



Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne : rôle d'un coefficient cultural

Nader Katerji, Alain Perrier, Dominique Renard, Abdel Kerim Oulid Aissa

► To cite this version:

Nader Katerji, Alain Perrier, Dominique Renard, Abdel Kerim Oulid Aissa. Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne : rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie*, 1983, 3 (6), pp.513-521. hal-00884539

HAL Id: hal-00884539

<https://hal.science/hal-00884539>

Submitted on 11 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient cultural.

Nader KATERJI & Alain PERRIER

avec la collaboration technique de Dominique RENARD & Abdel Kerim OULID AISSA

I.N.R.A., Station de Bioclimatologie, Centre de Recherches agronomiques, Route de St-Cyr, F 78000 Versailles.

RÉSUMÉ

En s'appuyant sur des mesures de résistance du couvert obtenues sur une culture de luzerne pendant 2 années, nous avons cherché des relations empiriques reliant cette résistance aux facteurs du milieu. La vérification expérimentale de ces relations à l'échelle horaire a conduit à des valeurs calculées de l'évapotranspiration réelle ETR très proches de celles mesurées directement par le système B.E.A.R.N.

Les relations empiriques obtenues nous ont conduits aussi à introduire un coefficient cultural C qui fait ressortir le rôle dominant de l'évapotranspiration critique ($P' (R_n + \phi_n) / (P' + \gamma)$) dans le calcul de l'ETR. En tenant compte d'une revue bibliographique importante et d'un ensemble de données expérimentales obtenues sur plusieurs cultures et pendant plusieurs années dans la région parisienne, nous avons analysé le rôle et la signification physique et physiologique du coefficient cultural C.

Mots-clés additionnels : *Résistance du couvert.*

SUMMARY

A model of actual evapotranspiration (ETR) for a field of lucerne : the role of a crop coefficient.

Relying on crop resistance measures obtained from a lucerne crop over two years, the authors looked for empirical relationships linking this resistance to environmental factors. The experimental verification of these relationships on an hourly basis led to calculated values of actual evapotranspiration ETR close to those measured directly by the B.E.A.R.N. system. The empirical relationships obtained also led the authors to introduce a crop coefficient C which brings out the predominant role of critical evapotranspiration ($P' (R_n + \phi_n) / (P' + \gamma)$) in the calculation of ETR. Taking into account an extensive bibliographical review and a set of experimental data obtained from several crops and over several years in the Paris area, the authors have analyzed the role and the physical and physiological significance of the crop coefficient C.

Additional key-words : *Crop resistance.*

I. INTRODUCTION

Dans les études des échanges de masse et d'énergie entre l'atmosphère et un couvert végétal, il apparaît intéressant d'introduire un sous modèle liant la résistance du couvert (MONTEITH, 1965 ; PERRIER, 1975) avec les facteurs climatiques et prenant en compte leurs diverses actions, afin d'aborder le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR). En effet la définition d'une telle expression, quoique difficile compte tenu de la complexité de la relation entre la résistance du couvert et les facteurs climatiques, reste cependant l'un des moyens les plus précis pour atteindre l'ETR.

Dans cet article, nous allons essayer à travers l'analyse des formules de l'ETR de trouver une expression climatique capable de prédire avec une précision suffisante les valeurs mesurées de la résistance globale d'une culture de luzerne pleinement développée et bien alimentée en eau, per-

mettant ainsi le calcul de l'ETR à partir des mesures climatiques. Nous allons ensuite, dans un esprit de simplification et en nous appuyant sur l'étude précédente, introduire un coefficient relatif à la culture considérée qui permettra alors de réduire l'expression globale de l'ETR à une formule plus simple conduisant cependant à une précision suffisante pour les applications agronomiques. Une discussion suivra en s'appuyant sur une revue bibliographique de la signification exacte d'un tel coefficient « cultural ».

II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL, MÉTHODES ET TECHNIQUES

Les mesures ont été effectuées au domaine expérimental de La Minière au cours des années 1978, 1979 et 1980. Le couvert étudié est une luzerne (variété « Du Puits »). Les

résultats présentés au cours de cette étude concernent une luzerne bien développée (Indice foliaire LAI > 2,5) qui se trouve dans des conditions de bonne alimentation hydrique (KATERJI, 1982).

