

# Cycle et bilan hydrologique

## II.1 Introduction

L'eau est la substance la plus abondante sur terre, le principal constituant de tous les êtres vivants et une force majeure qui façonne constamment la surface de la terre. C'est également un facteur clé dans la climatisation de la terre pour l'existence humaine et dans l'influence du progrès de la civilisation.

Dans ce contexte, il peut être utile de rappeler que « la mesure quantitative et qualitative des éléments du cycle hydrologique et la mesure des autres caractéristiques de l'environnement qui influent sur l'eau constituent une base essentielle pour une gestion efficace de l'eau ». (Déclaration de Dublin, 1992). De fait, la compréhension et l'analyse du cycle de l'eau est la base de toute étude et réflexion au sujet de la gestion des eaux.

## II. 2 Etats et situations de l'eau

L'eau est la source principale et originelle de toute vie. Elle se présente, dans la nature, sous trois états :

Etat	Principaux stocks	Phénomènes de transport
Vapeur nuages, brouillards	humidité atmosphérique, évapotranspiration	évaporation
Liquide	océans, mers, lacs, eaux souterraines	pluie, cours d'eau, nuages, circulations souterraines
Solide	glaciers, manteaux neigeux, calottes polaires	neige, grêle, écoulement des glaciers

Le changement de phase de l'eau dépend essentiellement de la température et de la pression mais aussi du degré de pollution de l'atmosphère. La figure suivante donne les différentes conditions de pression et de température pour les trois états de l'eau, ainsi que les transformations de phase.

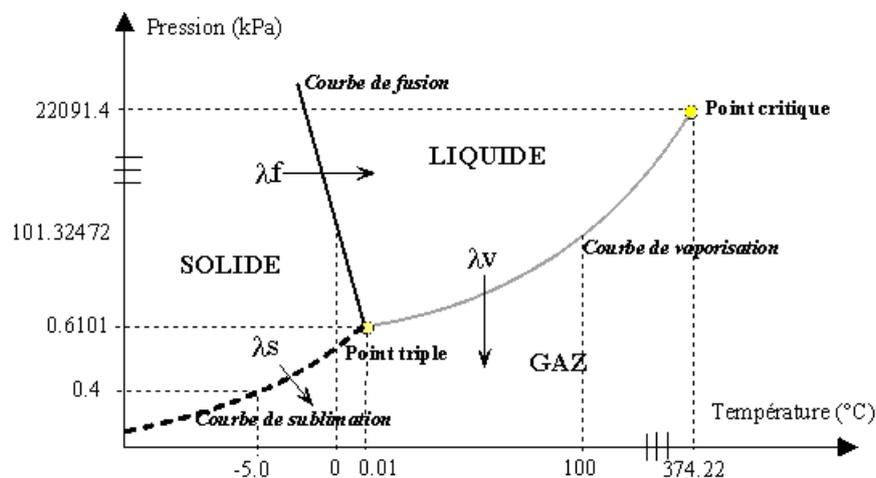


Fig 1 - Diagramme de phase de l'eau (A. Musy )

L'eau se retrouve, sous ses trois formes dans l'atmosphère terrestre. Les eaux sont en constante circulation sur la terre et subissent des changements d'état. L'importance de ces modifications

fait de l'eau le principal agent de transport d'éléments physiques, chimiques et biologiques. L'ensemble des processus de transformation et de transfert de l'eau forme le cycle hydrologique.

Les mécanismes des mouvements de l'eau dans la nature sont déterminés par l'énergie thermique solaire, la gravité, l'attraction solaire, l'attraction lunaire, la pression atmosphérique, les forces intermoléculaires, les réactions chimiques, nucléaires et les activités biologiques, et enfin les activités humaines.

## II. 3 Répartition des volumes d'eau, flux et inertie des systèmes

Quelles sont les quantités d'eau correspondant à chacun des états, et avec quelles vitesses se font les échanges ? Les réponses à ces questions sont très difficiles à donner ; on pourra retenir, pour fixer les ordres de grandeur, les chiffres fournis par G. REMENIERAS :

### II. 2. 1 : Volumes

En surface, les terres émergées ne représentent que 146 106 km<sup>2</sup> sur une surface totale de la planète de 510 106 km<sup>2</sup> (soit sensiblement 1/4). Cette disparité entre océans et terres est beaucoup plus accentuée entre eaux douces et eaux salées.

Le volume total des eaux douces est d'environ 36 106 km<sup>3</sup>, soit 2,8 % des réserves totales en eau. Par ailleurs, les eaux se répartissent à peu près ainsi, exprimées en épaisseur uniformément réparties sur la terre :

mers et océans : 2500 m.	eaux souterraines : 300 à 600 mm.
glaciers : 50 à 100 m.	eaux atmosphériques : 20 à 30 mm.
eaux continentales : 350 à 700 mm.	matière vivante : $\epsilon$

On retiendra que ce qui circule dans les cours d'eau ne représente qu'une partie absolument infime du volume d'eau total.

