

***CYCLE ET BILAN
HYDROLOGIQUES***

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.

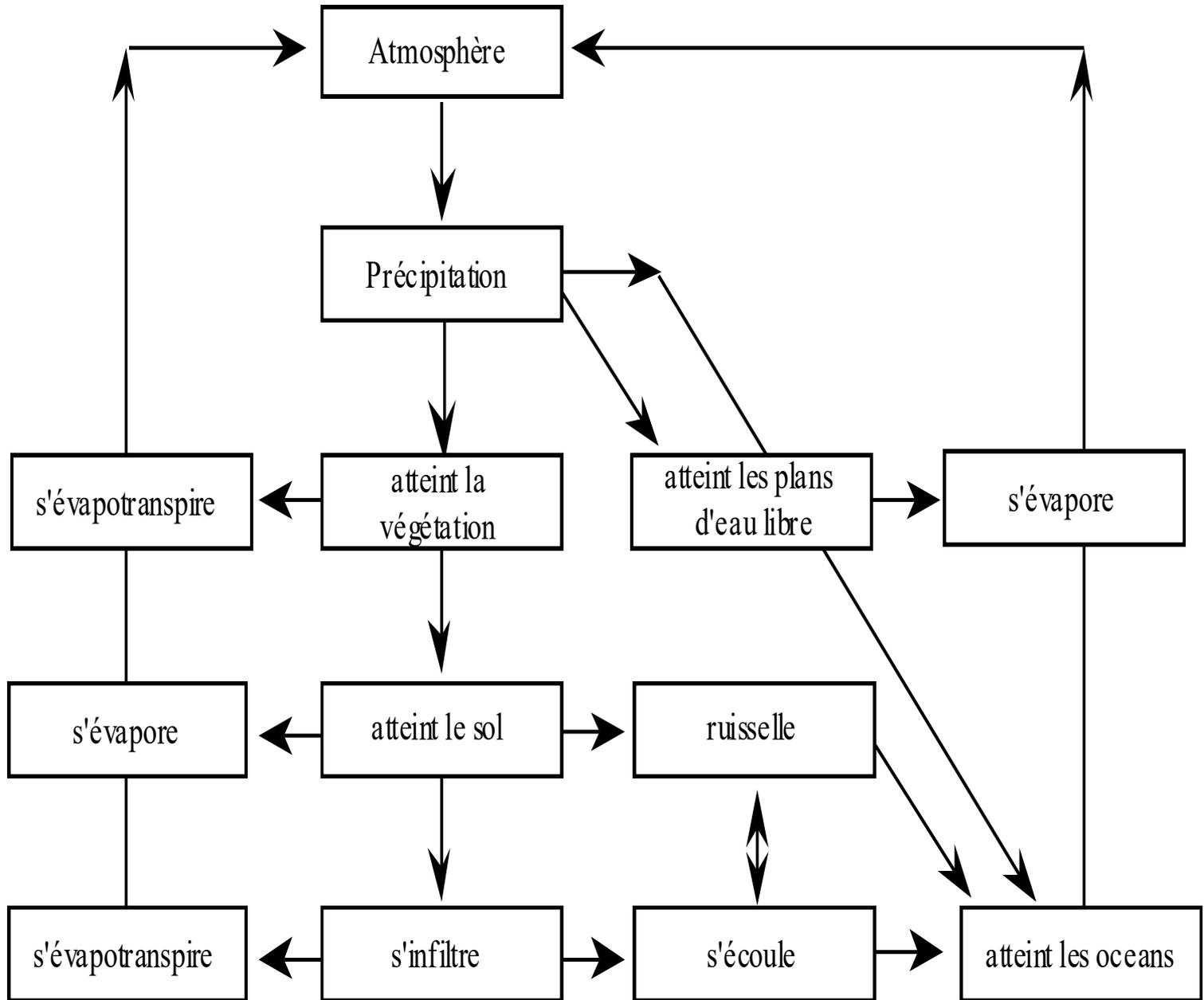
- L'eau, source de toute vie, se présente dans la nature sous trois états :
- • solide : neige et glace,
- • liquide : eau chimiquement pure ou chargée en solutés,
- • gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.