La parcelle étudiée, de superficie 2 ha, était équipée :

— d'un système B.E.A.R.N. (PERRIER *et al.*, 1976) donnant les valeurs horaires des différents flux (Rayonnement net R_n , flux de chaleur à la surface du sol ϕ_0 , flux de chaleur sensible ϕ_s , flux de chaleur latente ϕ_l ou ETR) ;

— d'instruments de mesures climatiques (psychromètre, anémomètre et thermocouples) donnant à l'échelle horaire la vitesse du vent, les températures sèches et humides de l'air au niveau $Z_r = 3$ m au-dessus du sommet du couvert ainsi que le gradient thermique entre cette hauteur de référence Z_r et le sommet du couvert Z_h .

A. La mesure de la résistance du couvert R_s

Pour déterminer cette résistance, on a utilisé la démarche proposée par MONTEITH (1965) et reprise depuis par BRUN (1972), SZEICZ *et al.* (1973), SQUIRE (1979) et qui consiste à diviser le couvert en strates horizontales (généralement de 2 à 3 strates selon la croissance de la culture), puis à déterminer dans chacune d'elle, d'une part, l'indice foliaire (soit LAI (i)) et, d'autre part, au moyen d'un poromètre à diffusion, la conductance stomatique moyenne des faces supérieures et inférieures relative à l'unité de surface soit g (i).

La conductance stomatique totale du couvert g_T sera :

$$g_T = g(1) \times \text{LAI}(1) + g(2) \times \text{LAI}(2) + \dots g(n) \times \text{LAI}(n)$$

d'où l'on peut obtenir la résistance du couvert R_s qui sera alors :

$$R_s = 1/g_T$$

La conduite des mesures a été effectuée de la façon suivante : dans chaque strate de 20 à 30 cm d'épaisseur, la conductance stomatique par unité de surface était obtenue au moyen de 20 mesures ponctuelles de la conductance stomatique g effectuées à égalité sur les faces supérieures et inférieures des feuilles de la strate soit :

$$g_i = \frac{\sum_{j=1}^{10} g \text{ sup} + \sum_{j=1}^{10} g \text{ inf}}{20}$$

III. RECHERCHE D'UNE FONCTION LIANT LA RÉSISTANCE DU COUVERT ET CERTAINS FACTEURS CLIMATIQUES

A. Considérations théoriques

L'expression suggérée par PERRIER (1975) pour exprimer l'ETR s'écrit sous la forme suivante :

$$\text{ETR} = \frac{P'(R_n + \phi_0) + \gamma(LM/RT) P' \{ (T_a - T_r)/ra \}}{P' + \gamma \frac{(ra + R_s)}{ra}} \quad (1)$$

R_n étant le bilan radiatif ;

ϕ_0 , le flux de chaleur à la surface du sol ;

P' , la pente de la courbe de tension de vapeur d'eau saturante en fonction de la température de l'air ;

γ , la constante psychrométrique ;

R , la constante des gaz parfaits ;

M , la masse molaire de l'eau ;

T , la température absolue de l'air en degré Kelvin ;

L , la chaleur latente de vaporisation ;

T_a , T_r , les températures de l'air et du point de rosée de l'air au niveau de référence ;

ra , la résistance aérodynamique calculée selon la méthodologie proposée par ITIER & KATERJI (1983) entre le sommet de végétation et la hauteur référence Z_r ;

R_s , la résistance du couvert.

Si l'on dérive l'expression (1) par rapport à ra de façon à préciser le sens de variation de l'ETR avec la vitesse du vent, on peut mettre en évidence une valeur particulière de R_s appelée résistance critique rc pour laquelle la valeur de l'ETR est indépendante de ra (DAUDET & PERRIER, 1968),

$$\frac{d\text{ETR}}{dra} = \frac{(R_n + \phi_0)P'\gamma \cdot R_s - (LM/RT)P' \cdot (T_a - T_r)(P' + \gamma)\gamma}{ra^2 \left(P' + \gamma + \frac{\gamma R_s}{ra} \right)^2} \quad (2)$$

Cette expression s'annule pour la valeur particulière de R_s appelée résistance critique rc :

$$rc = \frac{LM}{RT} \cdot \frac{(P' + \gamma)}{(R_n + \phi_0)} \cdot (T_a - T_r) \quad (3)$$

On notera que rc dépend d'un certain nombre de facteurs climatiques, notamment du rayonnement net et du déficit de saturation de l'air, et varie par conséquent systématiquement au cours de la journée.

