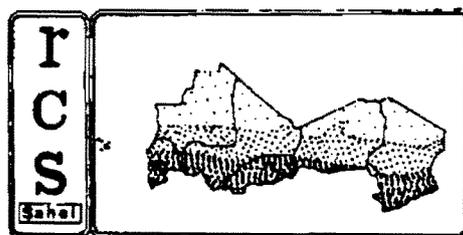


CRSTOM



# Atelier de Formation aux Techniques d'Etude de l'eau dans le système Sol - Plante - Atmosphère

Mbour, 30 Novembre - 10 Décembre 1992

## Cours d'hydrologie n° 1

### Le Cycle de l'eau

Par Jean Albergel & Erik Braudeau

## 1. Introduction

Ce cours doit servir de rapide introduction aux concepts et méthodes expérimentales qui seront présentés au cours de l'atelier. Le cycle de l'eau peut être présenté à différentes échelles : à l'échelle planétaire on parlera des océans, des calottes glaciaires, de l'eau contenue dans l'atmosphère... à l'échelle continentale on parlera du bilan hydrologique d'un grand bassin fluvial, tel le Niger, le Nil, le Congo, ou encore l'Amazone... à l'échelle de la motte de terre on parlera des transferts d'eau dans la structure poreuse du sol. Pour parler du cycle de l'eau dans le système Sol - Plante - Atmosphère nous choisirons deux échelles :

- Echelle du versant : C'est l'échelle d'intégration des relations entre les différentes unités de paysage. C'est le niveau essentiel pour la compréhension de la répartition des flux qui conditionnent les cycles de la végétation.

- Echelle de la petite parcelle : C'est l'échelle caractéristique de l'état de surface élémentaire. Son rôle est déterminant dans les phénomènes de ruissellement en zone sahélienne. C'est également à ce niveau que sont étudiés les processus d'alimentation hydrique des plantes.

## 2. Bref historique du concept de cycle de l'eau

Depuis la plus haute antiquité les crues des fleuves ont été suivies par des grandes civilisations agricoles (Egypte, Mésopotamie...). Des réalisations hydrauliques de captage des eaux souterraines existent depuis le 8ème siècle Av. J.C. ( qanat près du lac de Van en Turquie actuelle). Mais c'est dans l'ancien testament (suivant L'Hôte, 1990) que l'on trouve la première notion intellectuelle du cycle de l'eau. Les deux versets suivants sont les premières citations se rapportant aux composantes atmosphériques et superficielles du cycle de l'eau :

*Ecclésiaste Prologue -7 (975 av J.C.) : " Tous les torrents vont à la mer, et la mer n'est pas pleine. Au lieu où les torrents vont, là, ils retournent pour aller "*

*Amos V-8 (vers 800 av J.C.) : " Cherchez Le... Il appelle les eaux de la mer, et les répand sur la surface de la terre. L'Eternel est son nom "*

Ce dernier thème de "l'antique difficulté" d'admettre que les océans ne s'élèvent pas davantage malgré l'apport incessant des fleuves sera abondamment repris et discuté au cours des siècles par de nombreux philosophes et auteurs. L'Hôte (1991) cite : Aristote (384-322 av J.C.), Lucrèce (99-55 av J.C.), Saint Basile (330-379 ap J.C.), le commentateur de la bible Abraham Ibn Ezra (1085-1164) et plus près de nous le Père J. François, professeur de Descartes, dans la science des eaux (1653).

De l'époque biblique au moyen âge, de nombreux philosophes, naturalistes, poètes, physiciens, géographes ont traité des mouvements des eaux dans la nature et de leur relation en s'inspirant des théories des philosophes grecs; et notamment des "météorologiques" d'Aristote.

A partir de la Renaissance (15ème siècle), jusqu'à l'année 1800 environ, les observations, les théories, les expériences et les mesures ont permis d'affiner la connaissance de plus en plus exacte que nous avons aujourd'hui du cycle de l'eau (Léonard de Vinci).

