

1.1 Introduction

La question de la disponibilité et d'accès à l'eau est sans aucun doute un des problèmes majeurs auquel devra faire face l'humanité durant le siècle à venir. Aujourd'hui on estime en effet qu'un habitant sur cinq de la planète n'a pas accès à l'eau en suffisance et un sur trois a une eau de qualité. 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.

1.2 L'eau, généralités

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

- Solide : neige et glace.
- Liquide : eau chimiquement pure ou chargée en solutés.
- Gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.

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.

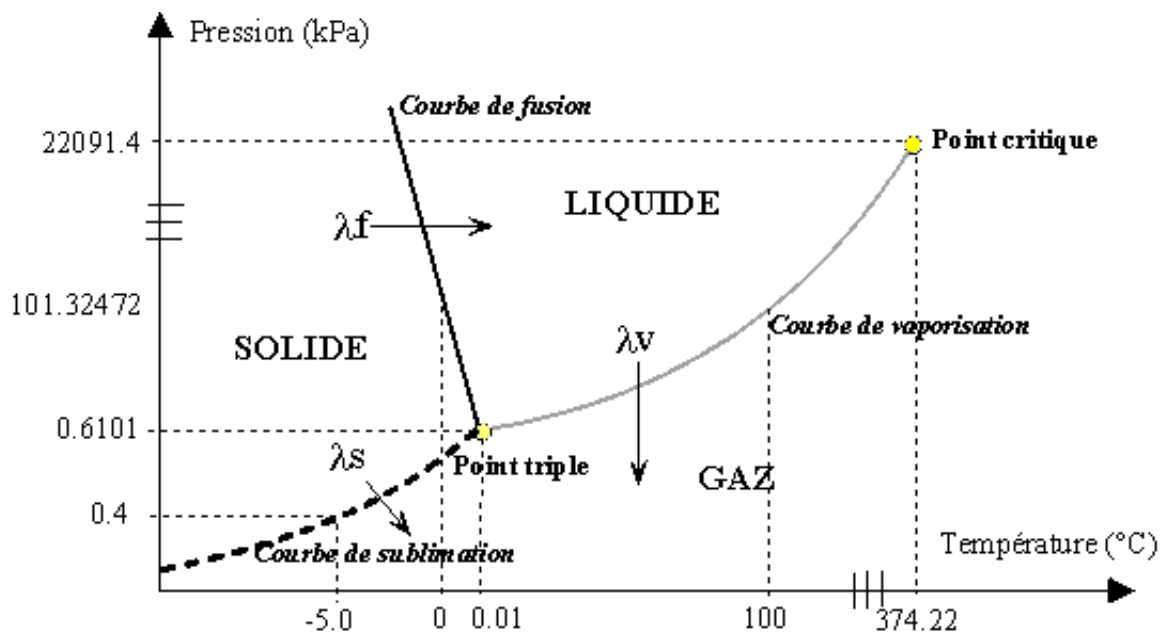


Fig 1.1 - Diagramme de phase de l'eau (Tiré de Musy)

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. L'énergie thermique du soleil produit une circulation de l'air dans l'atmosphère, en raison du fait que la surface terrestre est réchauffée de façon inégale. La force de gravité est responsable des phénomènes de précipitations, de ruissellement, d'infiltration et de courant de convection. L'attraction solaire et lunaire est à l'origine des marées et des courants marins. Les différences de pression atmosphérique occasionnent les déplacements horizontaux de l'air. Les vents sont eux-mêmes responsables du mouvement des couches superficielles dans les lacs et les océans. Les forces intermoléculaires dans le sol provoquent les phénomènes capillaires ainsi que la viscosité et influencent donc la vitesse d'écoulement. L'eau est une des composantes de plusieurs réactions chimiques organiques ou inorganiques. Un autre type de transformation de l'eau est le processus physiologique qui se produit dans l'organisme animal. Finalement, l'homme intervient directement sur les processus de mouvement et de transformation de l'eau. Son action peut conduire à une meilleure gestion de sa plus précieuse ressource naturelle, mais elle peut aussi causer de nombreux problèmes, notamment en perturbant le cycle hydrologique, tant au niveau quantitatif que qualitatif.