Si l'on introduit rc dans l'expression (1) on peut écrire (PERRIER *et al.*, 1980).

$$\text{ETR} = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{R_s}{ra}} \quad (4)$$

Notons que lorsque $rc = R_s$, l'ETR prend une valeur particulière : $\text{ETR} = P' (R_n + \phi_0) / (P' + \gamma)$ dont la signification sera discutée en V.

Suivant l'expression (4), nous avons :

$$\text{ETR} = f(R_n + \phi_0, R_s, ra, rc, P')$$

Nous avons montré dans une étude précédente (KATERJI, 1982) que R_s est une fonction du rayonnement net R_n et du déficit de saturation de l'air $T_a - T_r$, notamment dans nos conditions particulières (conditions hydriques non limitantes).

Toute fonction de plusieurs variables peut être étudiée sous l'angle de l'analyse dimensionnelle qui permet de faire ressortir les nombres sans dimension intervenant dans une relation. De façon générale si une fonction dépend de n variables indépendantes relatives à m grandeurs primaires, il sera possible d'étudier cette fonction à partir de $n - m$ nombres sans dimension.

Ainsi la fonction recherchée entre la résistance du couvert R_s et l'ensemble des facteurs climatiques s'écrit :

$$g \left[R_s, (R_n + \phi_0), (T_a - T_r), ra, \rho c_p, L \frac{MP'}{RT} \right] = 0.$$

Avec $(R_n + \phi_0)$, la densité de flux enthalpique, $(T_a - T_r)$, le déficit de saturation de l'air qu'on exprimera en fonction du terme

$\frac{LM}{RT} P(T_a) - P(T_r)$, qui en première approximation sera linéarisée selon le produit $\frac{LM}{RT} P' (T_a - T_r)$, d'où les variables $(T_a - T_r)$ et $\frac{LMP'}{RT}$,

ra , la résistance aux échanges dans l'air,

ρc_p la chaleur volumique produit de la masse volumique et de la chaleur massique.

On a négligé le potentiel ψ de l'eau dans la plante ($\psi \sim 0$) et la variation des coefficients avec la température (ρc_p et $\frac{LM}{RT}$ P' supposés indépendants de T).

Dans cette relation les 4 unités de base sont une masse (M_0), une longueur (L_0), un temps (t_0) et une température (T_0), ce qui permet de choisir 4 grandeurs primaires :

$$\begin{aligned}(R_n + \phi_0)_1 &\rightarrow M_0 t_0^{-3} \\ (T_a - T_r)_1 &\rightarrow T_0 \\ (ra)_1 &\rightarrow L_0^{-1} t_0 \\ (p.c.p)_1 &\rightarrow M_0 L_0^{-1} T_0^{-1} t_0^{-2}\end{aligned}$$

Ces grandeurs servant d'unité, l'expression devient :

$$g\left(\frac{R_s}{ra_1}, 1, 1, 1, 1, \frac{LM}{RT} P' \frac{(T_a - T_r)_1}{ra_1 (R_n + \phi_0)_1}\right) = 0$$

Soit compte tenu de la définition de rc (cf rel. 3)

$$g\left(\frac{R_s}{ra}, 1, 1, 1, 1, \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot \frac{rc}{ra}\right) = 0$$

Cette analyse conduit à rechercher une relation entre le nombre sans dimension R_s/ra et $\frac{P'}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}$ sous la forme :

$$\frac{R_s}{ra} = G\left(\frac{P'}{P' + \gamma} \cdot \frac{rc}{ra}\right)$$

Soulignons cependant que, pour des raisons pratiques, on ne se placera jamais au moment du lever ou du coucher du soleil car, lorsque le rayonnement net tend vers zéro, la résistance critique n'a plus de sens.

