

FD 0  
28.VI.82



Laboratoire de Bioclimatologie, O.R.S.T.O.M., Abidjan, Côte d'Ivoire

## Présentation d'une formule pratique d'estimation de l'évaporation potentielle, conforme aux nouvelles recommandations internationales

J. P. Lhomme et B. Monteny

Avec 1 figure

Reçu le 29. décembre 1980

### Résumé

Les formulations et les nouvelles définitions en matière d'évapotranspiration sont rappelées, en particulier celles concernant l'évaporation potentielle, notée  $EP$ , d'un couvert végétal. La formule théorique définissant  $EP$  est du type Penman. On donne les raisons qui conduisent à utiliser l'évaporation potentielle du gazon ( $EP_g$ ) comme référence et on détaille les relations empiriques permettant d'estimer les termes radiatifs et convectifs à partir des mesures courantes effectuées au niveau du réseau météorologique. Les valeurs d' $EP_g$  calculées à l'aide de cette formule sont enfin comparées à des mesures d'évapotranspiration maximale faites sur gazon ( $ETM_g$ ).

### Summary

#### A Practical Formula to Estimate Potential Evaporation, According to the New International Recommendations

This paper begins to recall new concepts concerning evapotranspiration as they have been specified by the round-table conference of Budapest in May 1977. The potential evaporation ( $EP$ ) is now defined as the evaporation of a crop whose all exchange surfaces (leaves, stalks, . . .) are saturated, i.e., covered with a thin film of water. It can be calculated by a theoretical formula of Penman type. We give the reasons why it is interesting to use grass potential evaporation ( $EP_g$ ) as reference. The empirical relationships to estimate in this case the net radiation and the aerodynamic component of the formula have been derived from measurements made in Ivory Coast (West Africa). The relationship (8) has been obtained. It gives the daily value of  $EP_g$  in millimeters of water per day (mm/d). The values calculated by this formula are compared to measurements of grass maximal evapotranspiration ( $ETM_g$ ).

Fonds Documentaire

0066-6424/82

2200 ex 1
B
Date

B.

### Zusammenfassung

#### Eine praktische Formel zur Berechnung der potentiellen Verdunstung entsprechend den neuen internationalen Empfehlungen

Es werden neue die Evapotranspiration betreffende Konzepte, die auf einer Konferenz in Budapest im Mai 1977 spezifiziert worden sind, besprochen. Die potentielle Evapotranspiration ( $EP$ ) wird nun definiert als Verdunstung eines Pflanzenbestandes, dessen sämtliche Austauschflächen (Blätter, Stengel usw.) gesättigt sind, d.h. mit einer dünnen Wasserschicht bedeckt sind. Sie kann mit einer Formel vom Typ, wie er von Penman angegeben worden ist, berechnet werden. Es werden Gründe dafür angegeben, warum es zweckmäßig ist, die potentielle Verdunstung von Gras ( $EP_g$ ) als Bezugsgröße zu gebrauchen. Die empirischen Größen zur Bestimmung der Strahlungswerte und der aerodynamischen Komponenten für die Formel werden aus Messungen in Elfenbein-Küste entnommen. Damit wurde die Gl. (8) erhalten, die die Tageswerte von  $EP_g$  in mm pro Tag angibt. Die mit dieser Gleichung berechneten Werte werden mit den gemessenen Werten der maximalen Evapotranspiration von Gras ( $ETM_g$ ) verglichen.

### 1. Introduction

Les concepts en matière d'évapotranspiration ont beaucoup évolué durant la dernière décennie. Il y a dix ans l'évapotranspiration potentielle ( $ETP$ ) était définie comme la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par un couvert végétal couvrant bien le sol, abondamment alimenté en eau et en phase active de croissance. On considérait cette valeur comme indépendante du type de couvert. Elle était censée représenter la "demande" climatique en eau.

Les progrès faits ces dernières années dans le domaine des mesures et le développement conjoint des formulations théoriques ont quelque peu battu en brèche ces idées. Ce qu'on appelait l' $ETP$  ne représente en fait qu'une évapotranspiration maximale ( $ETM$ ), fonction du type de couvert. La formule de Penman, comme le groupe des évapotranspirations climatiques auquel elle se rattache (Turc, Blaney-Cridde, etc.) ne conduit qu'à des valeurs d' $ETM$  gazon, car les coefficients empiriques de ces formules ont été déterminés le plus souvent par ajustement de valeurs mesurées sur gazon [7].

