qui normalement ne constitue qu'une phase momentanée au sein de la fraction gazeuse du milieu est devenue de plus en plus important au cours de la dernière décennie. Ceci est dû à l'augmentation de l'oxydation de combustion qui a élevé sa concentration dans l'atmosphère. Ce qui a pour conséquence les neiges et les pluies sont plus acides:

- a) Dans le sol cela entraîne une augmentation du lessivage qui mène vers la podzolisation des sols. Ce qui entraîne un appauvrissement des sols et par conséquent diminue la productivité des écosystèmes forestiers. L'exemple en Suède montre que les pluies ont atteint un pH de 4,5 ; elles ont été enrichies en H_2SO_4 à cause des émissions de gaz riches en SO_2 ce qui a provoqué :
- l'appauvrissement des sols suivi d'une diminution de la productivité des écosystèmes forestiers d'essence résineux
- b) Dans l'eau l'abaissement du pH est une menace sérieuse pour la vie aquatique ainsi, le Saumon est éliminé à un pH inférieur à 5,3

3.5. Cycle du Phosphore

3.5.1. Introduction.

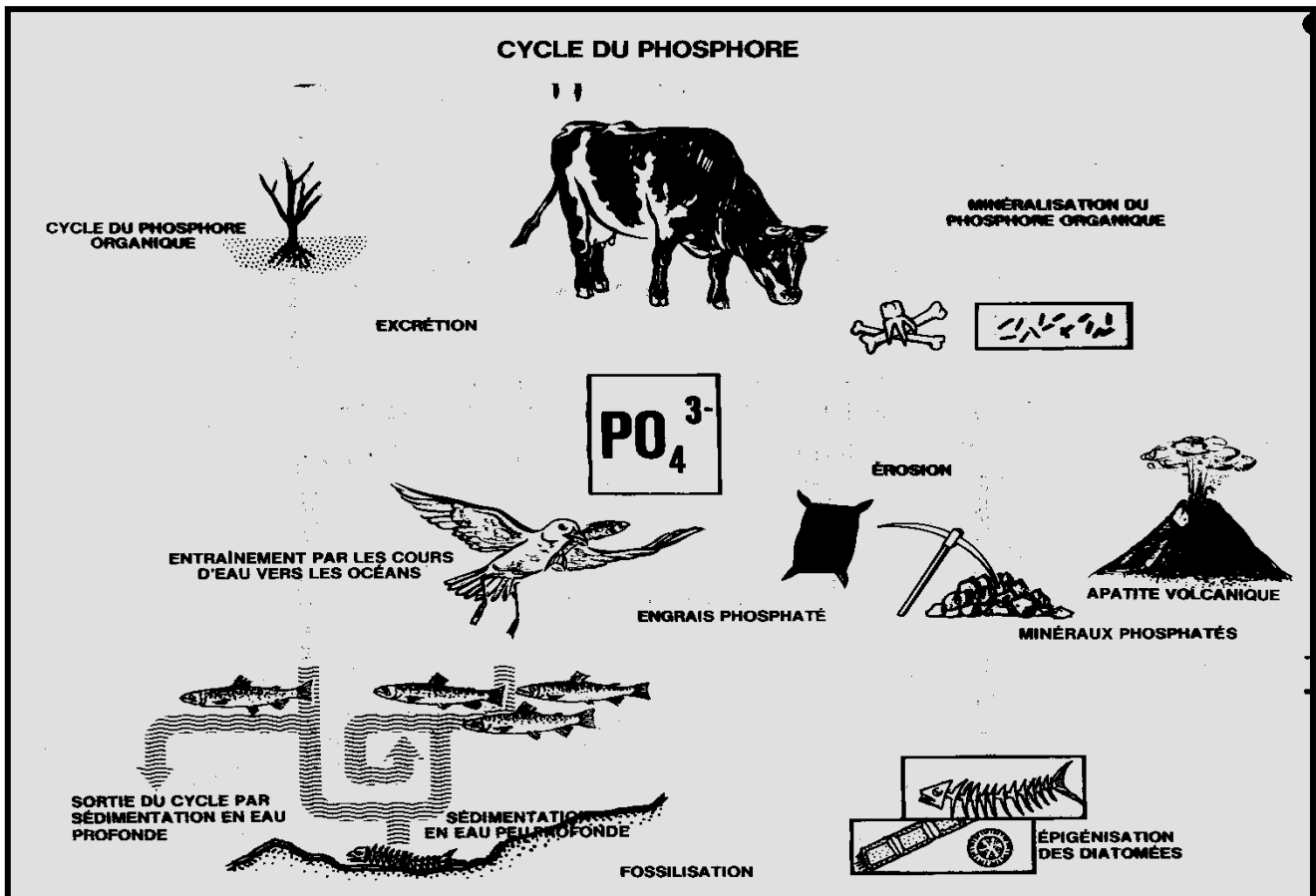
Le phosphore constitue un des composants essentiels de la matière vivante. Il se rencontre à des taux relativement élevés. En effet, il a une grande importance du point de vue biologique, on le trouve dans diverses molécules phosphorylées tels que les nucléotides ou encore les phospholipides...etc.

