

## Chapitre 03 : Mesure des paramètres climatique

### Introduction

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, *etc.*), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration. Pour l'évaporation, la quantité d'eau qui repart dans l'atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l'air, de l'eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l'ensoleillement, *etc.* L'évapotranspiration, elle, dépend en plus du couvert végétal et de son stade de développement ; sa mesure en est rendue d'autant plus difficile. (**laborde, 2009**)

### 1. Mesure des paramètres physiques conditionnant l'évaporation

Ces mesures sont généralement faites par les services météorologiques. Cependant, dans certains cas particuliers, les données ne sont pas disponibles à proximité du site envisagé ; dans ce cas, l'hydrologue peut être amené à installer des stations climatologiques plus ou moins complètes.

Il faut noter qu'il existe de grandes différences dans les appareils de mesures. Lorsqu'ils sont destinés à équiper des stations du type synoptique, on rencontre des appareils très précis mais nécessitant entre autres un important investissement, des sources d'énergie électrique et un personnel compétent. Au contraire, pour les stations tertiaires que l'hydrologue peut être amené à installer, il convient de mettre l'accent sur la robustesse et l'autonomie d'appareils destinés bien souvent à être "abandonnés" durant des semaines.

### 2. Mesure des températures

Un thermomètre quel qu'il soit ne mesure que sa propre température. Il faut donc prendre un soin particulier pour qu'il soit en équilibre thermique avec le milieu dont on veut mesurer la température. Que ce soit pour la mesure de la température de l'air ou de l'eau, il convient donc de protéger l'appareil des rayonnements solaires directs ou indirects.

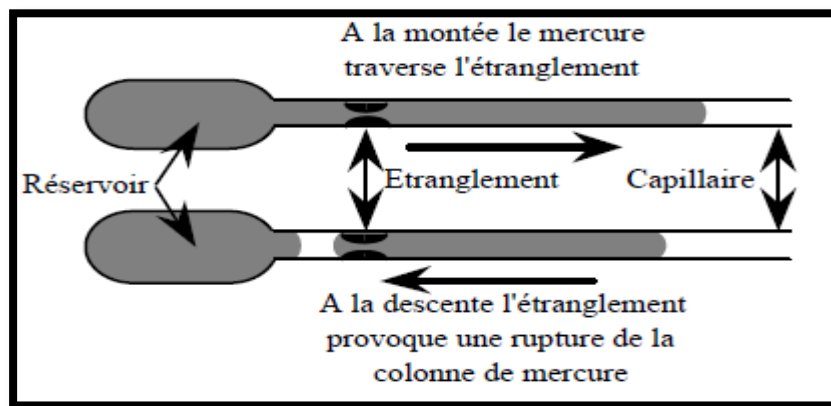
L'air étant un très mauvais conducteur de la chaleur, il faut renouveler l'air au contact du thermomètre ; l'abri devra donc être aéré. Sous nos climats, la ventilation naturelle à travers des parois à persiennes est considérée comme suffisante. Par ailleurs, l'abri sera peint en blanc, brillant si possible, de façon à limiter son échauffement. Enfin, la mesure de température se fera à environ 1,5 m du sol.

Pour les besoins de l'hydrologie, un thermomètre à mercure à 0,1° C est suffisamment précis, mais pour obtenir des températures moyennes

journalières ou mensuelles, il nécessiterait des relevés trop fréquents. On peut alors utiliser des thermomètres à maxima et minima :