B. Vérification expérimentale

Bien que l'idée de traduire les variations de R_s/ra en fonction de rc/ra paraisse a priori séduisante, elle se heurte néanmoins à la complexité des interactions entre biologie et climat. A titre de démonstration, nous présentons l'évolution des rapports rc/ra et R_s/ra (fig. 1) au cours d'une journée ; on constate que :

— rc/ra est minimal en milieu de journée et assez élevé le matin et l'après-midi ;

— R_s/ra varie dans le même sens que rc/ra ; il est fort le matin, prend des valeurs minimales en milieu de jour-

née, augmente légèrement dans l'après-midi. Cependant, pour la même valeur de rc/ra , le rapport R_s/ra observé à 7-8 h est 3 fois supérieur à celui observé à 14-15 h. Il est donc nécessaire de bien distinguer les valeurs obtenues en conditions de faible rayonnement ($R_n < 250 \text{ W m}^{-2}$) qui font intervenir une régulation de type photique (DJAVANCHIR, 1971 ; KATERJI, 1982), de celles obtenues en conditions de fort rayonnement ($R_n > 250 \text{ W m}^{-2}$).

Sur la figure 2, on a présenté la variation du rapport R_s/ra en fonction de rc/ra pour toutes les valeurs horaires obtenues pendant 2 années (1978 et 1979) dans des conditions de faible et fort rayonnement.

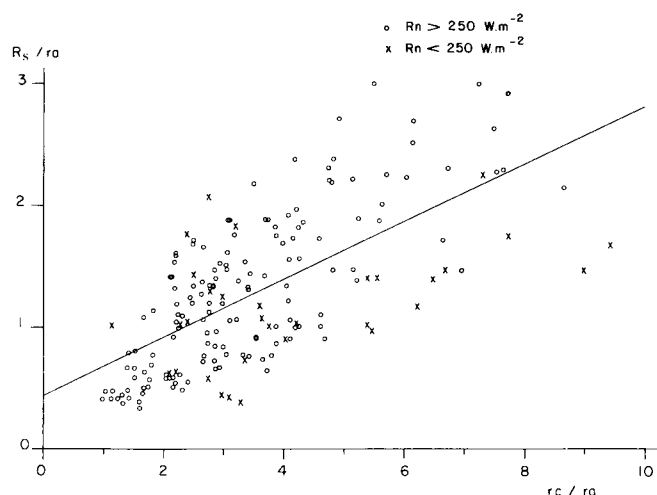


Figure 2

Evolution de R_s/ra en fonction de rc/ra .

Variation of R_s/ra in relation to rc/ra .

En 1^{re} approximation, R_s/ra peut être ajusté à la relation $R_s/ra = 0,24 rc/ra + 0,43$ avec $C_r = 0,67$ (6)

Si l'on ne considère que les valeurs de R_s obtenues dans des conditions de fort rayonnement ($R_n > 250 \text{ W m}^{-2}$), on obtient

$$R_s/ra = 0,31 rc/ra + 0,25 \text{ avec } C_r = 0,77 \quad (6 \text{ bis})$$

Remarquons que les 2 relations précédentes sont assez proches probablement parce que le nombre des valeurs de R_s obtenues dans les conditions de faible rayonnement est assez faible par rapport à celles obtenues dans des conditions de fort rayonnement. Rappelons que le matin il y a souvent de la rosée et que dans ce cas la régulation photique n'intervient pas et que l'on se retrouve plus ou moins dans le cas de la relation générale (R_s petite et rc/ra petit). Soulignons enfin, ce qui sera important pour la suite, que les cas de mauvaises relations entre rs/ra et rc/ra sont précisément les moments de plus faible évapotranspiration dont le poids sur la journée est généralement plus faible.

L'expression 4 s'écrit :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} (a \cdot \frac{rc}{ra} + b)} \quad (7)$$

a, b dépendent de la relation choisie (6 ou 6 bis).