Au début du 19ème siècle, tous les éléments du cycle de l'eau (pluie, ruissellement, infiltration évaporation) ont été appréhendés et décrits. Quelques-uns ont même fait l'objet de quantifications dont les ordres de grandeurs sont assez exacts. Quelques observations : suivies d'hydrométrie, de pluviométrie et de météorologie ont déjà commencé. Ces mesures en des lieux fixes préfigurent les futurs réseaux nationaux puis internationaux qui seront organisés peu à peu au cours des 19ème et 20ème siècles. Durant ces deux siècles, les mesures et les expériences vont se multiplier; les fondements modernes des sciences de l'eau vont être fermement établis, notamment l'hydraulique et l'hydraulique souterraine.

## 2. Quelques ordres de grandeur pour quantifier le cycle de l'eau sur la terre

Le tableau 1 montre les quantités d'eau présentes sur terre, sous différentes formes

Tableau 1 : Teneur en eau des différentes parties de la terre (Bussart, 1966)

Différents domaines	Eau	
	Kg/cm <sup>2</sup>	Géogrammes (10 <sup>20</sup> g)
Lithosphère primaire	4900	250000
Roches sédimentaires	35.4	1812
Océans et mers	258	13220
Glace des calottes polaires et glaciers	0.87	45
Eaux continentales de surface et de subsurface	0.82	41.7
Eaux de circulation souterraine profonde	5.6	288
Vapeur d'eau atmosphérique	0.0026	0.13

L'eau est en perpétuelle migration cyclique de la mer à la mer avec comme états intermédiaires les plus importants, la glace des calottes polaires et la vapeur d'eau atmosphérique. Cette dernière représente au dessus des océans un volume dix fois plus important qu'au dessus des continents. A chaque cm<sup>2</sup> de sol terrestre, correspond en moyenne 300 kg d'eau répartis comme suit :

	kg
Eau de mer .....	258.0
Eau continentale .....	41.8
Glace continentale .....	0.87
Vapeur d'eau .....	0.003

Pour expliquer la présence d'eau sur la planète terre deux hypothèses sont avancées :

hypothèse de Rubey (1951) : En tenant compte de la teneur des gaz volcaniques en vapeur d'eau juvénile (0.8%), et la durée des temps géologiques (3. 10<sup>9</sup> années), toute l'eau des océans et des continents provient de l'arrivée en surface de cette eau juvénile par les sources thermales et émanations liées à l'activité volcanique. La composition chimique actuelle des eaux juvéniles et des eaux de mers ne permet pas d'étayer cette hypothèse.

hypothèse de Dauvillier (1947) : La première mer est antérieure à la constitution de la croûte terrestre actuelle. Elle résulte de la condensation d'une vapeur d'eau produite par la réduction des oxydes primitifs ayant lessivé une "mer" d'hallogénures alcalins solidifiés. Cette hypothèse semble infirmée par l'étude géologique des terrains précambriens les plus anciens qui rend peu probable l'existence d'une eau de mer de composition actuelle et ayant été à température élevée.

Sur les 71% de surface terrestre occupés par les mers , le soleil provoque une évaporation intense. On estime à 383000 km<sup>3</sup> (3.83 Gg) la quantité d'eau quittant ainsi annuellement la surface des océans. 346000 km<sup>3</sup> (3.46 Gg) reviennent directement à la mer par les précipitations, après un séjour plus ou moins prolongé dans les couches atmosphériques. 37000 km<sup>3</sup> seulement (0.37 Gg) sont entraînés au dessus des continents par les courants aériens et arrivent au sol lors des précipitations. Ces dernières , de l'ordre de 99000 km<sup>3</sup> (0.99 Gg) sont également alimentées par l'évaporation et la transpiration des eaux du sol ou des réserves de surface (62000 km<sup>3</sup> ).

On différencie quatre grandes étapes du cycle de l'eau :

## A ) Les précipitations

Les précipitations, suivant la température et le taux d'humidité des masses d'air sont de la rosée, des pluies, de la neige, de la grêle, du givre ou du verglas.