1.3 Définition et composantes du cycle hydrologique

1.3.1 Définition

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

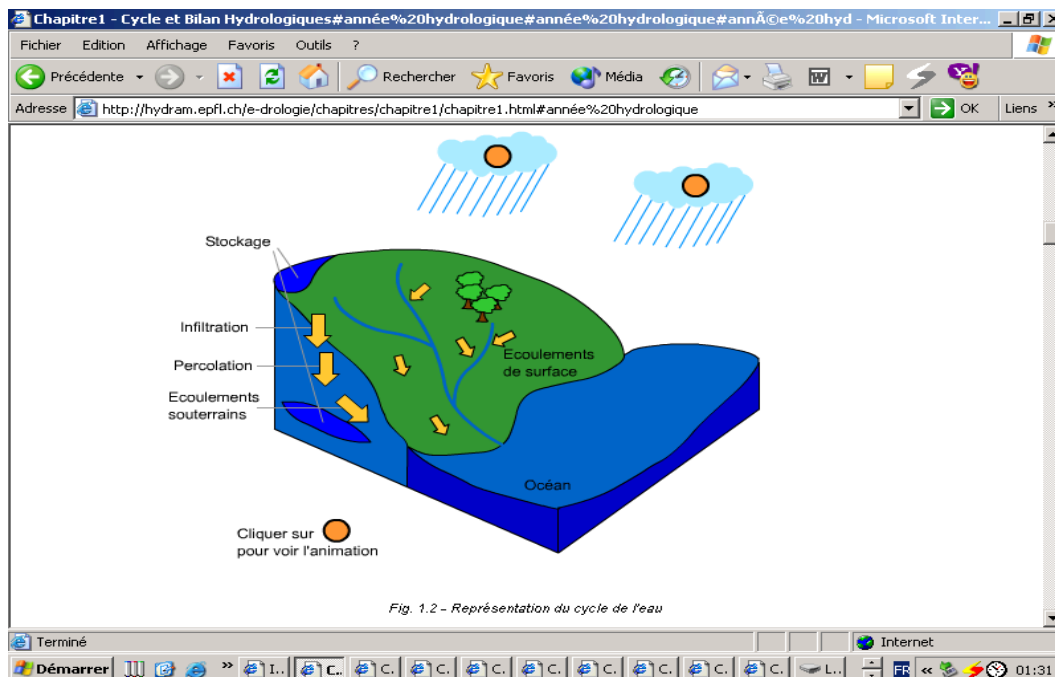


Fig. 1.2 - Représentation du cycle de l'eau

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle.

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.

1.3.2 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. La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint le point de rosée par refroidissement ou augmentation de pression. Pour produire la condensation, il faut également la présence de certains noyaux microscopiques, autour desquels se forment des gouttes d'eau condensées. La source de ces noyaux peut être océanique (chlorides, en particulier NaCl produit par l'évaporation de la mer), continentale (poussière, fumée et autres particules entraînées par des courants d'air ascendants) ou cosmiques (poussières météoriques). Le déclenchement des précipitations est favorisé par la coalescence des gouttes d'eau. L'accroissement de poids leur confère une force de gravité suffisante pour vaincre les courants ascendants et la turbulence de l'air, et atteindre le sol. Enfin, le parcours des gouttes d'eau ou des flocons de neige doit être assez court pour éviter l'évaporation totale de la masse. 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).

1.3.3 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. On distingue :

- *l'évapotranspiration réelle* (ETR) : somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.
- *l'évapotranspiration de référence* (ET_0) (anciennement évapotranspiration potentielle) : quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance.

Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. En général, des analyses spécifiques d'évaporation devront être faites pour des études de bilan et de gestion de l'eau par les plantes. Cependant, ces analyses approfondies sont moins nécessaires pour les études de projets d'aménagement où l'eau est plutôt considérée sous un aspect d'agent dynamique.

1.3.4 L'interception et le stockage dans les dépressions

La pluie (ou dans certains cas la neige) peut être retenue 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 sous nos 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.

La quantité d'eau susceptible d'être interceptée varie considérablement. Si la végétation offre une grande surface basale ou foliaire, donc un important degré de couverture, la rétention d'eau peut atteindre jusqu'à 30% de la précipitation totale pour une forêt mixte, 25% pour les prairies et 15% pour les cultures. 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.

1.3.5 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'infiltre par unité de temps (mm/h ou m³/s). La capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité est la tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données. L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves aquifères. De plus, en absorbant une partie des eaux de précipitation, l'infiltration peut réduire les débits de ruissellement.

1.3.6 Les écoulements

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On peut distinguer en premier lieu 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 (à l'exception des méthodes de mesures comme nous le verrons ultérieurement).

Au-delà de cette distinction simpliste – ces notions seront réexaminées plus en détail au chapitre 9 consacré à l'étude des processus de génération des crues – on remarquera que les écoulements peuvent aussi se signaler par leur domaine d'application. L'écoulement de surface caractérise un écoulement sur une surface et s'exprime généralement par un rapport volume / surface / temps [$L^3/L^2/T$]. 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^3/T].

1.4 La répartition des eaux

Nous pouvons concevoir la répartition des eaux sur la terre selon différents points de vue :

- Une répartition quantitative et qualitative des eaux à l'échelle du globe, et par rapport aux différentes composantes du cycle hydrologique.
- Une répartition spatiale du bilan de l'eau sur les continents et à l'échelle d'une zone géographique.

1.4.1 A l'échelle du globe

La terre, vue de l'espace, apparaît comme une planète recouverte en grande partie d'eau (planète bleue). Les océans occupent en effet une superficie à peu près égale à 70% de la surface du globe et représentent 97% de la masse totale d'eau dans la biosphère. Le tableau 1.1 donne quelques grandeurs indicatives tandis que la figure 1.3 présente la disponibilité mondiale d'eau.

On peut encore remarquer que la superficie des terres émergées de l'hémisphère Nord est deux fois supérieure à celle de l'hémisphère sud. De plus la distribution spatiale des aires continentales et océaniques à la surface du globe est

inhomogène. La distribution quantitative des eaux sur terre fait apparaître que les eaux dites douces ne représentent qu'environ 3% du volume total des eaux du globe. Elles se retrouvent à 99% dans les calottes polaires, les glaciers et les eaux souterraines de grandes profondeurs qui représentent des réserves d'eau douce difficilement accessibles. Toutefois, dans certaines régions montagneuses (Andes, Rocheuses, Alpes), les eaux de fonte alimentent la plupart des cours d'eau et le débit des fleuves est étroitement lié au taux de fonte des glaciers.

Tableau 1.1 - Fraction des réserves totales et des réserves d'eau douce des différents stocks d'eau de la planète (Tiré de Gleick, 1993))

Réservoir	Fraction des réserves totales [%]	Fraction des réserves d'eau douces [%]
Eaux océaniques	96,5379	
Eaux souterraines totales	1,6883	
Nappes d'eau douce	0,7597	30,0606
Eau du sol	0,0012	0,0471
Glaciers et couverture neigeuse permanente	1,7362	68,6972
Antarctique	1,5585	61,6628
Groenland	0,1688	6,6801
Arctique	0,0060	0,2384
Régions montagneuses	0,0029	0,1159
Permafrost	0,0216	0,8564
Réserves d'eau dans les lacs	0,0127	
Douces	0,0066	0,2598
Salées	0,0062	
Marais	0,0008	0,0327
Rivières	0,0002	0,0061
Eau biologique	0,0001	0,0032
Eau atmosphérique	0,0009	0,0368
Réserves totales	100	
Réserves d'eau douce	2,53	100