Nous avons calculé l'ETR horaire à partir des relations précédentes pendant 30 journées de l'année 1980. Ces journées couvrent pratiquement la période de croissance de la luzerne pendant 2 coupes. Les valeurs calculées ont été con-

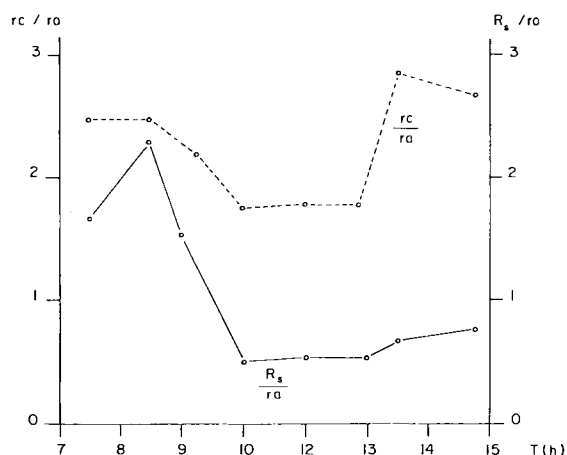


Figure 1

Evolution journalière de R_s/ra et rc/ra observée sur une culture de luzerne (La Minière 20.08.79).

Daily variation of R_s/ra and rc/ra observed on a lucerne crop (La Minière 20.08.79).

frontées avec les valeurs horaires mesurées par le système B.E.A.R.N. (fig. 3 et 4) ; on observe une très bonne relation entre les valeurs mesurées d'ETR et celles obtenues par les relations précédentes. Cependant, avant d'admettre que l'ajustement de R_s/ra en fonction de rc/ra permet de prédire avec une précision suffisante l'ETR, il faut vérifier que

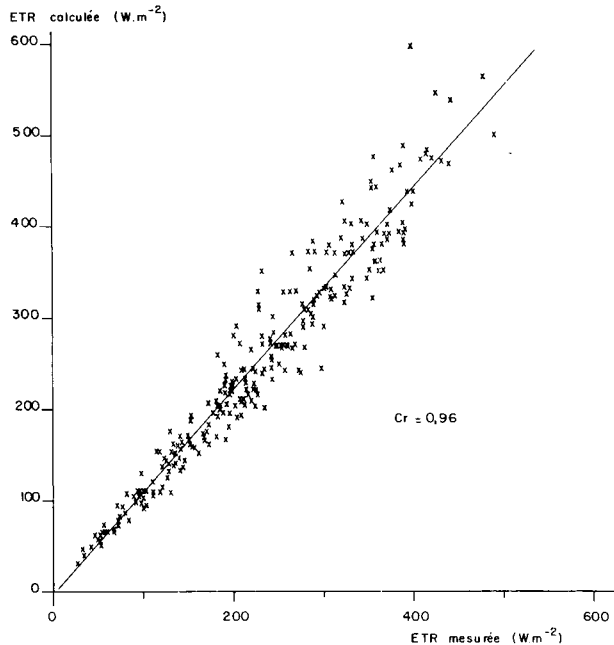


Figure 3

Comparaison entre les valeurs d'ETR calculées à partir de la relation ($R_s/ra = 0,24 rc/ra + 0,43$) et celles mesurées par le B.E.A.R.N.

Comparison between the ETR values calculated by means of the relationship ($R_s/ra = 0,24 rc/ra + 0,43$) and those measured by the B.E.A.R.N.

la bonne concordance entre ETR mesurée par la méthode du bilan d'énergie et les ETR calculées par l'expression 7, compte tenu des relations (6 et 6 bis), n'est pas due seulement à la présence du terme $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0)$ dans l'abs-cisse et l'ordonnée des figures 4 et 5 ; en effet, ce terme entre de façon assez importante dans le calcul de l'ETR par la méthode du bilan d'énergie (PERRIER *et al.*, 1976) et dans l'ETR calculée par l'expression 7.

Pour effectuer cette vérification, nous avons cherché à éliminer le terme $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0)$ dans la comparaison entre ETR mesurée et ETR calculée, en étudiant la relation, d'une part, entre l'expression réelle déduite du rapport : ETR mesurée / $\left\{ \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) \right\}$, soit :

$$C \text{ réel} = \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{R_s}{ra}}$$

et, d'autre part, l'expression déduite de l'équation 7 compte tenu de la relation générale (6) soit :

$$C \text{ calculé} = \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} (0,24 \frac{rc}{ra} + 0,43)}$$