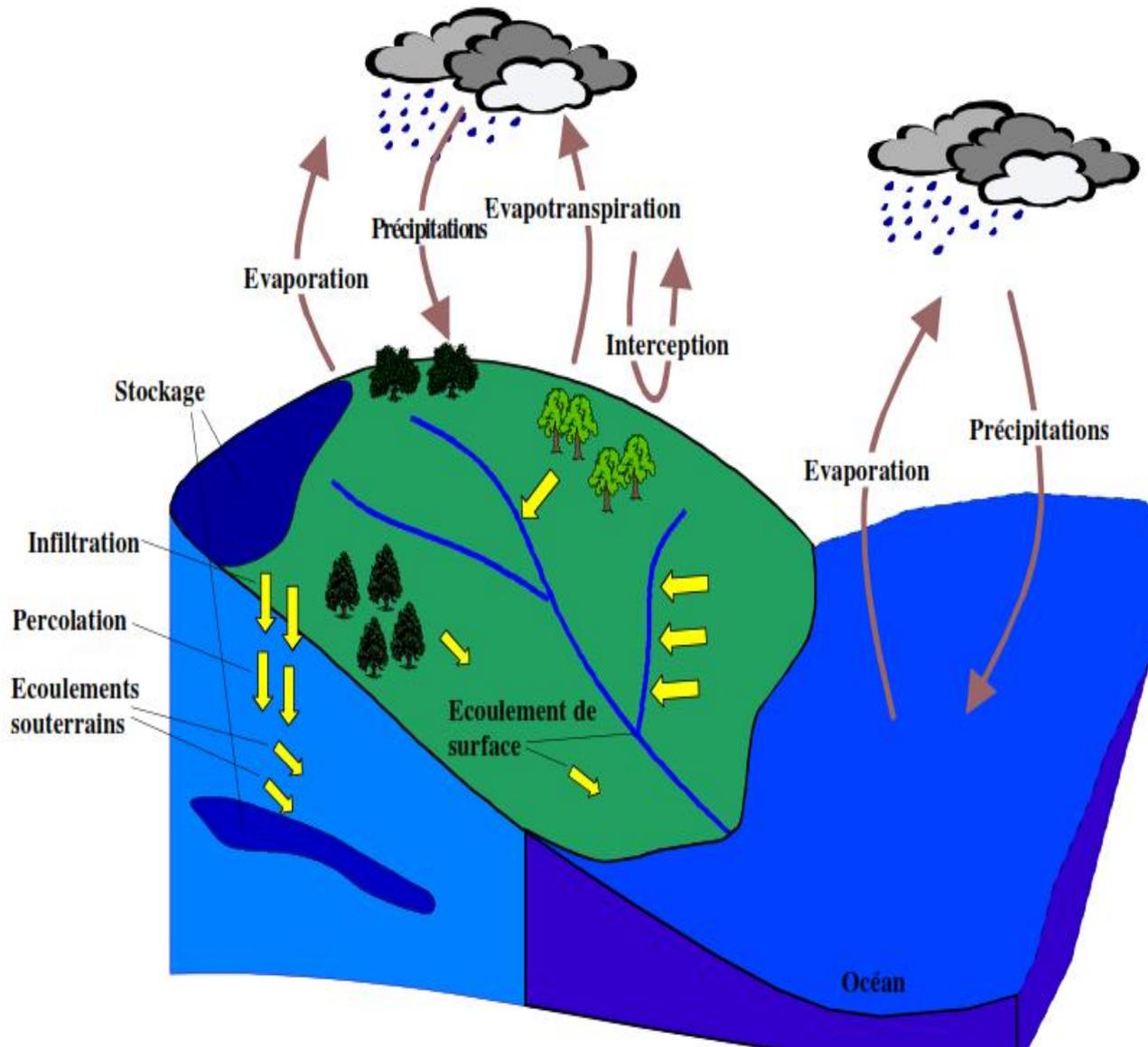
- Les changements de phase de l'eau dépendent essentiellement de la température et de la pression.
- Dans l'atmosphère terrestre, l'eau se retrouve sous ses trois formes.
- Les eaux circulent en permanence sur la terre et subissent des changements d'état. L'importance de
- ces modifications fait de l'eau le principal agent de transport d'éléments physiques, chimiques et
- biologiques.