### II. 2. 2 Flux et inertie des systèmes

Le cycle de l'eau est continu, mais, suivant le réservoir considéré, le temps de résidence et donc de transfert diffère. Le temps de résidence correspond à la durée moyenne durant laquelle une molécule d'eau réside dans un réservoir. Il se calcule en prenant en compte le volume du réservoir et les flux entrants (précipitations par exemple) ou les flux sortants (évaporation par exemple).

On appelle « taux de renouvellement » le rapport du stock au flux qui l'alimente et "temps de séjour" l'inverse du taux de renouvellement. Plus le temps de séjour est important, plus l'inertie du système est importante : c'est par exemple le cas des eaux souterraines où il atteint couramment, pour des nappes importantes, 10 à 50000 ans ; en revanche la quasi totalité des eaux continentales ont un temps de séjour relativement limite, de l'ordre de quelques jours à un an.

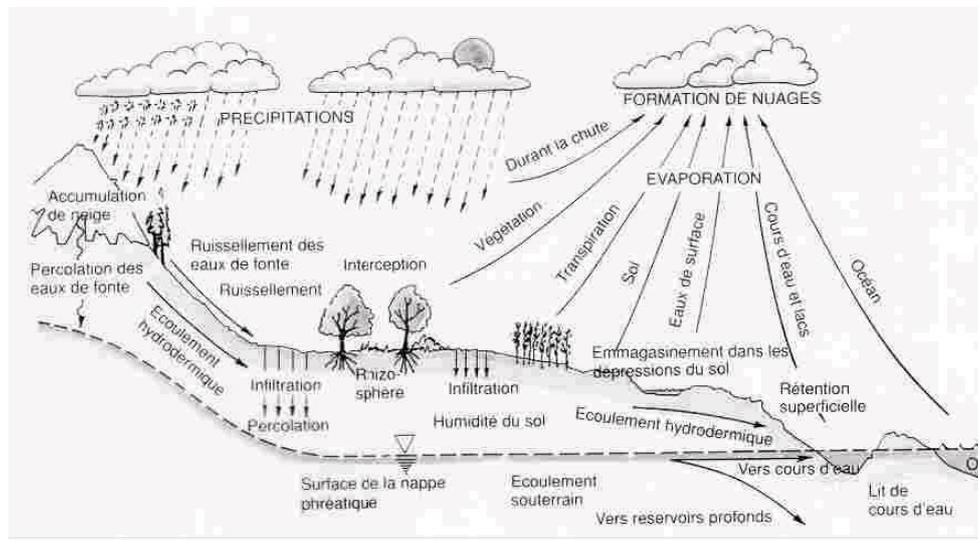
## II.3 Définition et composantes du cycle hydrologique

### II.3.1 Définition

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol.

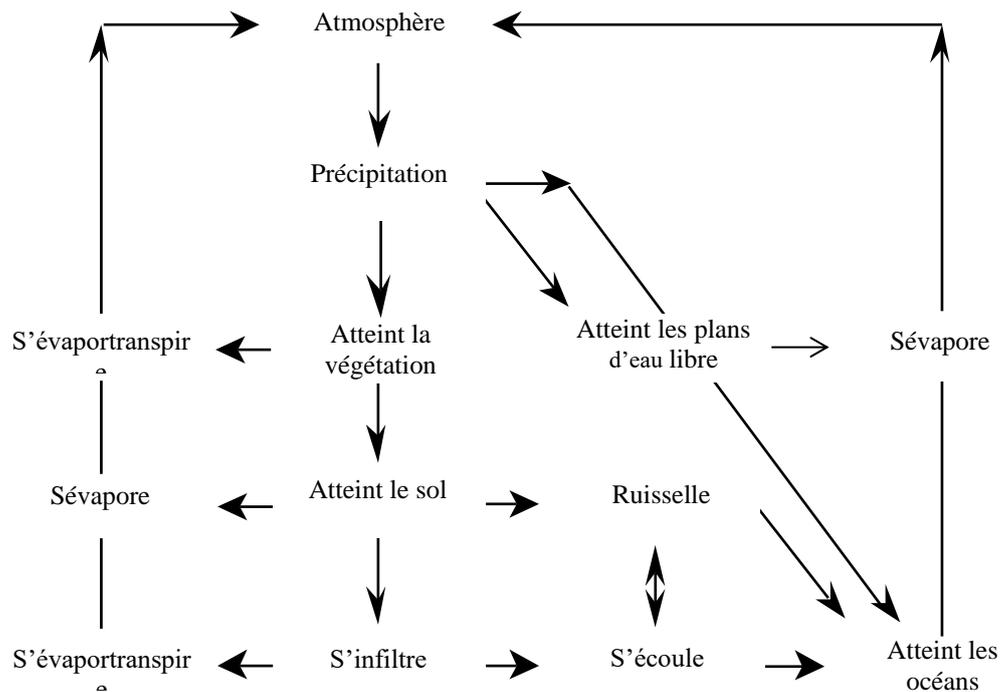
Le cycle hydrologique est donc un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (Fig. 2-1). Le cycle n'a ni début ni fin, et ses nombreux processus se produisent en continu. Cette définition implique donc que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants.

Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années.



**Fig. 2:** Le cycle de l'eau (U.S. Corps Army)

l'eau s'évapore des océans et de la surface terrestre pour faire partie de l'atmosphère; la vapeur d'eau est transportée et soulevée dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'elle se condense et précipite sur la terre ou les océans; l'eau précipitée peut être interceptée par la végétation, devenir un écoulement par voie terrestre au-dessus de la surface du sol, s'infiltrer dans le sol, s'écouler à travers le sol sous forme d'écoulement souterrain et se déverser dans les cours d'eau sous forme de ruissellement de surface. Une grande partie de l'eau interceptée et du ruissellement de surface retourne dans l'atmosphère par évaporation. L'eau infiltrée peut percoler plus profondément pour recharger les eaux souterraines, émerger plus tard dans des sources ou s'infiltrer dans les ruisseaux pour former un ruissellement de surface, et finalement s'écouler vers la mer ou s'évaporer dans l'atmosphère au fur et à mesure que le cycle hydrologique se poursuit.



**Fig. 3** : Représentation schématique du cycle de l'eau (Laborde 2009)

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains qui constituent les principaux chapitres de l'hydrologie. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique.

### II.3.2 Les précipitations

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

Les précipitations sont exprimées en intensité (mm/h) ou en lame d'eau précipitée (mm) (rapport de la quantité d'eau précipitée uniformément répartie sur une surface).

### II.3.3 L'évaporation/l'évapotranspiration

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire. Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes.

### II.3.4 L'interception et le stockage dans les dépressions

Les précipitations peuvent être retenues par la végétation, puis redistribuée en une partie qui parvient au sol et une autre qui s'évapore. La partie n'atteignant jamais le sol

forme l'interception. Son importance est difficile à évaluer et souvent marginale dans certains climats, donc souvent négligée dans la pratique.

Le stockage dans les dépressions est, tout comme l'interception, souvent associé aux pertes. On définit l'eau de stockage comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une averse.

L'effet respectif de l'interception et du stockage dans les dépressions est très variable et diminue au cours de l'averse. Il provoque en générale un retard dans le démarrage et la réaction hydrologique qui peut être perçue à l'exutoire du bassin.

### **II.3.5 L'infiltration et la percolation**

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression.

La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique.

Le taux d'infiltration est donné par la tranche ou le volume d'eau qui s'infiltré par unité de temps (mm/h ou m<sup>3</sup>/s). L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves aquifères.

### **II.3.6 Les écoulements**

De par la diversité de ses formes, on peut distinguer entre autres les écoulements rapides des écoulements souterrains plus lents :

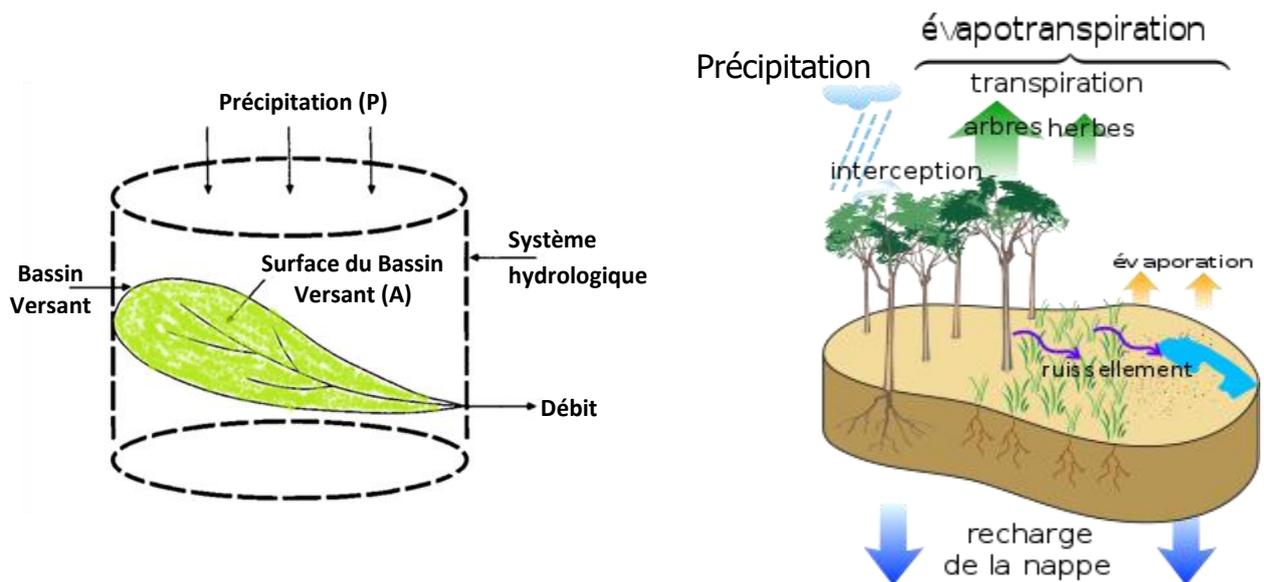
- Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface (mouvement de l'eau sur la surface du sol) et écoulement de subsurface (mouvement de l'eau dans les premiers horizons du sol).
- L'écoulement souterrain désigne le mouvement de l'eau dans le sol.
- On peut encore ajouter à cette distinction les écoulements en canaux ou rivières qui font appel à des notions plus hydrauliques qu'hydrologiques.