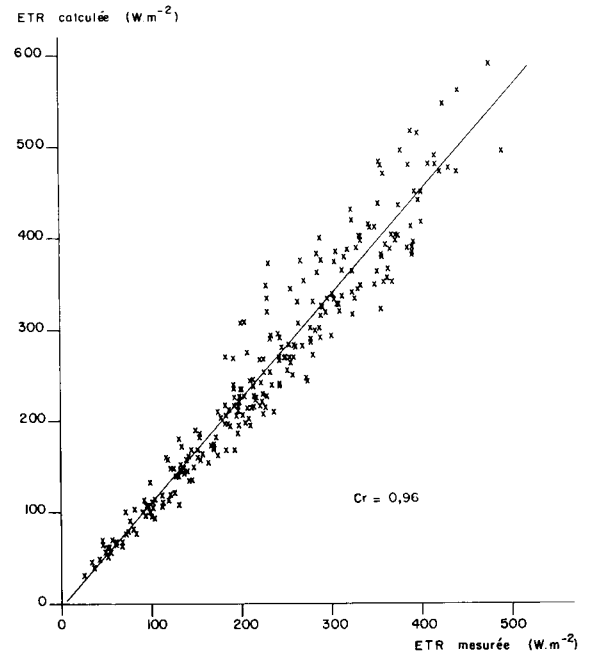


Figure 4

Comparaison entre les valeurs d'ETR calculées à partir de la relation ($R_s/ra = 0,31 rc/ra + 0,25$) et celles mesurées par le B.E.A.R.N.

Comparison between the ETR values calculated by means of the relationship ($R_s/ra = 0,31 rc/ra + 0,25$) and those measured by the B.E.A.R.N.

$$C \text{ calculé} = \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} (0,24 \frac{rc}{ra} + 0,43)}$$

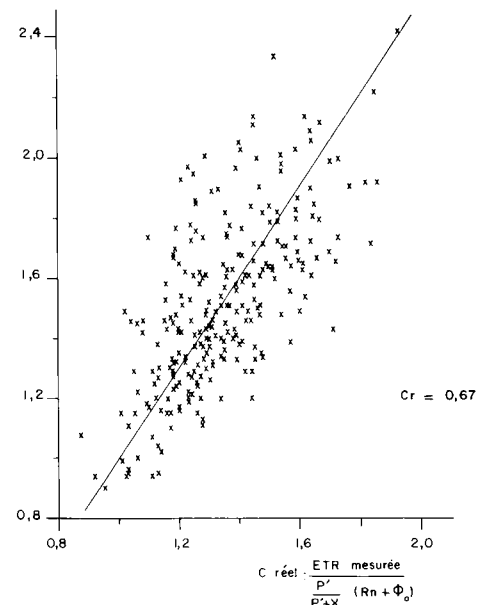


Figure 5

Coefficient C calculé en fonction du coefficient C réel.

Coefficient C calculated in relation to actual coefficient C.

on constate (fig. 5) que la relation linéaire entre les 2 expressions précédentes conduit à un coefficient de corrélation du même ordre (0,67) que celui obtenu entre R_s/ra et rc/ra et qui représente toutes les erreurs existantes entre une mesure directe des résistances du couvert (porométrie et grandeurs météorologiques) et une mesure indirecte (bilan

d'énergie et grandeurs météorologiques). Il n'en reste pas moins que l'application de ces résultats à l'estimation de l'évapotranspiration, sujet qui nous préoccupe, compte tenu de l'importance bien connue du rayonnement net, conduit à une très bonne relation entre ETR estimée et ETR mesurée (coefficient de corrélation : 0,96).

IV. APPLICATIONS A LA DÉTERMINATION D'UN COEFFICIENT CULTURAL

A. Détermination d'un coefficient cultural C

La détermination de l'ETR à partir du modèle défini par les relations (6 et 6 bis) et (7) nécessite, d'une part, la connaissance de $(R_n + \phi_0)$ et, d'autre part, de rc/ra . Or rc/ra est un paramètre difficile à obtenir car il exige, en plus des mesures de $(R_n + \phi_0)$, des mesures de $T_a - T_r$ et une bonne connaissance de ra . Ainsi serait-il intéressant de pouvoir estimer l'ETR à partir de mesures climatiques moins nombreuses et plus simples.

