

CH. RIOU *

Calcul de l'évaporation par la méthode du bilan énergétique en zone sahélienne

Parmi les différentes méthodes rationnelles appliquées au calcul de l'évaporation, celle du bilan énergétique s'est toujours révélée particulièrement féconde. Le nombre des mesures étant maintenant suffisamment grand à Fort-Lamy, il a paru utile de confronter les résultats obtenus avec les valeurs calculées suivant la théorie du bilan d'énergie, et ceci, à la fois pour l'évaporation en bac et pour l'évapotranspiration potentielle.

* Maître de Recherches de l'O.R.S.T.O.M. Centre O.R.S.T.O.M. de Fort-Lamy.

I. — LA MÉTHODE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE ET LE RAPPORT DE BOWEN

1.1. — Équation générale du bilan.

On peut écrire, en négligeant certains termes, telle que l'énergie photosynthétique :

$$R_g(1 - b) - R_e = Q + LE + K \quad (1)$$

où R_g est le rayonnement global;

— b l'albedo;

— R_e le rayonnement thermique effectif égal à la différence entre le rayonnement thermique du sol et celui de l'atmosphère ($R_e = R_T - R_A$);

— Q la chaleur accumulée par le sol;

— K la chaleur échangée avec l'air;

— E l'évaporation;

— L la chaleur latente d'évaporation de l'eau;

Cette relation (1) se simplifie, si on l'applique à des périodes suffisamment longues pour rendre Q négligeable devant les autres termes, et l'on a finalement :

$$R_g(1 - b) - R_e = K + LE$$

ou, en posant $R_g(1 - b) - R_e = R_N$ (rayonnement net) ;

$$R_N = K + LE$$

Il suffit de déterminer K , pour obtenir E . On s'attache en fait à évaluer le rapport K/LE .

1.2. — K et E dans la couche limite.

On peut exprimer le flux de chaleur dans la couche limite sous la forme :

$$K = -k_c \frac{\delta T}{\delta Z}$$

$\frac{\delta T}{\delta Z}$ étant le gradient de température dans la couche limite, et k_c le coefficient de conductivité thermique. Z désigne une position sur une normale au sol.

De même, le flux de vapeur s'écrit :

$$E = -D_c \frac{\epsilon}{p} \frac{\delta e}{\delta Z}$$

où $\frac{\delta e}{\delta Z}$ est le gradient de tension de vapeur dans la couche limite;

D_c le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau;

p la pression atmosphérique ;

ϵ le rapport des masses moléculaires de la vapeur d'eau et de l'air.

Le rapport $\frac{K}{LE}$ peut alors se mettre sous la forme :

$$\beta = \frac{K}{LE} = \frac{k_c \frac{\delta T}{\delta Z}}{D_c \frac{\varepsilon}{p} L \frac{\delta e}{\delta Z}}$$

Si on pose $k_c = Ck$, C étant la chaleur spécifique de l'air sec à pression constante, dans la couche limite le rapport $\frac{k}{D_c}$ est remarquablement constant, et égal à 0,837.

En appelant T_s la température de la surface évaporante, et T_c la température de la couche limite, e_s et e_c les tensions de vapeur au niveau de la surface et de la couche limite, et en posant :

$$\frac{\delta T}{\delta Z} \neq \frac{T_c - T_s}{\delta}$$

$$\frac{\delta e}{\delta Z} \neq \frac{e_c - e_s}{\delta}$$

où δ est l'épaisseur de la couche limite, on peut finalement écrire :

$$\beta_c = 0,837 \frac{C}{\varepsilon L} p \frac{T_s - T_c}{e_s - e_c}$$

$A = \frac{C}{\varepsilon L} p$ n'est autre que la « constante » psychrométrique.

Le rapport $\beta_c = \frac{K}{LE}$ est le rapport de BOWEN qui se présente finalement sous la forme :

$$\beta_c = 0,00055 p \frac{T_s - T_c}{e_s - e_c}$$

e désigne, d'une façon générale, une tension de vapeur d'eau. Les indices s et c désignent respectivement la surface évaporante et la couche limite.

p est la pression atmosphérique.

1.3. — K et E dans la couche turbulente.

Par analogie à la théorie moléculaire, on a posé, pour le transfert de vapeur :

$$E = - K_v \frac{\varepsilon \rho}{p} \frac{\delta e}{\delta Z}$$

où ρ est la masse spécifique de la vapeur d'eau

ε la densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air sec ($= 0,622$)

K_v la diffusivité turbulente de la vapeur d'eau

et, pour le transfert de la chaleur :

$$K = - K_{c\rho} C_p \frac{\delta T}{\delta Z}$$

C_p , chaleur spécifique de l'air humide

K_c , diffusivité turbulente de la chaleur

$\frac{\delta e}{\delta Z}$ et $\frac{\delta T}{\delta Z}$ sont les gradients de tension de vapeur et de température entre deux niveaux différents au-dessus de la surface évaporante.