DEFINITION ET COMPOSANTE DU CYCLE HYDROLOGIQUE

DEFINITION ET COMPOSANTE DU CYCLE HYDROLOGIQUE

- La notion de cycle hydrologique englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique surviennent conjointement. Le cycle hydrologique n'a donc ni commencement, ni fin.





Définition du cycle de l'eau.

Les éléments qui composent le cycle de l'eau sont respectivement :

- Les précipitations : eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, sous forme liquide (bruine, pluie, averse) et / ou solide (neige, grésil, grêle) ainsi que les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...).
- L'évaporation : passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation
- physique.

L'évapotranspiration : englobe les processus d'évaporation et de transpiration de la végétation

L'interception : processus selon lequel la pluie (ou dans certains cas la neige) est retenue par la végétation, puis redistribuée en une partie qui parvient au sol et une autre qui s'évapore.

Le ruissellement ou écoulement de surface : mouvement de l'eau sur ou dans les premiers horizons du sol (écoulement de subsurface), consécutif à une précipitation.

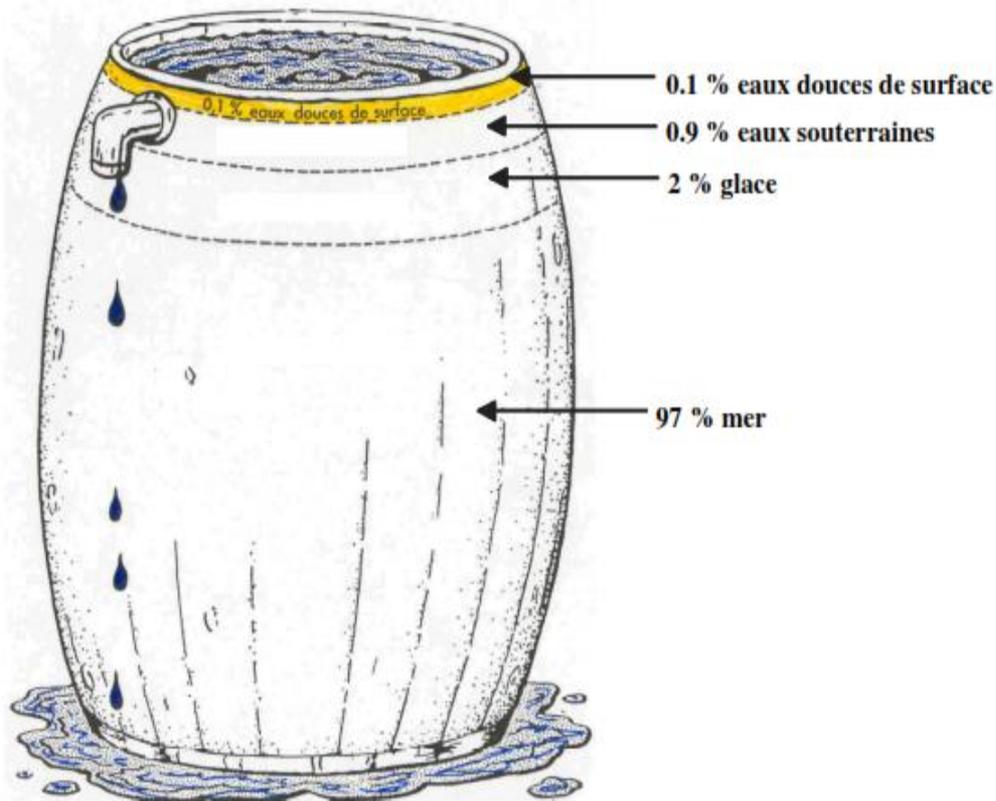
Le stockage dans les dépressions : processus au cours duquel l'eau est retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant une averse.

L'infiltration : mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol.

La percolation : mouvement de l'eau en profondeur dans les sols faisant suite à l'infiltration.

LA REPARTITION DES EAUX

La répartition des eaux peut se faire d'une manière quantitative et qualitative à l'échelle du globe, et par rapport aux différentes composantes du cycle hydrologique.