La répartition des masses d'air humide et les précipitations qu'elles induisent, sont régies par les grands paramètres de la planète : rotation de la terre, position relative des océans et des continents, position des zones dépressionnaires, déplacement des anticyclones et des fronts, convection thermique. Localement, le relief, la présence de grands lacs, de forêts,... peuvent influencer la répartition et la forme des précipitations.

Dans cet atelier un cours spécifique sur la genèse des pluies au Sahel est programmé.

## B ) L'écoulement

Une partie des précipitations qui arrivent sur les continents se transforme en écoulement. Un écoulement à travers le sol qui rejoint les nappes phréatiques et ressurgit aux points bas de la topographie. Un écoulement directement à la surface du sol suivant les lignes de plus grande pente et que l'on appelle ruissellement.

La pluie, mais aussi la glace et la neige ont une action physique d'érosion et une action chimique de dissolution sur les terrains sur lesquels elles tombent. Ainsi se forment des cours d'eau de plus en plus gros et dont l'action dépend du relief et de l'importance du bassin versant.

On estime à 35000 km<sup>3</sup> la quantité d'eau qui arrive chaque année effectivement dans l'océan. Les cinq plus grands fleuve du monde représentent plus de 22% de ce débit (Amazone : 3210 km<sup>3</sup>, Congo : 2130 km<sup>3</sup>, Gange : 1200 km<sup>3</sup>, Yang Tsé Kiang : 690 km<sup>3</sup>, Mékong : 500 km<sup>3</sup>) (Dussart, 1966)

## C ) Stockage

Les glaciers et calottes glacières sont des lieux où le cycle de l'eau est fortement ralenti. Les réservoirs souterrains profonds sont également des lieux de stockage importants des eaux continentales.

L'eau comme la glace a tendance à rejoindre au plus vite le point bas le plus proche. Ce point bas n'est pas toujours l'Océan. Il existe de nombreux bassins fermés dans lesquels les eaux se concentrent sans jamais atteindre la mer (mers fermées Caspienne, Aral, lac Tchad, lac Salé de l'Utah, cryptodépressions en dessous du niveau marin comme la mer Morte).

## D ) Retour à l'atmosphère

Le retour à l'atmosphère de toute l'eau accumulée dans les océans et les continents se fait par évaporation. L'évapotranspiration, phénomène si important du point de vue de la croissance végétale n'intervient que pour une part minime dans la réhumidification des masses d'air (2%).

### 3. Le cycle de l'eau dans le système Sol - Plante - Atmosphère (inspiré de Monteny & Lhomme, 1980)

La figure 1 montre les transferts d'énergie et de masse à l'interface sol-végétation-atmosphère à l'échelle d'un site du sahel sédimentaire (continental terminal). La figure 2 fait un zoom sur ces transferts à l'échelle d'une plante. Le cycle biogéochimique du carbone et de l'azote est étroitement lié au cycle hydrique qui dépend de l'équilibre climatique et de son évolution. Le transport des matériaux "cycle érosion, dépôt" dépend également de l'équilibre climatique.

Sur ces graphiques on a distingué quatre domaines :

#### A ) L'atmosphère

L'air atmosphérique est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. L'air sec est lui même un mélange de plusieurs gaz, dans des proportions pratiquement constantes dans les basses couches de l'atmosphère. Ce mélange est constitué principalement :

- d'azote N<sub>2</sub> : 78% de la composition volumétrique
- d'oxygène O<sub>2</sub> : 21% de la composition volumétrique
- d'argon A : 0.9% de la composition volumétrique

La teneur en anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>) voisine de 0.03% est très variable et dépend notamment de l'activité industrielle ou des phénomènes de feux de brousse. On trouve également un certain nombre de gaz rares en très faibles quantités (Ne, He, Kr, H<sub>2</sub>...).

En plus de ces composants gazeux figure en suspension dans l'air un nombre considérable de particules microscopiques d'origine minérale ou végétale (cristaux de sel marin, pollens,...). Ces corpuscules jouent un rôle non négligeable dans les phénomènes de condensation de la vapeur d'eau et de formation de nuages.