3.5.2. Le cycle proprement dit

- i. 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. 3.5.1).
- ii. 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 !
Les oiseaux marins qui nichent sur les rochers côtiers mais qui vont chercher leur nourriture en mer (tel les Cormorans), 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 (60000 t/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.



3.6. Cycle des cations biogènes

3.6.1. Introduction

Nous avons passé en revue les cycles des nutriments minéraux qui forment la quasi-totalité de la matière des êtres vivants. Cependant ces derniers ne peuvent pas vivre s'ils ne contiennent pas des quantités suffisantes de certains cations :

- K (potassium); Ca (=calcium) ; Mg (=magnésium), (parfois Na) ce sont les macro éléments minéraux ou poly nutriments parce qu'ils sont nécessaires en grandes quantités ;
- Fe (=fer) ; Mn (=manganèse) ou mésonutriments ;
- B (=bore) ;Zn (=zinc) ; Cu (=cuivre); Mo (molybdène) ; V (=vanadium)et l'anion Cl (=chlore) ce sont les oligoéléments ou oligonutriments ; il ne faut que de faibles quantités (ppm). Certains de ces éléments sont nécessaires à la plantes et non au animaux et vis-versa : exemple le Na (sodium) est nécessaire aux animaux (pompe à Na/K)et non aux plantes.

3.6.2. Le cycle proprement dit

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 ils sont distribués dans les divers organes des 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 cadavres 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 écorce des arbres (Fig.3.6.1)