### 2.1 Le thermomètre à maxima

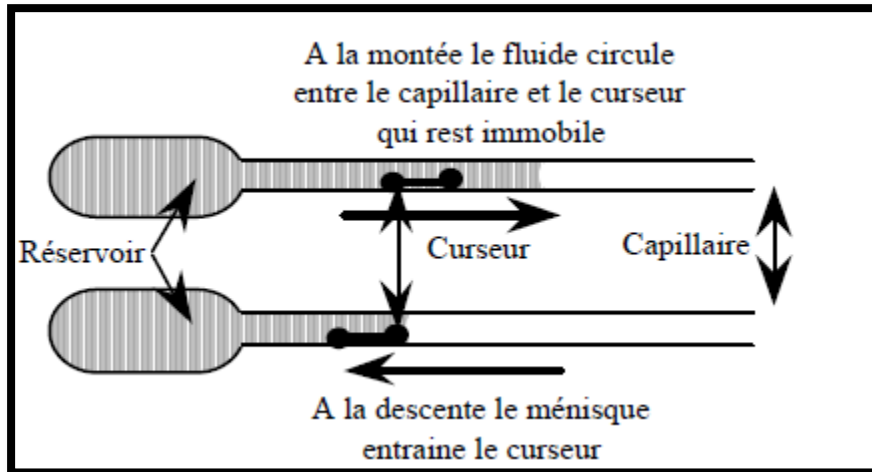
Le thermomètre à maxima est un thermomètre à mercure présentant un étranglement à la sortie du réservoir. Lorsque la température augmente, le mercure le franchit aisément. Par contre lorsque la température décroît, le mercure se fractionne et maintient donc l'indication de la température maximale atteinte. Pour la bonne marche de l'appareil, il convient de l'installer dans une position voisine de l'horizontale (environ 2°). Pour réduire le fractionnement après la lecture, il suffit de "centrifuger" à la main l'appareil. (*Fig : 18*)



**Figure 18 :** Principe de fonctionnement d'un thermomètre à maxima.

### 2.2 Le thermomètre à minima

Le thermomètre à minima est généralement un thermomètre à alcool dont le capillaire contient un petit index mobile se déplaçant librement. Si la température augmente, l'alcool monte dans le capillaire en s'écoulant autour de l'index qui ne bouge pas. Par contre si la température baisse, l'alcool va s'écouler autour de l'index jusqu'à ce que le ménisque l'atteigne. Les forces de capillarité sont alors suffisantes pour que le ménisque entraîne l'index dans sa descente. (*Fig : 19*)



**Figure 19 :** Principe de fonctionnement d'un thermomètre à minima.

On constate généralement que la température minimale est atteinte quelques temps avant le lever du soleil alors que la température maximale s'observe vers midi au soleil. Le relevé des températures maxi et mini en fin de journée permet d'évaluer, à quelques dixièmes de degrés près, la température moyenne journalière :

$$\overline{\Theta}_j = \frac{\Theta_{\min} + \Theta_{\max}}{2} \pm 0.1^\circ\text{C} \quad (05)$$



**Figure 20 :** Thermomètre ordinaire à maxima et à minima (Source Météo France)

### 3. Mesure de l'humidité de l'air

La mesure directe de l'humidité de l'air est difficile ; aussi utilise-t-on le plus souvent des mesures indirectes :

### 3.1 Le psychromètre

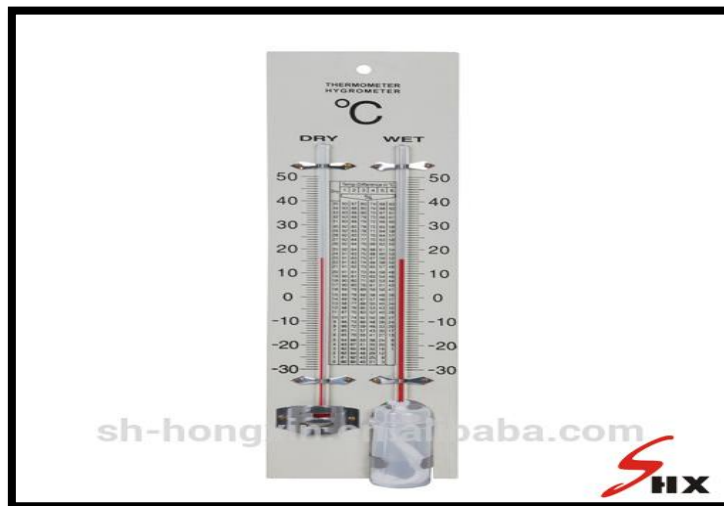
Le psychromètre se compose de deux thermomètres à mercure, l'un normal dit "sec" et l'autre dit "humide" dont le réservoir est entouré d'une mousse humidifiée par de l'eau. Le thermomètre sec indique alors la température de l'air ambiant ( $t$ ) alors que le thermomètre humide enregistre une température plus faible ( $t'$ ) due à l'évaporation de l'eau de la mousse.