Répartition des eaux dans le monde

La terre apparaît comme une planète recouverte en grande partie d'eau (planète bleue). Mais la répartition de l'eau à la surface de la planète est très inégale. Les océans occupent 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 reste se trouve sur les continents sous forme de neige, de glace, d'eau courante ou souterraine. Une infime partie est dans l'atmosphère sous forme de vapeur. Sur cette réserve d'eau douce plus des $\frac{3}{4}$ sont immobilisées sous forme de glaces polaires.

A l'échelle continentale et selon les zones géographiques, on se doit de noter d'énormes disparités entre les régions quasiment dépourvues d'eau et celles qui en bénéficient à l'excès.

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

LE BILAN HYDRIQUE

Le cycle de l'eau peut-être analysé schématiquement selon les trois éléments suivants :

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

Dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état.

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "bilan hydrologique" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace (entité naturelle en générale) et dans le temps, à savoir l'année hydrologique (période d'une année très souvent différente de l'année civile).

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

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

Avec :

- ***P* : précipitations (liquide et solide) [mm] ;**
- ***S* : ressources disponible à la fin 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 + ΔS* : ressources accumulées à la fin de la période étudiée [mm].**

Sous sa forme la plus générale et pour une période déterminée (mois, année), ce bilan peut s'écrire encore sous la forme simplifiée suivante :

$$E = I - O \pm \Delta S \text{ avec : } \left\{ \begin{array}{l} E : \text{évaporation [mm]}, \\ I : \text{flux d'eau entrant [mm]}, \\ O : \text{flux d'eau sortant [mm]}, \\ \Delta S : \text{variation de stockage (positive ou négative) [mm]}. \end{array} \right.$$

Si $\Delta S \cong 0$ (bassin versant naturel relativement imperméable), la différence entre les débits entrant (les précipitations) et sortant correspond au déficit d'écoulement. Ce déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation.

$$I - O = D \quad \begin{array}{l} I : \text{volume entrant [mm] ou [m}^3\text{]}, \\ O : \text{volume sortant [mm] ou [m}^3\text{]}, \end{array}$$

Il peut être estimé à l'aide de mesures (pluies et débits) ou de méthodes de calcul (formules de Turc et Coutagne).

Formule de Turc:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle

T : température moyenne annuelle

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

-Formule de Coutagne:

$$D = P - m \cdot P^2$$

ou, D : déficit d'écoulement [mm],

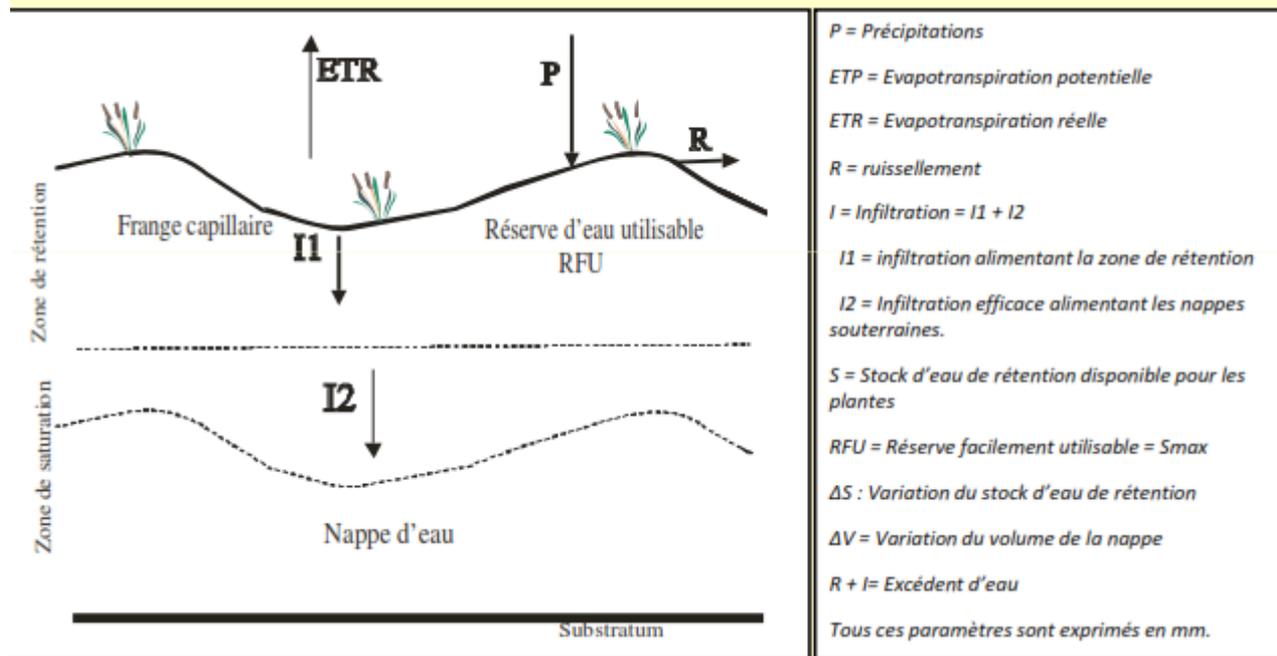
P : pluie annuelle [mm],

$m = 1/(0.8 + 0.16 T)$: 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 calculéesdirectement et les valeurs estimées dans un bassin versant plus grand.

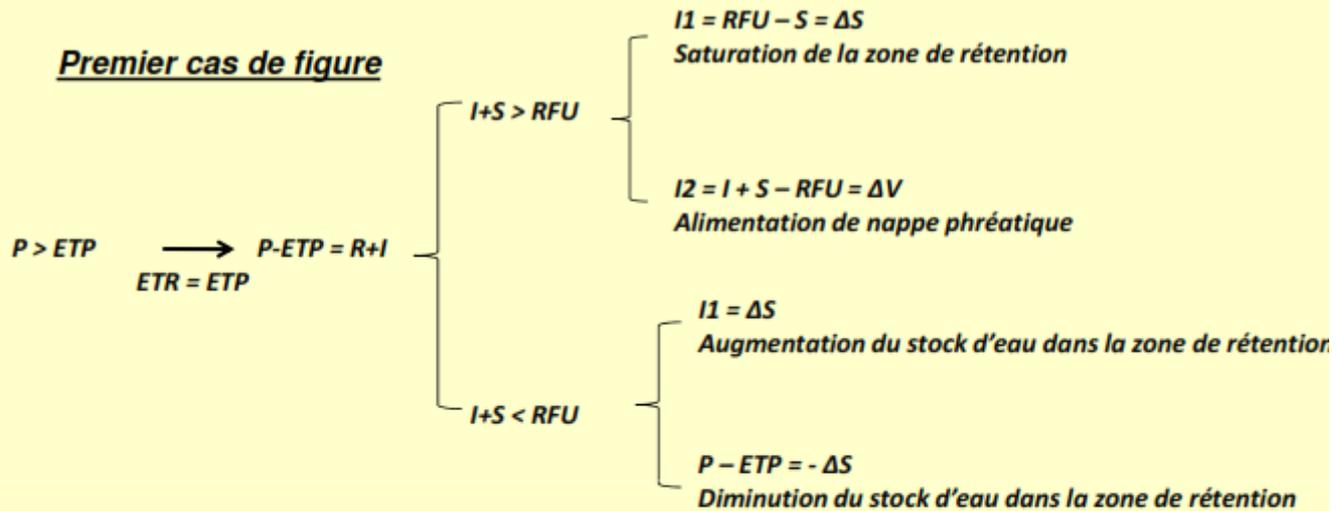
Bilan simplifié selon THORNTHWAITE

Le bilan est établi à partir de P , de ETP et de RFU . Pour effectuer ce bilan on admet que la satisfaction de l' ETP par P est prioritaire sur l'écoulement Q c'est-à-dire qu'avant qu'il y ait écoulement, il faut que l' ETP égale l' ETR . De même la RFU est prioritaire sur l'écoulement.