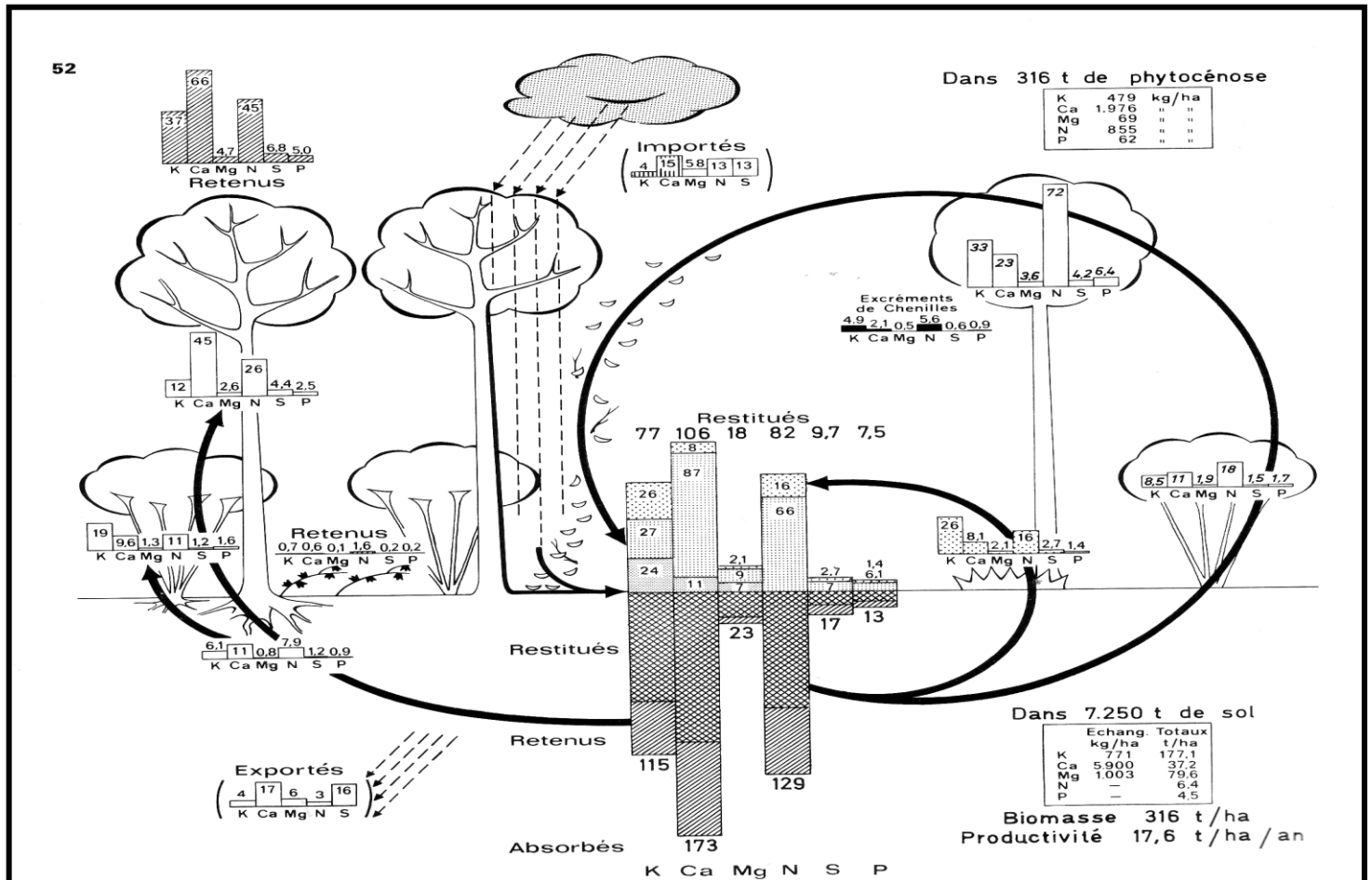


Figure 3.6.1 : Cycle annuel (kg/ha/an) des polyéléments dans une chênaie –Coudraie (Querceto-Coryletum) (Duvignaud, Denaeyer *et al.*, 1971)

3.6.3 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 précédant on passe à une végétation à biomasse réduite de lande ou de pelouse.

3.7. Transferts 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 exemples des écosystèmes forestiers, qui présentent un maximum de complexité.

1) le cycle biologique (Fig. 3.7.1)