L'évaporation est d'autant plus intense et cette température plus faible que l'air est plus sec. Les tables psychrométriques permettent, connaissant  $Q$  sec,  $Q$  humide et la pression atmosphérique, d'évaluer le degré de saturation de l'air. A défaut on utilisera la relation suivante :

$$e_t = e_{st} - 0,00079 \cdot P \cdot (t-t') \quad (06)$$

( $e_t$  et  $e_{st}$  sont respectivement la tension de vapeur réelle à la température  $t$  et la tension de vapeur saturante à la température  $t'$ ,  $P$  est la pression).

Evidemment, pour que la mesure soit représentative, il faut éviter que la vapeur émise par la mousse humide ne stagne autour du thermomètre ce qui perturberait la mesure. On utilise donc de préférence des psychromètres à ventilation forcée où l'air est introduit dans l'appareil par une petite turbine actionnée par un moteur à ressort. L'avantage de ce type d'appareil est de permettre des mesures tout à fait reproductibles et indépendantes de l'aération de l'abri ou du tour de main de l'observateur. (**Fig : 21**)



**Figure 21** : Psychromètre fronde (Source Alibaba.com)

### 3.2 Hygromètre enregistreur

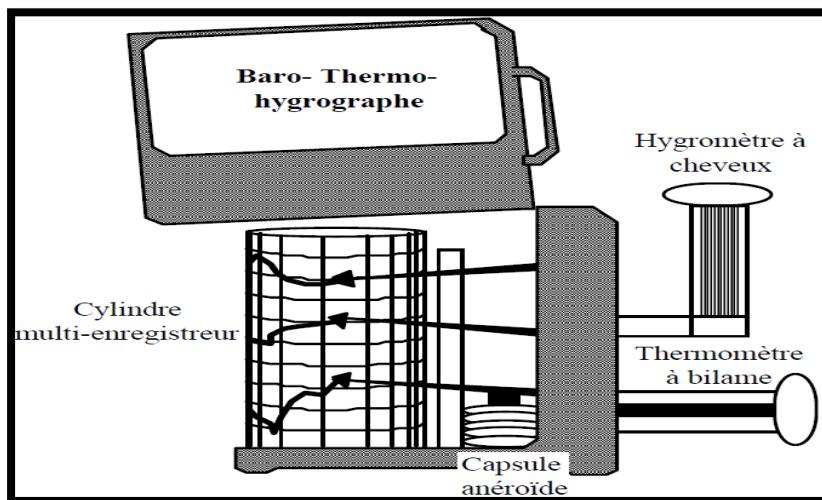
Les psychromètres se prêtent mal à un enregistrement en continu du degré de saturation de l'air. On a recours alors à des hygromètres organiques utilisant la propriété de certains corps de s'allonger lorsque l'humidité relative croît.

Le plus souvent, c'est une mèche de cheveux qui sert de "capteur" ; leur dilatation relative est amplifiée et rendue linéaire en fonction de l'humidité relative. Les mouvements sont transmis à une plume qui enregistre les variations sur un diagramme entraîné par un mouvement d'horlogerie. Là encore, on utilise le plus souvent des diagrammes hebdomadaires.

Malheureusement, ces appareils sont sujets à de fréquents détarages dus entre autres au vieillissement du capteur ou à un phénomène d'hystérésis après une période sèche. Il convient donc de ré étalonner fréquemment ces enregistreurs après avoir eu soin des ré humidifier. Le réétalonnage pourra être fait grâce à un psychromètre lors du relevé hebdomadaire du diagramme.