Le rapport de BOWEN dans la couche turbulente devient ainsi :

$$\frac{K}{LE} \neq \frac{K_c C_p}{K_v \varepsilon L} p \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2}$$

où T_1 , T_2 , e_1 et e_2 sont des valeurs prises aux deux niveaux Z_1 et Z_2 .

On y retrouve le coefficient psychrométrique :

$$\frac{C_p}{\varepsilon L} p = A$$

et on peut écrire :

$$\beta r = 0,00066 p \frac{K_c}{K_v} \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2}$$

1.4. — Rapport $r = \frac{K_c}{K_v}$.

Ce rapport est assimilé à 1 dans les formules pratiques. Cependant, il faut avouer que les résultats de la littérature sont très discutés et que dans de nombreux cas K_c est supérieur à K_v .

— EN 1949, Pasquill souligne que c'est le cas des conditions d'instabilité;

— EN 1954, Rider trouve que K_c est toujours légèrement supérieur à K_v et que, dans le cas de conditions très instables : $K_c = 3 K_v$.

Le rapport de BOWEN dans la couche turbulente devient donc :

$$\beta r = 0,00066 p r \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2}$$

II. — LA MÉTHODE DE BOWEN — LA FORMULE DE PENMAN

$$\text{De } R_N = K + LE$$

et $\frac{K}{LE} = \beta_T$, nous tirons

$$LE = \frac{R_N}{1 + \beta_T}$$

où $\beta_T = r \gamma \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2}$

avec $\gamma = 0,00066 p$.

La formule de PENMAN va englober les processus de la couche limite et de la couche turbulente et prendre, pour niveau Z_1 , la surface évaporante, et, pour niveau Z_2 , un niveau quelconque qui, pratiquement, est celui de l'abri météorologique.

On pose alors :

$$\beta = r \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a}$$

où T_s et e_s sont les valeurs prises sur la surface évaporante;

T_a la température moyenne de l'air sous abri;

e_a la tension de vapeur moyenne sous abri.

D'après la formule de Dalton, on a : $E = f(u) (e_s - e_a)$, où $f(u)$ est une fonction tenant compte de la vitesse du vent. En faisant intervenir, comme variable intermédiaire, une évaporation fictive : $E_a = f(u) (e_a - e_a)$, on trouve :

$$E - E_a = f(u) (e_s - e_a) = f(u) \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} (T_s - T_a) = f(u) \Delta (T_s - T_a)$$

où Δ est la pente de la courbe $e = f(T)$, variation de la pression de vapeur saturante en fonction de la température, pour la valeur T_a .

On a donc finalement :

$$\beta = r \gamma \frac{E - E_a}{\Delta E}$$

or

$$LE = \frac{R_N}{1 + \beta}$$

ce qui donne, en éliminant β ,

$$LE = \frac{\Delta R_N + \gamma LE_a}{\Delta + r \gamma}$$

et, en faisant $r = 1$:

$$LE = \frac{\Delta R_N + \gamma LE_a}{\Delta + \gamma}$$

III. — DISCUSSION DE LA FORMULE DE PENMAN

Bernard (1956) a donné, des erreurs systématiques dues aux approximations de la formule de PENMAN, une étude que nous reprenons ici. Une des erreurs provient de la confusion des deux processus : échanges dans la couche limite et dans la couche turbulente.

La formule de PENMAN part en effet de la relation :

$$LE_{Pen} = \frac{R_N}{1 + \beta};$$

dans la couche limite, on devrait écrire :

$$LE = \frac{R_N}{1 + \beta_c},$$

soit

$$LE = \frac{R_N}{1 + 0,84 \gamma \frac{T_s - T_c}{e_s - e_c}};$$

dans la couche turbulente on aurait, avec $r = 1$:

$$LE = \frac{R_N}{1 + \gamma \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2}}.$$

En prenant le niveau Z_1 comme celui de la couche limite, le niveau Z_2 comme celui de l'abri, on obtient :

$$LE = \frac{R_N}{1 + \gamma \frac{T_c - T_a}{e_c - e_a}}.$$

De ce qui précède, on tire :

$$T_s - T_c = \frac{R_N - LE}{0,84 \gamma LE} (e_s - e_c)$$

$$T_c - T_a = \frac{R_N - LE}{\gamma LE} (e_c - e_a)$$

et en additionnant :

$$T_s - T_a = \frac{R_N - LE}{0,84 \gamma LE} [(e_s - e_c) + 0,84 (e_c - e_a)]$$

e_c étant compris entre e_s et e_a ,

on peut écrire :

$$e_c = e_a + \alpha (e_s - e_a)$$

avec $0 < \alpha < 1$.