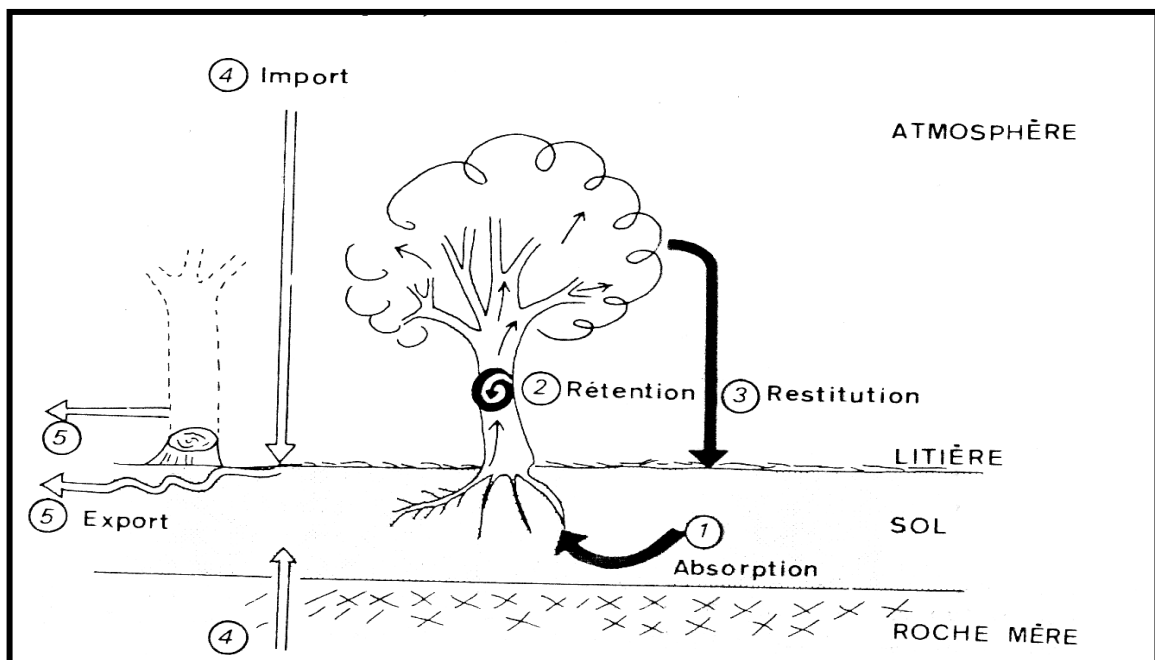


Figure 3.11 : Représentation schématique des principales composantes du cycle des éléments dans les écosystèmes.

En noir, composantes biologiques du cycle annuel. En blanc, éléments du flux reliant ce cycle au monde extérieur (in

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 généralement 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 eau d'écoulement), sécrétions radicales, 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 la somme des éléments retenus et des éléments restitués

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

Les éléments retenus, s'ajoutant d'une année à l'autre à la biomasse de la forêt en croissance de la forêt en croissance, forment la **minéralomasse** de la phytocénose (DUVIGNEAUD, 1968) 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 dans 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 pins et 2 fois plus de Ca qu'un ha d'autres conifères. Par contre, le K prélevés par ha de résineux (Pins exceptés). Il en est de même de P. La forêt de Pins, déjà beaucoup plus pauvre en Ca, ne prélève que la moitié de K et de P prélevés par les autres forêts. Il est à noter que dans les 3 types de forêts étudiés (feuillus, pin et autres 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).

2) Le cycle géochimique

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

Il comprend deux postes : l'import (input) et l'export (output) d'éléments minéraux :

- L'import comprend :

a) une addition par les précipitations : poussières, aérosols, pluie, neige etc.

L'ordre de grandeur de l'addition annuelle par la pluie s'élève, en région tempérée, selon OVIINGTON (1968), à 1-10 kg/ha de K, 3 à 19 kg/ha de Ca, 4 à 11 kg/ha de Mg, 0,8-4,9 kg/ha de Na et 0,2 –0,6 kg/ha de P. Cependant, S qui domine dans les régions industrialisées. Le Na est fort important dans les région littorales.

Le couvert forestier est très efficace dans la capture de poussières aéroportées ; celles-ci peuvent se déposer sur les frondaisons par temps sec, puis être amenées au sol par le temps de pluie . La quantité totale d'éléments apportés au sol forestier par la pluie est ainsi la somme des quantités apportées par la pluie et les poussières incidentes (import) et par le lavage et le lessivage des nappes foliaires et les troncs et branches par les eaux d'écoulement et d'égouttement.

b) Une addition de N par fixation de N_2 , de l'air par les microorganismes spécialisés de l'écosystème ;

c) Une addition d'éléments chimiques divers par décomposition de la roche mère : certaines racines d'arbres pénètrent profondément jusqu'à la roche mère, y puisent les éléments qu'elles peuvent puiser, transmettent celles ci aux organes aériens et, de là, au sol par chute de litière

On aboutit à la loi de la *perpétuation forestière* de HARMANN : une accumulation d'éléments minéraux fertilisants peut se produire dans les horizons physiologiquement actifs (richement enracinés) du sol, à partir de la roche-mère. Cette accumulation peut donc être à la base d'une fertilité soutenue du sol, malgré le lessivage des horizons superficiels en climats suffisamment humide.

Ceci met en valeur l'importance de la roche-mère, même dans un sol mûr arrivé à son climax ; ces phénomènes montrent que l'évolution physique d'un sol (spécialement de sa texture) ne va pas de pair avec son évolution chimique car seuls des éléments chimiques solubles de la roche mère peuvent être amenés en surface par des racines profondes.