La vapeur d'eau en quantité plus ou moins importante en fonction du climat se transforme en précipitation sous certaines conditions de température et de pression. Considérons un volume V, à la température T, sous la pression atmosphérique P. Ce volume d'air, de masse m, est constitué par le mélange  $m_a + m_v = m$  avec  $m_a$  masse d'air sec et  $m_v$  masse de vapeur d'eau. On appelle rapport de mélange de cet air le rapport :

$$r = \frac{m_v}{m_a}$$

D'après l'équation d'état, nous pouvons écrire :

$$m_v = M_v \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \text{ et } m_a = M_a \frac{(P_A - p) \cdot V}{R \cdot T}$$

avec  $M_a$  : masse molaire de l'air sec

$M_v$  : masse molaire de l'eau

p : pression partielle de vapeur d'eau

$P_A$  : Pression atmosphérique

Le rapport de mélange de l'air s'écrit en fonction de p :

$$r = \epsilon x \frac{p}{P_A - p} = \epsilon x \frac{p}{P_A} \text{ avec } \epsilon = \frac{M_v}{M_a} = 0.62$$

Si l'air est totalement sec (ce qui n'est jamais le cas)  $p = 0$  et  $r = 0$

Pour une pression constante, il faut refroidir l'air humide à une température  $T_r$  pour atteindre l'équilibre liquide - vapeur : c'est le point de rosée. A cette température la pression de vapeur

d'eau dans l'air est maximale et l'humidité de l'air définit comme  $H\% = 100x \frac{p}{p(T)}$  est égale à 100%,  $p(T)$  étant la pression maximale de vapeur d'eau à la température T.

Si la température devient inférieure à  $T_r$ , toute la vapeur d'eau excédentaire se transforme en précipitation.

L'étude de l'atmosphère fait appel à un ensemble de sciences dont principalement :

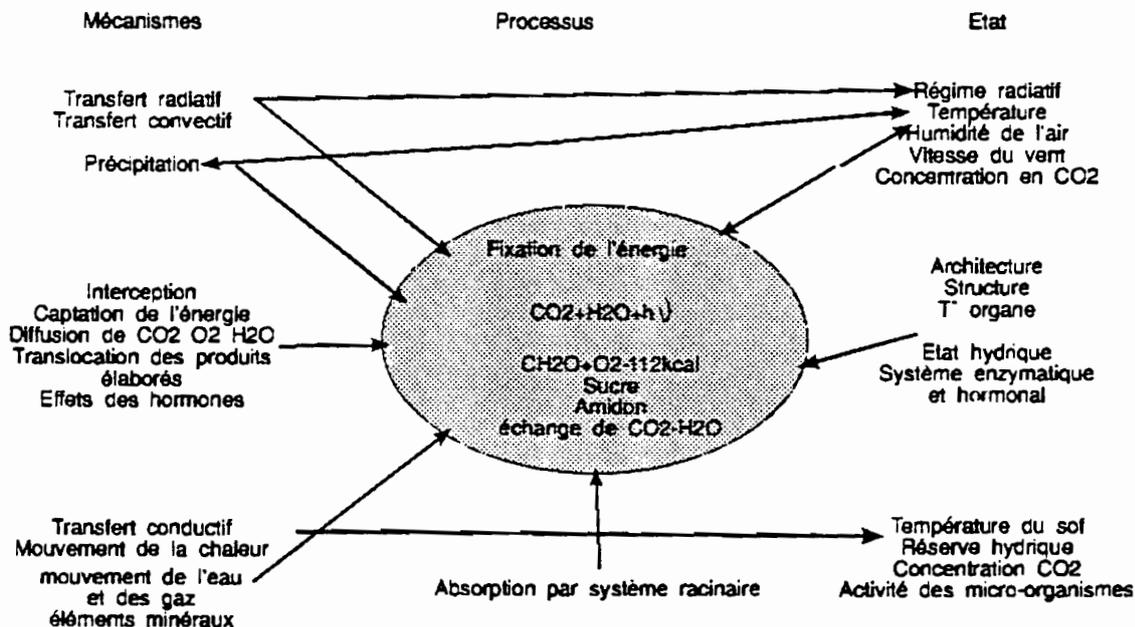
**La météorologie** : étude du temps qu'il fait. Elle mesure à un moment précis, en un lieu déterminé les caractéristiques de l'atmosphère. Elle construit des modèles permettant de prévoir le temps qu'il fera.