#### 4. Mesure des pressions

La mesure des pressions peut être intéressante dans quelques cas particuliers (surveillance piézométrique de nappes par exemple), mais elle est nécessaire pour l'interprétation d'autres mesures. Les appareils le plus souvent utilisés sont des barographes métalliques à capsules anéroïdes. Certains types d'appareils comme celui présenté plus loin, permettent l'enregistrement en "parallèle" de la température, de l'hygrométrie et de la pression. (*Fig : 22*)



**Figure 22** : barographes métalliques (laborde, 2009)

#### 5. Mesure du rayonnement solaire

Une mesure indirecte mais beaucoup plus simple du rayonnement solaire est celle de la durée d'insolation. L'appareil le plus utilisé est l'héliographe de Campbell-Stockes . Il se compose d'une sphère de cristal qui, jouant le rôle d'une loupe, focalise les rayons du soleil. A la distance focale de la sphère, on dispose à l'opposé du soleil une feuille de papier sensible. Lorsque le soleil brille, le papier se consume et la brûlure progresse avec le mouvement apparent du soleil. Chaque soir, on relève le papier qui, convenablement gradué, permet de mesurer la durée quotidienne d'insolation. (*Fig : 23*)



**Figure 23:** Héliographe de Campbell-Stockes

## 6. Mesure du vent

La mesure du vent est faite dans les stations météorologiques par des anémomètres enregistreurs des vitesses instantanées, doublés d'une girouette donnant la direction du vent. Pour l'hydrologue et sauf cas particulier, on peut se contenter d'anémomètres totalisateurs.

En général, ils comportent quatre coupelles hémisphériques de 44 mm de diamètre. Le mouvement de rotation provoqué par le vent quelle que soit sa direction, est transmis par un axe et un système d'engrenage à un compteur indiquant directement le nombre de kilomètres parcourus par le vent. Il suffit de relever ce compteur à l'intervalle de temps souhaité (de l'ordre de une à deux fois par jour) pour pouvoir calculer la vitesse moyenne du vent. La vitesse du vent variant d'une façon sensible au voisinage du sol, on dispose généralement les anémomètres à 10 m au-dessus d'un sol plat et à une distance de tout obstacle égale au moins à dix fois la hauteur de cet obstacle. (*Fig : 24*)



**Figure 24 :** Anémomètre

## 7. Mesures de l'évaporation

Les mesures de "l'évaporation" peuvent se faire de différentes façons selon les buts poursuivis : estimation de l'évaporation à partir d'un réservoir, estimation de l'évaporation potentielle. Parfois on souhaite même évaluer l'ensemble de l'évaporation et de la transpiration par le système sol végétaux, c'est à dire directement l'évapotranspiration réelle.

### 7.1 Mesures de l'évaporation à partir d'une surface libre

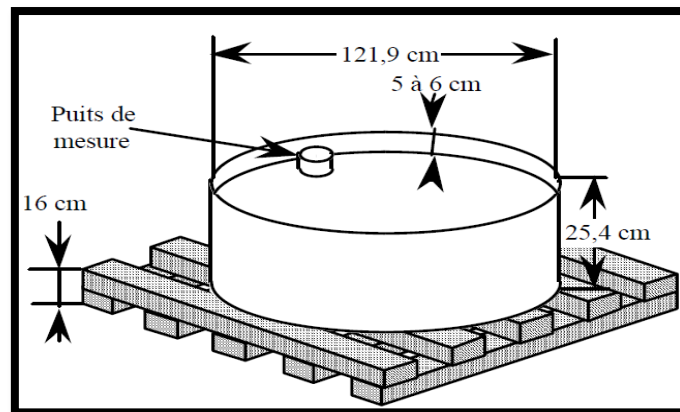
Différents types d'appareils ont été conçus mais avec leurs défauts et leurs qualités. Les plus utilisés sont :

#### 7.1.1 Bac classe A (du Weather Bureau, U.S.A.)

Ce bac est constitué d'un cylindre métallique de 121,9 cm de diamètre et de 25,4 cm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une épaisseur d'eau de 17,5 à 20 cm.

Le cylindre est supporté par un caillebotis à 15 cm du sol. Le caillebotis doit permettre une bonne aération sous le bac.