Ils donnent ainsi une place plus importante à la lithologie des roches mères dans les études écologiques. Ils permettent d'insister sur la nécessité d'élaborer des cartes lithologiques, qui généralement n'existe pas encore.

- L'export comprend :
 - a) Des pertes d'éléments dans les eaux de drainage. Ainsi, l'analyse des eaux de drainage retenues, au bas du bassin versants par un petit barrage muni d'une jauge d'estimer les éléments exportés permet d'estimer les éléments exportés (Tab. 3.7.1).

Tableau 3.7.1: Estimation des éléments biogènes exportés par les eaux de drainage

	Importation	Exportation
--	-------------	-------------

	Par les précipitations (kg/ha)	brute dans l'eau de drainage
Ca ⁺⁺	2,6	11,2"
Mg ⁺⁺⁺	0,7	2,9
K ⁺	1,1	1,7
Na ⁺	1,5	6,9
NH ₄ ⁺	2,7	0,4
NO ₃ ⁻	16,3	8,7
SO ₄ ⁻	38,3	48,6
Cl ⁻	5,2	4,9
Al ⁺⁺⁺	-	1,8
SiO ₂ dissous	-	35,1

Ainsi, pour une forêt mélangée caducifoliée recouvrant 6 petits versants montrent que les pertes en éléments minéraux ne sont pas importantes sauf pour Ca et SiO₂.

b) Des pertes d'éléments par exploitation humaine : il y a perte plus ou moins massive d'éléments lors de la récolte des producteurs primaires ou secondaire.

L'appauvrissement du sol par la récolte du tapis végétal a fait l'objet de nombreuses recherches en agriculture ; on sait que certaines plantes cultivées épuisent beaucoup plus rapidement le sol (betterave, pomme de terre, oléagineux, exportant chaque année de 300 à 700 kg d'éléments minéraux par ha), que d'autres moins épuisantes (légumes, arbres fruitiers, céréales). Voici quelques valeurs classiques (WALTER, 1947) (Tab. 3.7.2) :

Tableau 3.7.2 : Perte annuelle du sol, pour une récolte moyenne, en kg/ha

	N	P	K	Ca
Froment	70	30	50	30
Pomme de terre	90	40	160	76
luzerne	-			242

Le tableau (3.7.3) montre les estimations des annuelles du sol du à l'exportation du bétail.

Tableau 3.7.3: Perte annuelle du sol, du à l'exportation par le bétail, une bête contient en kg/ha

			F	a
Boeuf 600kg	16		5	
Mouton 70 kg	1,6		0	
		,4	,1	,6

En outre, le tableau suivant (3.7.4) donne un aperçu des réserves moyenne des sols cultivés de France en divers éléments minéraux, et des quantités exportées, chaque année par les récoltes.

Tableau 3.7.4: Réserve moyenne en éléments minéraux (kg/ha) des sols cultivés en France

	Stock moyen Kg/ha	Exportation Kg/ha
N	3000	50-300
P	654	4,4-35
S	325	2,5-37
K	1245	25-249
Mg	904	6-60

Ce qui signifie d'après le tableau 3.7.4, que théoriquement après un temps pouvant varier de 15 à 150 ans, un sol moyennement riche en éléments minéraux pourrait être totalement épuisé. Ce seul exemple suffit à expliquer la nécessité, pour maintenir une productivité suffisante, de restituer les éléments perdus sous formes d'engrais.

Les forêts n'échappent pas non plus à l'épuisement de leurs réserves : éclaircies récoltes partielle ou totale (coupe)

RENNIE (1957) a calculé que les éléments nutritifs exportés d'une forêt lors d'une révolution de 100 ans atteignent les valeurs suivantes (Tab. 3.7.5) :

Tableau 3.7.5 : Eléments nutritifs exportés d'une forêt en 100 ans

	Kg/ha		
	Ca	K	P

Forêt de Pins	424	168	38
Forêt de résineux	890	466	74
Forêt de feuillus	1930	483	106
cultures	2420	7400	1060