**La climatologie** : étude du temps qu'il a fait. Elle permet de caractériser par des valeurs moyennes et cumulées dans le temps le climat d'une région. Elle construit des modèles statistiques pour déterminer les événements météorologiques rares mais possibles dans la région.

**La physique** : elle s'intéresse aux différentes lois auxquelles obéissent les phénomènes régissant la dynamique du climat. Du point de vue instrumental, elle permet la connaissance des propriétés des appareils de mesure.

## B ) La biosphère

L'énergie solaire, après ses modifications quantitatives et qualitatives lors de sa traversée de l'atmosphère est reçue au sol par les différents êtres vivants constituant les écosystèmes. Le système végétal est le premier niveau de la chaîne trophique. Il produit par photosynthèse, de la matière organique. Le vecteur de tous les processus bio-géochimiques est l'eau. Les mécanismes et processus impliqués dans le système sol-plante-atmosphère par le schéma ci-dessous :



Les flèches montrent la complexité des interactions entre l'état du milieu celui de la plante et la nature des mécanismes physiques et physiologiques qui s'y rapportent. L'énergie solaire est partiellement absorbée par les feuilles. Une fraction de cette énergie est restituée au milieu sous forme de chaleur entraînant une variation de la température de l'air (phénomène de convection) et sous forme de vapeur d'eau provenant de la transpiration et qui a pour conséquence une augmentation de l'humidité de l'air. Par ailleurs, les mécanismes physiologiques qui gouvernent le développement de la plante sont tributaires des processus de vieillissement où interviennent les hormones. L'alimentation en eau de la plante à partir du sol véhicule les éléments minéraux nécessaires au développement végétatif. Si on considère la plante comme un produit fini, le

noter se trouve être l'énergie provenant du soleil sous différentes formes et qui se traduit par des flux de température, le carburant est formé par les gaz de l'atmosphère, les matériaux de base sont la matière minérale et organique décomposée du sol, le transport est assuré par la circulation de l'eau.

L'étude de la plante fait appel à un ensemble de sciences dont principalement :

L'écologie botanique: Distribution des plantes, analyse des groupements et relations avec les paramètres du milieu

L'agrophénologie: concerne l'évolution des différents stades de croissance et de développement des plantes.

La physiologie : étudie le fonctionnement des plantes tant du point de vue structure que du métabolisme

La génétique : amélioration du génome se traduisant par des modifications de certains caractères phénologiques qui interviennent dans la productivité du couvert.

### C) Le sol, lieu de transferts hydriques et thermiques

Le sol représente la couche extérieure de la surface terrestre, altérée au cours des âges par des processus physiques, chimiques et biologiques. C'est un système d'une grande complexité constitué d'éléments solides, liquides et gazeux. La phase solide comprend des constituants minéraux de dimensions et de forme variées, ainsi qu'une fraction organique formée d'organismes vivants (racine, microfaune et mésofaune) et de résidus organiques à différents stades de dégradation. La phase liquide est représentée par une solution aqueuse (eau et sels minéraux) plus ou moins liée à la phase solide du sol. La phase gazeuse ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) occupe les espaces libres laissés entre les particules et non remplis par la phase liquide.

Les transferts hydriques comme thermiques dans les sols sont difficiles à étudier du fait de certaines propriétés spécifiques des sols dues à la structure (dont les systèmes poreux déformables varient avec la teneur en eau) et à la texture (interactions fortes eau-complexe argileux = argile + matière organique + hydroxydes + ...). Les méthodes d'études de ces transferts ainsi que les méthodes de caractérisation de ces propriétés particulières du sol vis à vis de l'eau feront l'objet d'une part importante de l'atelier.