Le colloque sur l'évapotranspiration organisé par la Commission Internationale des Irrigations et du Drainage (C.I.I.D.) en mai 1977 à Budapest a fait un certain nombre de mises au point allant dans ce sens. Il a recommandé, en particulier, une nouvelle définition de l'évaporation potentielle (notée  $EP$ ) applicable à n'importe quelle surface. Le but de cet article est de préciser ce qu'il faut désormais entendre par évaporation potentielle et, surtout, de proposer une formule pratique d'estimation de celle-ci dans le cas d'un gazon.

## 2. Les concepts récents en matière d'évapotranspiration

### 2.1 Formulation générale de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration représente la quantité d'eau dissipée dans l'atmosphère à partir d'un couvert par transpiration au niveau des surfaces végétales et évaporation au niveau du sol. Les deux aspects, énergétique et convectif du phénomène, sont décrits [2]

d'une part, dans l'équation traduisant le bilan énergétique du couvert en régime permanent

d'autre part, dans les équations traduisant, en régime de flux conservatifs (couvert végétal suffisamment vaste), les échanges convectifs de chaleur sensible et de vapeur d'eau.

La combinaison des deux aspects conduit à la formulation générale suivante de l'évapotranspiration réelle:

$$ET = \phi_L = \frac{P'}{P'+\gamma} (R_n + \phi_0) + \frac{\rho c_p}{P'+\gamma} h [\Delta P(z_r) - \Delta P(z_h)] \quad (1)$$

où  $R_n$  est le rayonnement net,  $\phi_0$  le flux conductif à la surface du sol,  $\phi_L$  l'équivalent énergétique de l'évapotranspiration,  $\rho$  est la masse volumique,  $c_p$  la chaleur massique de l'air,  $\gamma$  la constante psychrométrique,  $h$  le coefficient d'échange convectif entre le sommet du couvert  $z_h$  et une hauteur de référence  $z_r$ .  $\Delta P(z)$  représente le déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air au niveau  $z$  et  $P'$  la pente de la courbe de pression de vapeur d'eau saturante  $P(T)$  pour une température voisine de  $T(z_r)$ .

### 2.2 L'évaporation potentielle [3] et [5]

A partir de la formule (1) donnant l'évapotranspiration réelle ( $ET$ ) d'un couvert végétal, on définit deux niveaux d'évaporation potentielle. Le terme d'évaporation est employé de préférence à celui d'évapotranspiration car la régulation stomatique propre à la transpiration végétale n'entre pas en jeu. Le premier est théorique car il suppose une saturation en vapeur d'eau au sommet du couvert ( $\Delta P(z_h) = 0$ ), ce qui ne se rencontre pratiquement pas dans la nature. L'évaporation correspondante, appelée évaporation potentielle théorique et notée  $EP^*$ , définit le seuil supérieur d'évapotranspiration:

$$EP^* = \frac{P'}{P'+\gamma} (R_n + \phi_0) + \frac{\rho c_{ph}}{P'+\gamma} \cdot \Delta P(z_r). \quad (2)$$

Le deuxième niveau d'évaporation potentielle correspond à l'évaporation d'un couvert dont toutes les surfaces d'échange (feuilles, tiges, sol) sont à saturation, c'est-à-dire recouvertes d'un fin film d'eau. Dans ce cas, le déficit de saturation au niveau  $z_h$  n'est pas nul mais a une valeur minimale  $\Delta P_0(z_h)$ .

Cette évaporation notée  $EP$  est pratiquement mesurable après une pluie, une irrigation par aspersion ou une forte rosée. La triple inégalité suivante est vérifiée:

$$0 \leq ET < EP^*$$

Le déficit de saturation  $\Delta P_0(z_h)$ , correspondant à cette situation, dépend du climat mais aussi de l'architecture du couvert qui influence les échanges convectifs entre les interfaces et le sommet de la végétation.

De ce fait, cette définition de l'évaporation potentielle perd, pour le praticien, l'impact de l'ancienne définition. La demande climatique dépend cette fois-ci du couvert, en particulier de sa structure. Et cette demande ne représente pas l'évapotranspiration maximale  $ETM$  car elle ne fait pas intervenir la résistance stomatique du couvert qui existe même en condition de très bonne alimentation hydrique. Pourtant cette définition est la seule qui a été recommandée lors de la réunion de Budapest sur l'évapotranspiration [4].