La relation (4) peut s'écrire :

$$ETR = C \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) \quad (8)$$

$$\text{avec } C = \text{Coefficient cultural} = \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{rc}{ra}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{R_s}{ra}}$$

Or, on a montré d'après les relations (6) et (6 bis) la liaison qui existe entre R_s/ra et rc/ra ainsi que l'accroissement proportionnel de ces 2 rapports ; on peut donc s'attendre à une certaine stabilité du coefficient C qui représenterait, dans le cas d'une approche simplifiée, un terme utile et, dans une certaine mesure, probablement plus facile à estimer que rc/ra .

Ainsi, nous avons étudié pendant 60 journées choisies au hasard au cours des années 78, 79 et 80 la relation horaire entre ETR et le terme $\{P'/(P' + \gamma)\} \cdot (R_n + \phi_0)$. Le résul-

tat de cette confrontation présenté sur la figure 6 conduit à une relation du type :

$$ETR = 1,35 \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) \quad (10)$$

La bonne homogénéité des points expérimentaux autour de la droite de régression reflète bien la stabilité du coefficient C.

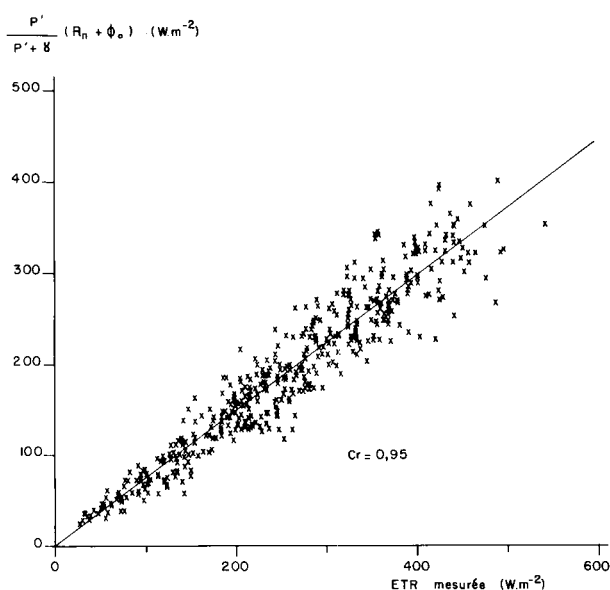


Figure 6

$\{P' (R_n + \phi_0)\} / (P' + \gamma)$ en fonction de l'ETR horaire mesurée.
 $\{P' (R_n + \phi_0)\} / (P' + \gamma)$ in relation to hourly measured ETR.

Considérons maintenant le tableau 1 qui donne les valeurs du coefficient C obtenues, pendant plusieurs années et sur plusieurs espèces cultivées sur la même parcelle expérimentale, dans des conditions hydriques différentes. On constate la stabilité remarquable du coefficient C obtenue sur blé (en stade vert) pendant 2 ans, sur gazon pendant 3 ans

TABLEAU 1

Valeurs de C et coefficients de corrélation correspondant, pour toute la période végétative de plusieurs cultures à La Minière

Values of C and correlation coefficients corresponding to the entire growth period of several crops at La Minière

	Maïs irrigué* 1974		Blé 1975 Année humide		Blé 1976 Année sèche		Luzerne 1978-1980		Gazon * 1973-1976	
	valeur de C	coeff. corr.	valeur de C	coeff. corr.	valeur de C	coeff. corr.	valeur de C	coeff. corr.	valeur de C	coeff. corr.
Pour toute la période végétative	1,13	0,96	1,16	0,90	1,16	0,91				
Tallage	X	—	1,26	0,96	1,39	0,98				
Montaison	X	—	1,47	0,97	1,43	0,94	1,35	0,93	1,35	0,90
Epiaison	X	—	1,37	0,95	1,23	0,95				
Maturation	X	—	0,94	0,94	0,93	0,95				
Observations	valeurs horaires		valeurs horaires		valeurs horaires		valeurs horaires		valeurs journalières d'après GREBET (1982)	

* On n'a pas tenu compte de ϕ_0 dans le calcul du coefficient C.

et sur luzerne pendant 3 ans. Cette bonne concordance suggère que la liaison entre rc/ra et R_s/ra déjà étudiée est valable aussi bien pour une culture d'hiver de la famille graminée que pour une culture d'été de la famille légumineuse. Si l'on ajoute à l'observation précédente la stabilité du coefficient c observée à l'échelle de toute la période végétative entre blé et maïs, on peut en déduire que ce coefficient représente une approche intéressante qui mérite d'être analysée.