L'écoulement de surface caractérise un écoulement sur une surface et s'exprime généralement par un rapport (volume / surface / temps) [L<sup>3</sup>/L<sup>2</sup>/T]. Il est ainsi souvent exprimé en millimètre par année hydrologique dans les études de bilans ou encore en litres par secondes et par hectares dans le cadre de projet d'aménagement des terres et des eaux (drainage ou irrigation). Les écoulements souterrains et en rivière font explicitement référence à la notion de débit, à savoir à un volume d'eau traversant une section par unité de temps [L<sup>3</sup>/T].

## II.5 Le bilan Hydrologique

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée « bilan hydrologique » qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps.

- L'échelle de temps considéré pour l'estimation des différentes quantités est l'année hydrologique. La notion de l'année hydrologique introduit ici, est choisie en fonction des conditions climatiques. Ainsi en fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débuter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire.
- L'espace considéré pour le calcul du bilan hydrologique, il est d'usage de travailler à l'échelle d'un bassin versant mais il est possible de raisonner à un autre niveau (zone administrative, entité régionale, etc.).



Tout ce qui tombe ( $P$ ) dans un espace hydrologique et dans un laps de temps donnés soit s'écoule ( $R$ ) soit repart dans l'atmosphère par évapotranspiration ( $E$ ), soit participe à la recharge des réserves en eau du sol ou du sous-sol ( $\Delta S$ ). Les variations de réserve peuvent être également négatives et contribuer aux écoulements et/ou à l'évapotranspiration.

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donnés :

$$P + S = E + R + S \pm (\Delta S)$$

Avec :

- $P$  : précipitations (liquide et solide) [mm],
- $S$  : réserves en eau (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],
- $R$  : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],
- $E$  : évaporation (y compris évapotranspiration) [mm],
- $S + DS$  : Réserves accumulées à la fin de la période [mm].

On exprime généralement les termes du bilan hydrique en hauteur d'eau (mm par exemple), on parle alors de lame d'eau (précipitée, écoulée, évaporée, stockée, etc.). Cette équation exprime simplement que la différence entre le débit d'eau entrant et le débit d'eau sortant d'un volume donné (par exemple un bassin versant) au cours d'une période déterminée est égale à la variation du volume d'eau emmagasinée au cours de la dite période. Elle peut s'écrire encore sous la forme simplifiée suivante :

$$E = I + O \pm (\Delta S)$$

Avec :

E : évaporation [mm] ou [m<sup>3</sup>],  
 I : volume entrant [mm] ou [m<sup>3</sup>],  
 O : volume sortant [mm] ou [m<sup>3</sup>],  
 ΔS : variation de stockage [mm] ou [m<sup>3</sup>].

Si le bassin versant naturel est relativement imperméable, la variation de stock sur une période donnée peut être considérée comme nulle (ΔS = 0). Dès lors, on peut introduire le déficit d'écoulement D dans l'équation qui s'écrit :

$$I + O = D$$

Ce déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation. Il peut être estimé à l'aide de mesures ou de méthodes de calcul. A titre illustratif, les formules de Turc et Coutagne sont les suivantes :

1. **Formule de Turc :** 
$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],  
 P : pluie annuelle  
 T : température moyenne annuelle [°C].  
 $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$ .

2. **Formule de Coutagne :** 
$$D = P - m \cdot P^2$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],  
 P : pluie annuelle [mm],  
 $m = 1/(0.8 + 0.16 T)$  :

La connaissance du déficit d'écoulement permet d'évaluer le comportement du système hydrologique ou la fiabilité des données sensées le décrire, par comparaison entre les valeurs du déficit calculées directement et les valeurs estimées dans un bassin versant plus grand.