### 2.3 Choix de l' $EP$ gazon comme référence

Parmi tous les couverts végétaux, le gazon représente un cas particulier intéressant. En effet, comme pour tous les couverts ras, on peut admettre que l' $EP$  est très voisine de l'évaporation potentielle théorique  $EP^*$ . Et puisque l' $EP^*$  ne dépend pratiquement que des facteurs climatiques (seul le coefficient d'échange est influencé par la structure du couvert), son estimation à partir des données climatiques devient possible. Il sera donc commode d'utiliser l' $EP$  gazon comme référence en matière d'évaporation potentielle, d'autant plus que ce type de couvert est largement répandu à travers tout le globe sous des climats très divers.

L' $EP$  gazon peut par conséquent s'écrire:

$$EP_g = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) + \frac{\gamma}{P' + \gamma} E_a \quad (3)$$

avec 
$$E_a = \frac{\rho c_p}{\gamma} h \Delta P(z_r).$$

$E_a$  est le pouvoir évaporant de l'air. On reconnaît la formule de Penman primitivement établie pour une nappe d'eau libre. Mais  $h$  est ici le coefficient d'échange convectif du gazon et le terme  $(R_n + \phi_0)$ , qui dépend en partie de la nature de la surface, concerne ici un gazon.

### 3. Estimation pratique de l'évaporation potentielle du gazon

Une série de mesures réalisées en Côte d'Ivoire nous a rendus à même de présenter les formules empiriques permettant d'estimer le terme radiatif

$(R_n + \phi_0)$  et convectif  $E_a$  en valeurs journalières à partir des données climatiques du réseau.

### 3.1 Estimation du terme radiatif

Une étude récente [2] réalisée dans les deux grandes régions climatiques de la Côte d'Ivoire (savane au Nord et forêt au Sud) a montré qu'en ce qui concerne les couverts bas, couvrants et verts, le rayonnement net  $R_n$  est une fonction linéaire du rayonnement global  $R_g$  quasi identique pour tous. La relation générale obtenue s'écrit en valeurs instantanées ( $W \cdot m^{-2}$ ):

$$R_n = 0,67 R_g + 5,4 \quad r = 0,98. \quad (4)$$

On sait d'autre part que le flux conductif à la surface du sol  $\phi_0$  dépend étroitement du rayonnement net dont il est une fonction quasi linéaire pour une série de stades de développement du couvert. En particulier, nous avons pu établir expérimentalement, pour un gazon (*Paspalum notatum*) bien alimenté en eau, l'équation  $\phi_0 = -0,05 \cdot R_n$  et par conséquent:

$$R_n + \phi_0 = 0,95 (0,67 R_g + 5,4). \quad (5)$$

En intégrant sur toute la durée du jour  $H$ , c'est-à-dire sur la période pendant laquelle  $R_g$  est strictement positif et l'évapotranspiration non nulle, cette relation qui lie des valeurs instantanées, il vient:

$$\int_0^H (R_n + \phi_0) dt = 0,64 \int_0^H R_g \cdot dt + 5,1 \cdot H. \quad (6)$$

$5,1 \cdot H$ , voisin de  $20 J \cdot cm^{-2} \cdot j^{-1}$ , étant négligeable en première approximation devant le premier terme, la relation précédente s'écrira en valeurs journalières  $R_n + \phi_0 = 0,64 \cdot R_g$ . Et ce même terme radiatif exprimé en  $mm \cdot j^{-1}$  s'écrit en fonction de  $R_g$  exprimé en  $kJ \cdot cm^{-2} \cdot j^{-1}$ :  $R_n + \phi_0 = 2,5 \cdot R_g$ . Cette relation permet l'estimation de l'évapotranspiration standard journalière  $ET_0$  définie par le terme radiatif de la formule (3):

$$ET_0 = [(P'/(P' + \gamma))] \cdot (R_n + \phi_0).$$

$ET_0$  représente une référence autour de laquelle fluctue l' $ETR$  dans bon nombre de conditions naturelles. C'est le cas en particulier des couverts bien alimentés en eau dans des climats pas trop secs [2-6]. Mais ce terme fait uniquement la part de l'énergie radiative „disponible” pour le couvert. L'impact des caractéristiques de l'air (vitesse du vent, déficit de saturation) sur l'évapotranspiration n'est pris en compte que par le terme convectif de la formule (3).