Les eaux souterraines occupent le 2^{ème} rang des réserves mondiales en eau douce après les eaux contenues dans les glaciers. Elles devancent largement les eaux continentales de surface. Leur apport est d'autant plus important que, dans certaines parties du globe, les populations s'alimentent presque exclusivement en eau souterraine par l'intermédiaire de puits, comme c'est le cas dans la majorité des zones semi-arides et arides. En Suisse, l'eau potable a pour origine principale l'eau souterraine (70 - 80%) et secondaire l'eau de surface (20 - 30%). On doit cependant garder à l'esprit que plus de la moitié de l'eau souterraine se trouve à plus de 800 mètres de profondeur et que son captage demeure en conséquence difficile. En outre, son exploitation abusive entraîne souvent un abaissement irréversible des nappes phréatiques et parfois leur remplacement graduel par de l'eau salée (problème rencontré en zone maritime telle qu'en Libye, Sénégal, Egypte, etc.).

Les eaux continentales de surface (lacs d'eau douce, rivières, fleuves, etc.) sont, à l'inverse des eaux souterraines, très accessibles. Par contre, elles sont quantitativement infimes et sont susceptibles d'être plus facilement polluées malgré l'effort fait depuis une dizaine d'années pour en améliorer la qualité. Le Canada possède à lui seul 30 % des réserves mondiales d'eau douce et 6% du ruissellement terrestre.

Quant aux eaux météoriques, elles peuvent paraître quantitativement très modestes, du moins dans certaines régions. Néanmoins, elles constituent une étape essentielle du cycle de l'eau. Le pourcentage d'eau disponible pour l'homme est certes très faible, mais suffisant grâce à la circulation ou au recyclage de cette eau.

Dans chacun des ces grands réservoirs terrestres, l'eau se renouvelle au fil des ans. La vitesse de renouvellement des eaux dans les réservoirs est mesurée par un flux : le temps de séjour moyen ou temps de résidence est obtenu en divisant la taille du réservoir par le flux d'entrée (somme de tous les flux entrants) ou de sortie (somme de tous les flux sortants) (tableau 1.2).

Tableau 1.2 - Temps de renouvellement de l'eau dans les principaux réservoirs (Tiré de Gleick (1993), Jacques (1996))

Réservoir	Temps de renouvellement (Jacques, 1996)	Temps de renouvellement (Gleick, 1993)
Océans	2500 ans	3100 ans
Calottes glaciaires	1000 – 10'000 ans	16000 ans
Eaux souterraines	1500 ans	300 ans
Eaux du sol	1 an	280 jours

Lacs	10-20 ans	1-100 ans (eaux douces)
		10-1000 ans (eaux salées)
Cours d'eau	10-20 jours	12-20 jours
Eau atmosphérique	8 jours	9 jours
Biosphère	Quelques heures	-

Le cycle global de l'eau se subdivise en cycles océanique et continental. Des échanges d'environ 40000 km³/an équilibrent le bilan de ces deux cycles. A l'échelle du globe, le bilan hydrique est théoriquement nul. La contribution de l'océan au bilan évaporation-précipitation représente 86% de l'évaporation totale, mais seulement 78% des précipitations. La différence de 8% se retrouve, sur les continents, par l'excès des précipitations sur l'évaporation. Cet excès est la cause de l'écoulement fluvial continental. L'évaporation prédomine dans les régions océaniques tropicales, tandis que les précipitations se produisent principalement dans les zones océaniques et continentales équatoriales ainsi qu'au-dessus des chaînes de montagne situées aux basses latitudes. On comprend de cette façon que le cycle de l'eau soit étroitement influencé par le rapport des superficies continents-océans ou, à superficies égales, par la répartition des aires continentales en fonction de la latitude ou, à positions égales, par la distribution des altitudes. Cependant, cette représentation du cycle de l'eau reste quand même approximative et les pourcentages attribués aux divers mécanismes de transport de l'eau peuvent être quelque peu différents suivant les auteurs. Les trois processus principaux, à savoir les précipitations, l'évaporation et le ruissellement, décroissent de l'équateur vers les pôles.