Ce bac universellement répandu ne satisfait que très partiellement l'hydrologue car, du fait de sa disposition par rapport au sol, il est très sensible aux variations de température, son inertie thermique étant faible. (*Fig : 25*)

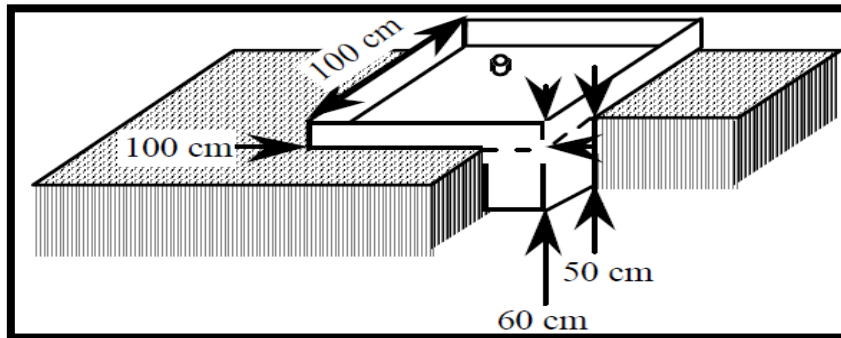


**Figure 25** : Bac classe A (laborde, 2009)

#### 7.1.2 Bac Colorado et Bac ORSTOM

Le bac Colorado et le bac ORSTOM qui en dérive, sont des bacs de section carrée de 92,5 cm de côté (1 m pour le bac ORSTOM), d'une hauteur de 60 cm et enterré de 50 cm. L'eau est maintenue à 10 cm environ du rebord, soit sensiblement au niveau du sol. Cet appareil étant enterré et avec une plus

grande épaisseur d'eau, il possède une plus grande inertie thermique et se rapproche plus des conditions naturelles. (*Fig : 26*)



**Figure 26** : Bac Colorado (laborde, 2009)

### 7.1.3 Bac CGI 30

De conception analogue au bac Colorado, ce bac, d'origine soviétique, est celui recommandé par l'O.M.M. C'est un cylindre de 61,8 cm de diamètre (3 000 cm<sup>3</sup>) à fond conique. De 60 cm de profondeur, il est enterré de façon à ce que sa collerette dépasse de 7,5 cm du sol, le niveau d'eau étant maintenu au niveau du sol.

## 7.2 Utilisation des bacs et des résultats des mesures

Ces bacs doivent toujours être installés dans un site représentatif du milieu hydrologique ambiant. Sous nos climats, on évitera de mettre les bacs au milieu d'une zone recouverte de sable ou de gravillons (augmentation de la température) mais plutôt au milieu d'une zone enherbée. Par ailleurs, les bacs devront être entourés d'un grillage pour éviter que des animaux viennent y boire.

Chaque bac doit être associé à un pluviomètre pour pouvoir corriger l'évaporation apparente des précipitations. Cependant, le pluviomètre doit avoir le même coefficient de captation que les bacs. On utilisera donc des pluviomètres de mêmes dimensions que les bacs et disposés au sol. Evidemment, lorsque les averses sont importantes (quelques dizaines de millimètres), il est illusoire de mesurer avec une bonne précision une évaporation de quelques millimètres au maximum. Pour mesurer l'évaporation apparente, on peut utiliser une pointe immergée fixe ; on mesure alors le volume d'eau à ajouter ou retrancher pour rétablir le niveau du bac.

Cette méthode étant plus pénible pour obtenir une bonne précision, il est préférable d'utiliser une pointe recourbée montée sur une tige filetée ; une molette graduée permet de déplacer la pointe.