### 3.2 Estimation du terme convectif

Le pouvoir évaporant de l'air  $E_a$  s'écrit:

$$E_a = \frac{\rho c_p}{\gamma} h \Delta P(z_r) = \frac{\rho c_p}{\gamma} h \cdot [P(z_r) - p(z_r)] \quad (7)$$

$p(z_r)$  représentant la pression partielle de vapeur d'eau au niveau de référence =  $P(T_r(z_r))$ . Le coefficient d'échange  $h$  dépend de la vitesse du vent au niveau  $z_r$  et des caractéristiques aérodynamiques de la surface suivant l'expression théorique:

$$h = [k^2 \cdot u(z_r)] / \ln^2 \frac{z_r - D}{z_h - D}$$

$k$  est la constante de Karman (égale à 0,4);  $D$  la hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique et  $z_h$  la hauteur du couvert.

Une expérimentation menée en Basse Côte d'Ivoire sur le Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (résultats non publiés) a permis de préciser les valeurs de ces paramètres dans le cas d'un gazon (*Paspalum notatum*). Pour un couvert ni trop haut, car dans ce cas  $EP \neq EP^*$  (influence de la structure de la végétation non nulle), ni trop ras pour que la couverture du sol soit cependant bien assurée, c'est-à-dire pour une hauteur moyenne d'environ 12 cm, la valeur suivante de  $D$  a été obtenue  $D = 10$  cm. Le coefficient d'échange  $h$  s'écrit alors en fonction de la vitesse du vent ( $m \cdot s^{-1}$ ) mesurée au niveau de référence ( $z_r = 2$  m)  $h = 0,007 \cdot u(z_r)$ .

En intégrant sur toute la durée du jour  $H$ , comme pour le terme radiatif, la relation (7) qui lie des valeurs instantanées, devient:

$$\int_0^H E_a \cdot dt = \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot 0,0077 \int_0^H u(z_r) \cdot \Delta P(z_r) \cdot dt$$

La deuxième intégrale peut être estimée approximativement à partir des moyennes diurnes de la vitesse du vent mesurée à 2 m au-dessus du sol et du déficit de saturation de l'air mesuré sous abri, notées respectivement  $V$  et  $(e_s - e)$ :

$$\int_0^H u(z_r) \cdot \Delta P(z_r) \cdot dt \simeq V \cdot (e_s - e) \cdot H$$

En prenant 12 heures pour valeur de  $H$ , durée approximative du jour en zone subtropicale, la valeur journalière du pouvoir évaporant de l'air, exprimée en millimètres d'eau, s'écrit en fonction des paramètres climatiques:

$$E_a = 0,25 \cdot V \cdot (e_s - e)$$

(avec  $\rho = 1,16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c_p = 1010 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  et  $\gamma = 0,67 \text{ mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $V$  est la vitesse moyenne du vent en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  à 2 m au dessus du sol,  $e$  est la pression moyenne de vapeur d'eau de l'air exprimée en mb,  $e_s$  la pression maximale de vapeur d'eau en mb pour la température moyenne de l'air  $\bar{t}$ .

Ces moyennes doivent être calculées sur la période diurne. Si seules sont connues les températures maximale  $t_x$  et minimale  $t_n$  sur 24 heures, on peut en déduire la température moyenne diurne  $\bar{t}$  grâce à la formule suivante basée sur l'approximation d'une variation sinusoïdale de la température avec le temps  $\bar{t} = 2/3 t_x + 1/3 t_n$ . Le pression réelle de vapeur d'eau variant peu au cours de la journée, sa moyenne diurne peut être calculée à partir de l'humidité relative minimale  $HR_n$  de la façon suivante  $e = HR_n \cdot P(t_x)$ .