Notons ici l'importance toute particulière des états de surface du sol surtout dans le domaine sahélien qui nous intéresse. Par état de surface du sol on entend à la fois l'organisation des matériaux des tous premiers millimètres du sol, du tapis herbacé qui le recouvre et le traverse de ses racines, de la faune qui vient le perturber en surface. Dans les régions sahéliennes, les organisations pelliculaires de surface qui sont d'autant plus développées que le sol est nu et dépourvu de faune présentent une résistance hydraulique très supérieure à celle des horizons sous-jacents. Lors des précipitations, la nature de ces états de surfaces est à l'origine de la répartition entre l'eau qui va s'infiltrer et celle qui va ruisseler immédiatement. La couleur de l'état de surface conditionne la partion entre l'énergie qui est réfléchiée et celle qui est absorbée sous forme de chaleur dans les horizons plus profonds (figure 2).

L'étude des transferts d'eau et de chaleur à la surface et dans le sol fait appel essentiellement à deux sciences : l'hydrologie et la pédologie.

L'hydrologie étudie tout ce qui concerne l'eau soit en surface soit en profondeur, s'intéresse aux problèmes d'érosion, de drainage et d'écoulement, pour permettre une estimation du bilan hydrique à l'échelle des bassins versants de différentes tailles.

La pédologie étudie les sols, leur morphologie, leur composition minéralogique, leur fonctionnement physico-chimique et leur histoire. L'eau est évidemment un élément important du sol qui entre dans tous les processus de génèse et de transformation et de fonctionnement des sols.

Ces deux sciences s'appuient sur la physique et plus précisément l'hydraulique pour expliciter les différentes lois qui régissent la dynamique de l'eau et concevoir des instruments de mesures. La chimie permet de comprendre les réactions entre les différentes phases en présence. La statistique est nécessaire à la description des phénomènes expérimentaux et à l'établissement de relation entre eux.

#### D) Le sous-sol et l'hydraulique souterraine.

La partie de l'eau infiltrée qui descend par gravité dans le sol au dessous des profils racinaires est de moins en moins soumise à l'évaporation. Elle gagne les formations géologiques au dessous des sols. Ces formations seront soit des lieux de transit ou des lieux d'accumulations suivant leur nature. Les notions fondamentales sur la circulation des eaux souterraines seront données dans un cours de cet atelier.

Les réservoirs souterrains sont alimentés soit directement par la pluie soit par les stockages d'eau en surface. En Afrique subsaharienne on estime qu'une recharge actuelle par les pluies n'est efficace qu'au sud de l'isohyète 700mm (Seuil de Hubert). Les zones d'alimentation d'une nappe peuvent être à des altitudes différentes et à des distances importantes des lieux où on l'observe. Ceci explique les phénomènes de puits artésiens. Au niveau des talwegs les nappes peuvent être en relation avec les eaux de surfaces, suivant la différence de charge entre l'eau de la rivière et l'eau stockée dans l'aquifère l'échange se fait de l'aquifère vers la rivière ou vice versa. Notons enfin que de nombreux réservoirs de l'Afrique subsaharienne se sont formés à des époques plus pluvieuses et qu'actuellement ils ne sont plus alimentés et que l'évaporation même très faible est à l'origine de creux piézométriques.