## 8. Mesures et estimation de l'évapotranspiration

### 8.1 Notion d'évapotranspiration réelle et potentielle

On appelle évapotranspiration réelle (notée par la suite Etr), la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

L'évapotranspiration potentielle (notée par la suite Etp) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

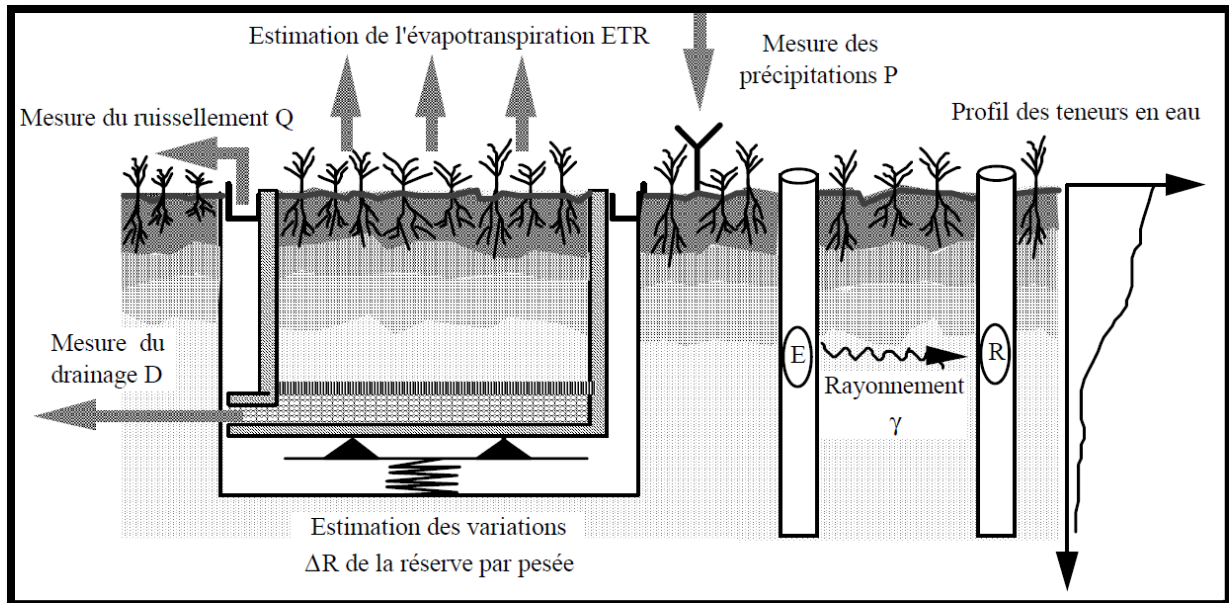
#### 8.1.1 Mesures directes

Les mesures directes d'Etp ou d'Etr se font surtout en agronomie où on étudie chaque type particulier de cultures. Les résultats de ces mesures sont difficiles à utiliser en hydrologie car il y a une très importante différence d'échelle entre la surface de la parcelle d'essai (quelques mètres carrés) et celle d'un bassin versant (des dizaines de kilomètres carrés). Par ailleurs, les plantations utilisées ne sont généralement pas représentatives de la végétation d'un bassin versant.

La mesure d'Etr peut être faite sur une case lysimétrique. On isole un bloc du sol de quelques mètres-carrés de surface sur environ 2 m d'épaisseur. Cet échantillon de terrain est drainé à sa base et on enregistre les débits D sortant par les drains. En surface, un collecteur fait le tour de la parcelle et récupère les eaux de ruissellement dont le débit Q est également enregistré. Les apports d'eau par la pluie P sont mesurés avec un pluviomètre. Enfin, on évalue le stock d'eau R contenu dans la case, soit par une mesure à la sonde à neutron des teneurs en eau dans le sol, soit en montant la case sur un système de bascule. (*Fig : 27*)

Un bilan très simple permet d'évaluer l'Etr sur un intervalle de temps  $\Delta t$  puisque l'on doit avoir la relation suivante :

$$P = [Q + D + Etr] + \Delta R \quad (07)$$



**Figure 27 :** Exemple d'une case lysimétrique

Le même système que la case lysimétrique, mais on parle alors "d'évapotranspiromètre", permet de mesurer l'Etp. Il suffit alors de maintenir un niveau d'eau dans les drains pour que l'eau disponible ne soit plus un facteur limitant de l'Etr. On mesure Etp en écrivant le même bilan que précédemment mais le terme D pouvant être positif ou négatif.