### 3.3 Estimation de l'EP gazon

Nous sommes maintenant à même de présenter une formule pratique permettant d'estimer l'EP gazon à partir des données climatiques du réseau. Restent cependant les coefficients  $P'/(P' + \gamma)$  et  $\gamma/(P' + \gamma)$  qui dépendent de la température de l'air par le biais de  $P'$ . Pour les calculs pratiques, l'approximation linéaire suivante avec  $t$  en  $^\circ\text{C}$  peut être utilisée:

$$P'(P' + \gamma) = f(t) = 0,51 + 0,009 t \quad 20^\circ\text{C} < t < 35^\circ\text{C}.$$

L'évaporation potentielle journalière (période diurne) du gazon se formule donc de la manière suivante:

$$EP_g = 2,5 f(\bar{t}) \cdot R_g + 0,25 \cdot V \cdot [1 - f(\bar{t})] \cdot (e_s - e) \quad (8)$$

avec  $EP_g$  en  $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$ ;  $R_g$  en  $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ ;  $V$  en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $e$  et  $e_s$  en mb.

Il nous a paru intéressant de comparer les valeurs d'EP obtenues à l'aide de cette formule avec les évapotranspirations maximales (ETM) correspondantes du gazon (fig. 1). Les valeurs journalières d'ETM ont été mesurées à l'aide d'un évapotranspiromètre pesable [1] et les évaporations potentielles calculées à partir des données du parc météorologique voisin.

Ce graphique corrobore l'inégalité théorique que nous donnions au paragraphe 1.2:

$$ETM < EP$$

les deux grandeurs évoluant de la même façon avec les paramètres météorologiques. L'écart entre les deux valeurs est dû à la résistance stomatique, c'est-à-dire au frein à la diffusion de la vapeur d'eau que constituent les stomates à la surface des feuilles.

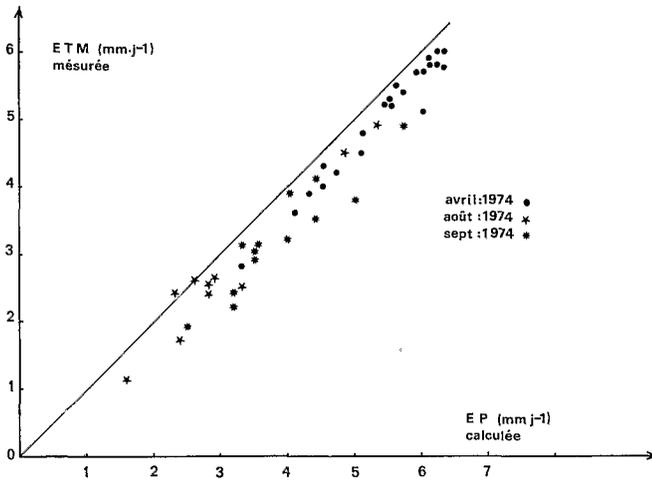


Fig. 1. Relation entre l'évapotranspiration maximale d'un gazon et l'évaporation potentielle correspondante / Relationship between the maximal evapotranspiration of the grass and the potential evaporation calculated by the eq. (8)

#### References

1. Eldin, M.: Evapotranspiromètre à bascule mécanique enregistreuse. Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. INRA 273—279 (1970).
2. Monteny, B., Humbert, J., Lhomme, J. P., Kalms, J. M.: Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. *Agric. Met.* 23, 45—59 (1981).
3. Perrier, A.: Projet de définitions concernant l'évapotranspiration en fonction de considérations théoriques et pratiques. *La Météorol.* VI<sup>e</sup> série, no. 11 (1977).
4. Perrier, A., McIlroy, I. C.: Résolutions proposées au conseil exécutif de la C.I.I.D. à la suite de la table ronde de Budapest sur l'évapotranspiration (mai 1977) et concernant le thème no. 1: terminologie. *La Météorol.*, VI<sup>e</sup> série, no. 11 (1977).
5. Perrier, A.: Importance des définitions de l'évapotranspiration dans le domaine pratique de la mesure, de l'estimation et de la notion de coefficients cultureux. Soc. hydrotech. France, CVà Journées de l'Hydraulique (Toulouse, 1978), question IV, rapport 1 (1978).
6. Priestley, C., Taylor, P. A.: On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large Scale Parameters. *Mon. Weath. Rev.* 100, 81—92 (1972).
7. Slatyer, R. O., McIlroy, I. C.: Evaporation and the Principles of Its Measurements. In: *Practical Microclimatology*, CSIRO (Australia) — UNESCO (1961).

Adresse des auteurs: J.-P. Lhomme et B. Monteny, Laboratoire de Bioclimatologie, O.R.S.T.O.M., BP. V-51, Abidjan, Côte d'Ivoire.