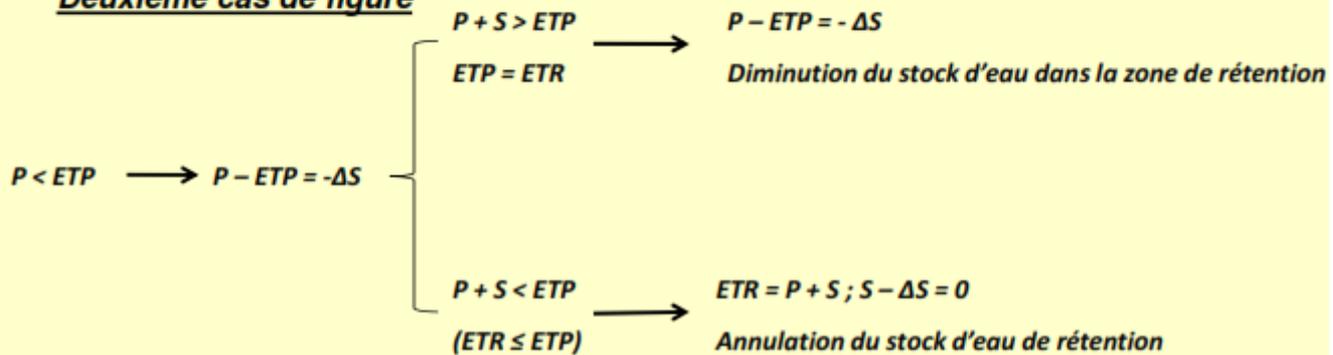


Algorithme de calcul de l'évapotranspiration réelle et de l'infiltration efficace.

Premier cas de figure



Deuxième cas de figure



On peut distinguer plusieurs cas de figures :

- **$P < ETP$** : l'évapotranspiration se fera à la fois sur la totalité des précipitations et sur les réserves emmagasinées par le sol.
- **$ETR = ETP$** jusqu'à épuisement des réserves (RFU atteint son maximum).
- **$P = ETP$** : toute la quantité d'eau précipitée sera reprise par l'ETR , celle-ci est égale à l'ETP.
- **$P > ETP$** : l'évapotranspiration se déroulera d'une façon normale, mais il restera une certaine quantité d'eau disponible (surplus) qui sera emmagasinée dans le sol jusqu'à la saturation, permettant ainsi de reconstituer la réserve du sol.
- **$P \gg ETP$** : la quantité d'eau précipitée sera suffisante pour l'évapotranspiration et l'ETR est égale à l'ETP, mais le surplus d'eau se découlera soit par infiltration, soit par ruissellement, si la réserve facilement utilisable atteint son maximum.

Bilan simplifié selon thornthwaite

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU).

On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU) ; cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU qui est de l'ordre

de 0 à 200 mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm).

On admet que la satisfaction de l'Etp a priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant ($Etp = Etr$). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement.

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'Etp et de la RFU.

Si $P > Etp$, alors :

- $Etr = Etp$
- il reste un excédent ($P - Etp$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q

Si $P < Etp$:

- on évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'Etr soit :
 - $Etr = P + \min(RFU, Etp - P)$
 - $RFU = 0$ ou $RFU + P - Etp$
- si $RFU = 0$, la quantité ($Da = Etp - Etr$) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pluie du mois	67	55	41	49	54	77	60	67	65	55	61	62
Etp	3	8	33	61	90	103	109	94	67	35	14	5
RFU	100	100	100	88	52	26	0	0	0	20	67	100
Etr	3	8	33	61	90	103	86	67	65	35	14	5
D.A.	0	0	0	0	0	0	23	27	2	0	0	0
Ecoulement	64	47	8	0	0	0	0	0	0	0	0	23
							<-	RFU vide	->			

Bilan Hydrologique dans un Bassin versant

	sep	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout
ETP	55	43	31	27	13	09	82	64	77	81	90	101
P	60	75	10	07	123	88	05	10	00	01	05	07
P-ETP	5	32	-21	-20	110	79	-77	-54	-77	-80	-85	-94
RFU 100	100	100	79	59	100	100	23	00	00	00	00	00
ETR	55	43	31	27	13	09	82	33	00	01	05	07
Δ rés	0	0	-21	-20	41	0	-77	-23	0	0	0	0
Excéd	+5	+32	0	0	+69	+79	0	0	0	0	0	0
Défic Agri	0	0	0	0	0	0	0	31	77	80	85	94
Infil ou Ecoule	+5	+32	0	0	+69	+79	0	0	0	0	0	0

**ETP: Evapotranspiration Potentielle (mm), ETR: Evapotranspiration réelle(mm),
P: Précipitations (mm), Réserve Facilement utilisable (mm), Infiltration(=Pluie efficace(mm))**