La relation devient alors :

$$T_s - T_a = \frac{R_N - LE}{0,84 \gamma LE} (1 - 0,16 \alpha) (e_s - e_a)$$

et, en posant :

$$a = \frac{0,84}{1 - 0,16 \alpha}$$

où $0,84 < a < 1$,

on obtient une nouvelle expression de la formule de BOWEN :

$$LE = \frac{R_N}{1 + a \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a}} \quad (2)$$

La deuxième erreur provient de l'hypothèse $r = 1$.

Si r est différent de 1, on devrait écrire, dans la formule de BOWEN modifiée (2) :

$$LE = \frac{R_N}{1 + ar \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a}}$$

L'erreur globale commise est donc obtenue en faisant :

$$L(E - E_{Pen}) = \frac{\Delta R_N + \gamma r a LE_a}{\Delta + ar \gamma} - \frac{\Delta R_N + \gamma LE_a}{\Delta + \gamma}$$

ce qui donne :

$$L(E - E_{Pen}) = \gamma \Delta \frac{(1 - ar)(R_N - LE_a)}{(\Delta + \gamma)(\Delta + ar \gamma)}$$

L'erreur dépend donc du signe de $R_N - LE_a$ et de celui de $1 - ar$.

IV. — APPLICATION DE LA MÉTHODE A FORT-LAMY

4.1. — Comparaison des mesures de l'E.T.P. (évapotranspiration potentielle) avec la formule de Penman.

Cette comparaison a été faite à Fort-Lamy et elle conduit à la formule :

$$ETP \approx 0,82 E_{pen} \quad (3)$$

Ce coefficient 0,82 peut provenir en partie de la différence d'albedo (b) de l'eau et du gazon. Pour l'eau, on avait posé $b = 0,05$. En introduisant, dans la formule de PENMAN $b = 0,2$, supposé être l'albedo du gazon, il apparaît une nouvelle relation :

$$ETP \approx E_{pen}$$

qui présente d'ailleurs les mêmes caractères de dispersion que la relation (3).

D'autre part, on constate que la formule (3) surestime l'ETP en saison des pluies où l'on a $LE_a < R_N$, et la sous-estime en saison sèche où l'on a $LE_a > R_N$. Les deux mois de transition Juin et Octobre, où l'on a $LE_a \approx R_N$, donnent des valeurs très proches pour ETP et $0,82 E_{pen}$.

4.2. — Modification de la formule de Penman.

Ceci peut conduire à penser que le terme $1 - ar$ est constamment négatif, de telle sorte que $E - E_{pen}$ a le signe de $LE_a - R_N$. Or, a étant inférieur à 1 et $ar > 1$ signifie que r est toujours supérieur à 1, c'est-à-dire qu'on a toujours :

$$K_c > K_v$$

Le remplacement de $\gamma = 0,49$ par $\gamma = 0,7$ dans la formule de PENMAN, ce qui suppose $ar \approx 1,4$, en diminuant nettement la dispersion conduit effectivement à une très bonne estimation de l'ETP (fig. 1).

La formule de PENMAN s'écrit alors :

$$LE = \frac{\Delta R_N + 1,4 \gamma LE_a}{\Delta + 1,4 \gamma}$$

La relation $K_c > K_v$, admise dans le cas de conditions d'instabilité, se trouvant constamment vérifiée ici, tout se passe comme si ces conditions d'instabilité constituaient, pour Fort-Lamy, le cas général.

4.3. — Cas de l'évaporation en bac « Colorado ».

Poursuivant cette idée, on peut imaginer que la formule de PENMAN ainsi modifiée peut exprimer l'évaporation d'un bac Colorado, situé dans une zone sèche, sans anneau de garde, où les gradients thermiques sont très élevés dans les premiers centimètres. L'effet de bord est tel que la comparaison avec l'ETP fait apparaître, pour l'évaporation d'un tel bac, un écart important pour la saison sèche. Le calcul montre qu'en considérant une valeur de $ar\gamma$ égale à 2, soit une valeur de $ar = 4$, on exprime très correctement l'évaporation d'un tel bac (figure 2).

Formule de PENMAN avec $\gamma = 0,7$ et G.T.P.