Sur un même parallèle, l'intensité de l'évaporation sur les continents est pratiquement uniforme. En général, la quantité totale de précipitations en un point est inversement proportionnelle à sa distance à l'océan. Pour une même position géographique, les quantités totales de précipitations et de ruissellement sont directement proportionnelles à l'élévation moyenne du bassin versant jusqu'à une certaine altitude (optimum pluviométrique). Parmi les composantes du cycle hydrologique, l'évaporation est la moins sensible aux changements d'environnement géographique, suivie des précipitations et du ruissellement.

1.4.2 A l'échelle des continents

A l'échelle continentale, les principaux éléments de la répartition des eaux sont donnés par le tableau 1.3 ci-après. Le pourcentage des précipitations qui ruisselle est plus important dans l'hémisphère Nord (~40%) que dans

l'hémisphère sud (Australie : ~35%, Afrique : ~20% et Amérique du sud : ~10%).

Tableau 1.3 - Principaux éléments de la répartition des eaux à l'échelle du globe

Continents	Précipitations mm	Evaporation mm	Ruissellement mm
Europe	790	507	283
Afrique	740	587	153
Asie	740	416	324
Amérique du Nord	756	418	339
Amérique du Sud	1600	910	685
Australie et Océanie	791	511	280
Antarctique	165	0	165
Moyenne pour tous les continents	800	485	315

1.4.3 A l'échelle d'une zone géographique : la Suisse

Tableau 1.4 - Bilan hydrique de la Suisse (données du Service Hydrologique National, 1985)

	Hauteur d'eau mm/an	Volume x 10 ⁶ m ³	Débit m ³ /s
Précipitation	1'456	60'100	
Ruissellement	978	40'400	1'280
Stockage	-6	250	
Evaporation	484	19'950	
Apports extérieurs	318	13'100	415
Ecoulement total	1'296	53'500	1'695

1.5 Le bilan hydrique

On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases :

- les précipitations,
- le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain,
- l'évaporation.

Il est intéressant de noter que dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée "hydrologique" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps. Le temporel introduit la notion de l'année hydrologique. En principe, cette période d'une année 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. Au niveau de l'espace, il est d'usage de travailler à l'échelle d'un bassin versant (entité structurelle définie en détails au chapitre 2) mais il est possible de raisonner à un autre niveau (zone administrative, entité régionale, etc.).

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 :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S) \quad (1.1)$$

Avec :

P : précipitations (liquide et solide) [mm],

S : ressources (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 : ressources 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, écoulee, 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 :

$$E = I - O \pm \Delta S \quad (1.2)$$

Avec :

E : évaporation [mm] ou [m³],

I : volume entrant [mm] ou [m³],

O : volume sortant [mm] ou [m³],

DS : variation de stockage [mm] ou [m³].

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

$$I - O = D \quad (1.3)$$

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

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (1.4)$$

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

$$D = P - m \cdot P^2 \quad (1.5)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle [mm],

$m = 1 / (0.8 + 0.16 T)$: coefficient régional ($m=0.42$ pour la France).

La connaissance du déficit d'écoulement permet d'évaluer le comportement du système 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.

Conclusion sur le bilan hydrique

L'application de la méthode du bilan hydrique est limitée par la difficulté de quantifier les variables. Effectivement, les processus hydrologiques sont difficiles à observer directement sur le terrain et donc à mesurer. Notons que les erreurs de mesure éventuelles des termes qu'on retrouve dans l'équation hydrologique simplifiée se répercutent directement sur les valeurs calculées de l'évaporation. Devant ces imprécisions, on suggère l'emploi de cette méthode dans le cas d'un avant-projet par exemple, pour vérifier l'état du système et surtout la validité (la fiabilité) des mesures qui le décrit.