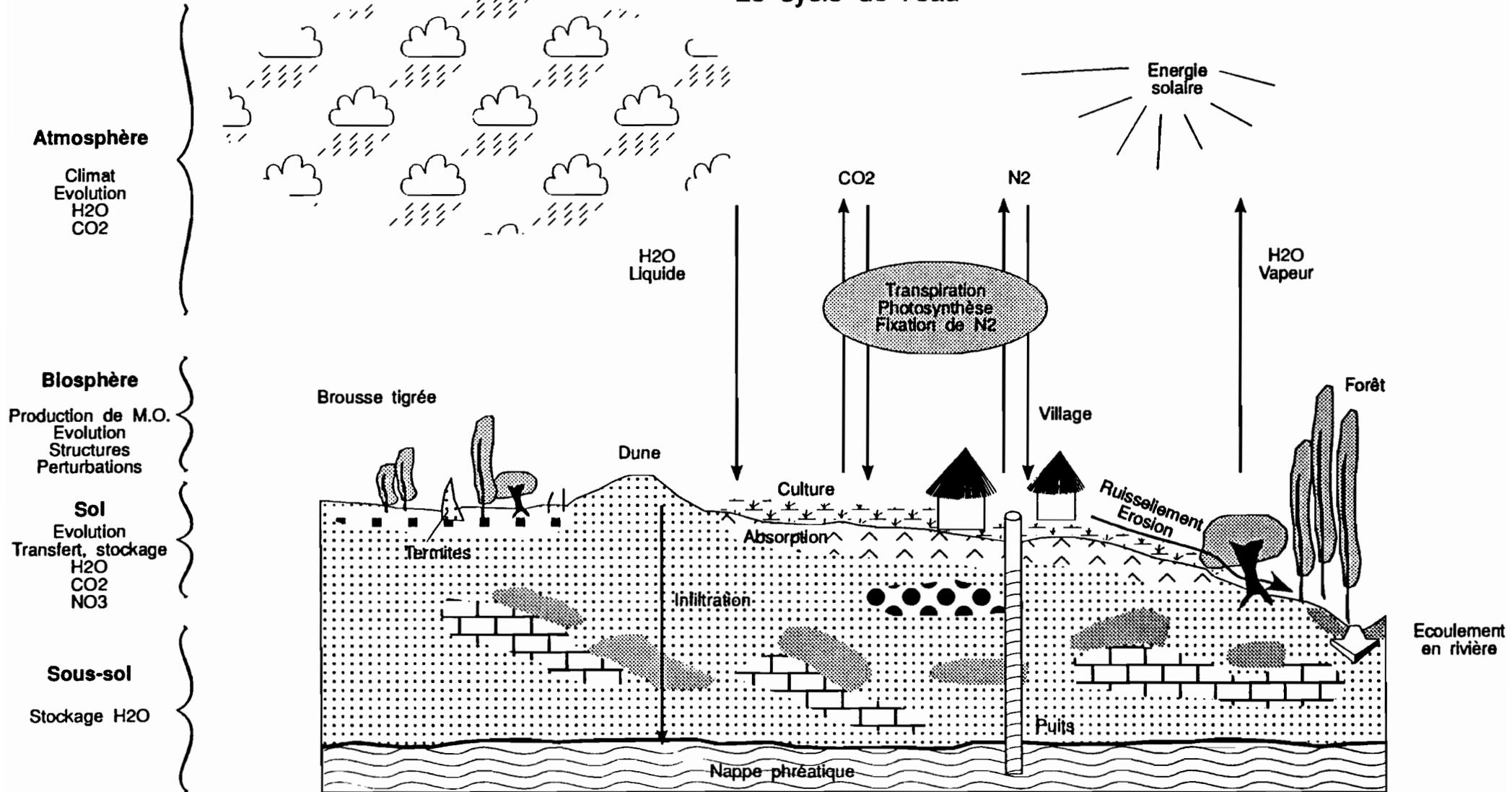
#### BIBLIOGRAPHIE

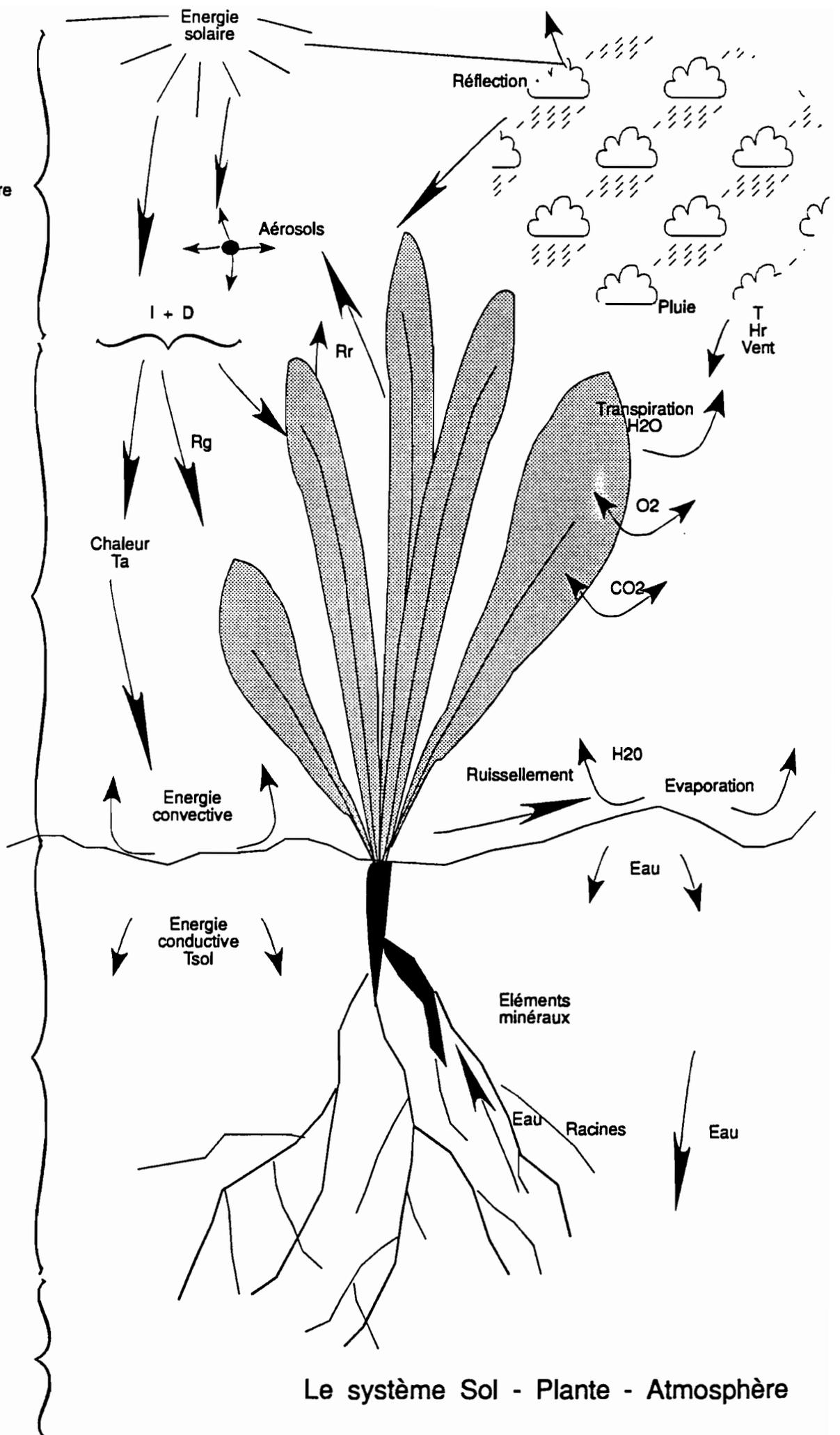
DUSSART B. (1966) Limnologie, l'étude des eaux continentales. Col. Géobiologie Ecologie Aménagement. Gauthier Villars. PARIS. 676 p

L'HOTE Y. (1990) Histoire du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe. Hydrologie continentale. vol.5 n°1, 1990, Ed. de l'ORSTOM, PARIS pp13-28

MONTENY B.A. & LHOMME J.P. (1980) Eléments de bioclimatologie. ORSTOM, ADIOPODOUME, copyright 1980, 90 p.

# Le cycle de l'eau





Le système Sol - Plante - Atmosphère