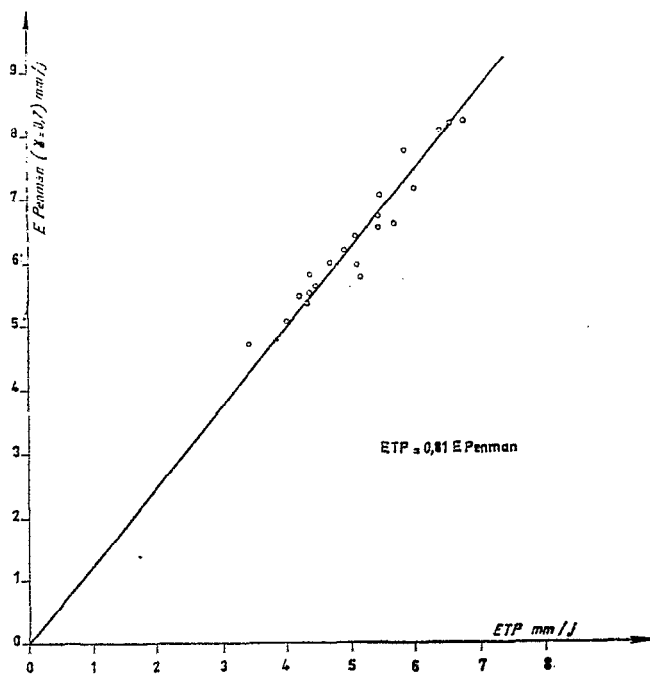


FIG. 1.

Formule de PENMAN avec $\gamma = 2$ et évaporation du bac colorado

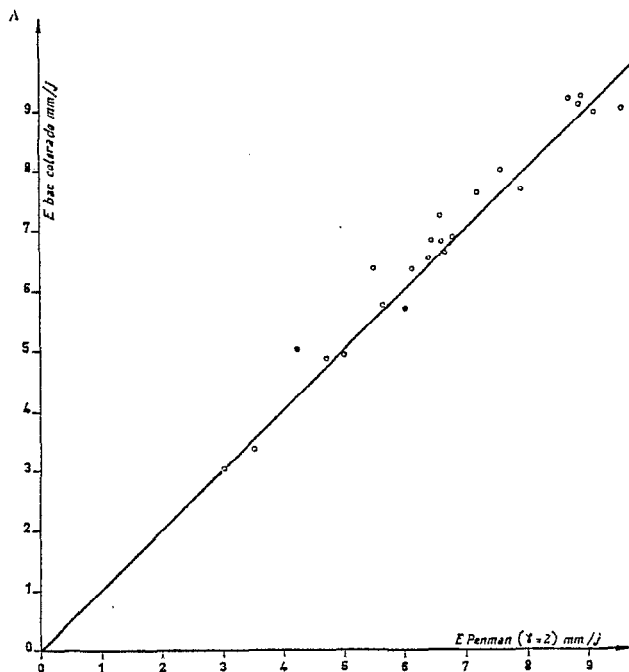


FIG. 2.

Ainsi, tout se passe comme si l'absence d'un anneau de garde accentuait les conditions imposant $K_c > K_v$. L'effet de bord augmente la valeur du rapport K_c/K_v . La présence d'un anneau de garde la diminue, sans toutefois, dans les conditions de la pelouse de Fort-Lamy, la ramener à 1.

On peut comprendre intuitivement ce phénomène en admettant que si la diffusion de la vapeur d'eau se fait à travers une surface s identique à celle du bac, les échanges thermiques ont lieu, en fait, à travers une surface S supérieure à s , intégrant notamment le transfert latéral de chaleur. La « constante psychrométrique » est donc, en fait, multipliée par S/s .

4.4. — Cas du coefficient de bac.

On peut remarquer que le coefficient de bac, rapport existant entre l'évaporation d'une grande nappe d'eau libre, où l'on peut admettre $ra = 1$, et celle d'un bac, s'exprimerait alors sous la forme :

$$\frac{\Delta R_N + \gamma L E_a}{\Delta R_N + \lambda \gamma L E_a} \quad \frac{\Delta + \lambda \gamma}{\Delta + \gamma}$$

avec $\lambda = ar > 1$.

Ceci expliquerait notamment la difficulté de donner une expression simple de ce coefficient.

Conclusion

Bien que, sur un plan fondamental, les résultats soient difficiles à interpréter, on constate néanmoins que, dans les conditions d'observation de la station de Fort-Lamy, il est nécessaire de donner à la « constante » psychrométrique de la formule de PENMAN une valeur plus élevée pour obtenir une évaluation correcte de l'ETP. De même, l'évaporation en bac peut être exprimée de façon valable si l'on augmente encore la valeur de cette constante. Il est possible d'interpréter ces résultats en supposant que, dans le transfert turbulent, le coefficient de conductivité thermique devient supérieur au coefficient de diffusion de vapeur d'eau. Cette hypothèse pourrait être le point de départ de travaux ultérieurs.