### 8.1.2 Estimation de l'évapotranspiration

Plusieurs formules permettent d'évaluer l'Etp à partir de différentes mesures climatologiques. La plus complète et la plus complexe est certainement la formule de Penman basée sur la notion de bilan énergétique. Cependant, le nombre de paramètres utilisés par cette formule (différentes températures, hygrométrie, rayonnement global, albédo, etc.) font que son emploi est rarement possible compte tenu des mesures disponibles.

#### 8.1.2.1 Formule de Turc

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de Penmann, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$Etp = 0.4 * \frac{t}{t+15} * (I_g + 50) * k \quad (08)$$

**Etp** : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

**t** : température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

**I<sub>g</sub>** : radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm<sup>2</sup>/jour) ;

**K** : un coefficient égal à 1 si l'humidité relative  $hr$  est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats) ;

$$\text{Sinon } K = 1 + \frac{50-hr}{70}$$

### 8.1.2.2 Formule de Thornthwaite

THORNTHWAITE a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$\text{Avec : } ETP = 16 * \left(10 \frac{t}{I}\right)^a * k \quad (09)$$

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.5} \text{ et } I = \sum_I^{12} I$$

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

**t** : est la température moyenne mensuelle du mois considéré ;

**Etp** : est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau) ;

**K** : est un coefficient d'ajustement mensuel.

**Tableau 03** : Les coefficients de K

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>K</b>	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	1.05	0.91	0.75	0.70

### 8.1.2.3 Autres formules

D'autres formules pour évaluer l'Etp sont utilisables. Citons par exemple les formules de Bouchet, de Blaney et Criddle, de Papadakis dont on trouvera les expressions dans des ouvrages de climatologie et d'agronomie.

Nous avons déjà cité celle de Penmann mais plusieurs autres versions plus ou moins simplifiées ou compliquées en ont été proposées. Basée sur une autre approche, on peut citer la formule de Bouchet qui exprime Etp en fonction de l'évaporation enregistrée au Piche et la formule de Prescott basée sur l'évaporation d'une surface d'eau libre.

## 8.1.3 Evaluation de l'évapotranspiration réelle

### 8.1.3.1 Formule de Turc

TURC a proposé une formule permettant d'évaluer directement l'Etr annuelle moyenne d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle :

$$E_{tr} = \frac{p}{\sqrt{0.9 + \frac{p^2}{t^2}}} \text{ avec } L = 200 + 25 t + 0.05 t^3 \quad (10)$$

**E<sub>tr</sub>** : représente l'évapotranspiration réelle (en mm/an) ;

**P** : la hauteur annuelle de pluie (en mm) ;

**t** : la température annuelle (en °C).

Cette formule est d'un emploi aisé mais elle ne donne malheureusement que l'ordre de grandeur de l'E<sub>tr</sub>. En effet, cette formule permet l'estimation du "déficit d'écoulement" qui ne se rapproche de l'évapotranspiration réelle que pour des bassins versant relativement étendus, sans échanges à la frontière et pour des durées d'observation assez longues pour que l'on puisse négliger les variations de réserves souterraines dans la mesure du possible, on préférera la méthode suivante :

#### 8.1.3.2 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'E<sub>tp</sub> 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 (E<sub>tp</sub> = E<sub>tr</sub>). 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'E<sub>tp</sub> et de la RFU.

**Si P > E<sub>tp</sub>, alors :**

- E<sub>tr</sub> = E<sub>tp</sub>
- Il reste un excédent (P - E<sub>tp</sub>) qui est affecté en premier lieu à la RFU , et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q

**Si P < E<sub>tp</sub> :**

- On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'E<sub>tr</sub> soit :

- $E_{tr} = P + \min(RFU, E_{tp} - P)$  (11)

- $RFU = 0$  ou  $RFU + p - E_{tp}$  (12)

- **Si  $RFU = 0$** , la quantité ( $Da = E_{tp} - E_{tr}$ ) 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.

### Références bibliographique

Météo France

J.P. Laborde, 2009.cours éléments d'hydrologie de surface université de Nice - Sophia Antipolis, 202 pages.