B. Analyse du coefficient C

1. Le rôle des facteurs climatiques

Il est intéressant d'analyser la liaison entre le coefficient C calculé selon la relation 9 et les facteurs climatiques, dans la mesure où cette analyse permet d'affiner la valeur globale à donner au coefficient C. Ainsi avons-nous calculé, heure par heure, le coefficient C, puis étudié son évolution en fonction des facteurs climatiques regroupés, comme on l'a vu au paragraphe III, dans le terme rc/ra (fig. 7). On constate une certaine évolution du coefficient C en fonction du rapport rc/ra ; néanmoins, si l'on tient compte du fait que la plupart des points expérimentaux du coefficient C se trouve dans la gamme 1 à 2 pour une variation de rc/ra comprise entre 1 et 10, on peut conclure que la variation du coefficient C en fonction des facteurs climatiques semble assez faible. Ceci confirme ce que l'on pouvait déduire, d'une part, des relations (6) et (6 bis) montrant que R_s/ra varie seulement comme le 1/3 de rc/ra (rapport fonction des variations climatiques) et, d'autre part, de la relation (7) qui conduit pour le coefficient C à une variation hyperbolique en fonction de rc/ra entre la borne inférieure

$$\frac{1}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot b} \sim 0,8 - 1, \text{ lorsque } rc/ra \text{ égale } 0, \text{ et la}$$

borne supérieure $\frac{1}{a} \sim 3$, lorsque rc/ra tend vers l'infini.

2. Le rôle du stade phénologique

Dans nos conditions expérimentales, la culture se trouvait toujours au stade vert et avec des valeurs élevées de LAI ; il n'était donc pas possible d'analyser le coefficient C en fonction du stade phénologique. Toutefois on peut présenter, à titre d'illustration, l'évolution du coefficient C en fonction des stades phénologiques pour 2 années de blé (tabl. 1) où l'analyse fine du coefficient C a montré (KATERJI *et al.*, 1977 ; GOSSE *et al.*, 1977) que celui-ci

prend, au cours de la période de maturation, des valeurs statistiquement différentes de celles des autres stades aussi bien pendant l'année sèche que pendant l'année humide. Les valeurs, en période de maturation, sont nettement inférieures à celles obtenues pendant le stade vert.

3. Les conditions hydriques du sol

Une analyse du coefficient C effectuée au cours de l'année 1976, caractérisée par une période de sécheresse assez longue, a montré (GOSSE *et al.*, 1977 ; KATERJI *et al.*, 1977) que ce coefficient était significativement plus faible pour le stade épiaison (stade au cours duquel le déficit hydrique du sol a pris des valeurs maximales) que pour les 2 stades précédents (1,23 au lieu de 1,41). Ceci suppose que la liaison entre (R_s/ra et rc/ra) peut être affectée dans le cas d'un déficit hydrique du sol important ; en effet, pour un même rapport de rc/ra , on peut s'attendre à un rapport de R_s/ra d'autant plus élevé que le déficit hydrique du sol est important.

V. SIGNIFICATION PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DU COEFFICIENT C

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs auteurs ont proposé des formules semblables à la relation (8) utilisée ici, pour estimer l'évapotranspiration :

— Tout d'abord, MAKING (1957) propose une relation du type ($ETP = \alpha R_n$), puis PRIESTLEY & TAYLOR (1972) ont suggéré que l'évapotranspiration potentielle ETP pourrait être obtenue pour de grandes surfaces bien alimentées en eau par une formule du type

$$ETP = C \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \phi_0)$$

avec C variant entre 0,8 et 1,3.

— SLATYER & McILROY (1961) définissent une évaporation d'équilibre ou limite qui serait :

$$ET \text{ (équilibre)} = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \phi_0)$$

ce qui revient à supposer $C = 1$.

Ces auteurs considèrent que cette valeur d'équilibre serait atteinte lorsque l'équilibre de la masse d'air avec les caractéristiques de surface saturée est réalisée (advection nulle).

— DAUDET & PERRIER (1968), puis BOUCHET & PERRIER (1973) analysent la valeur critique de ce terme d'équi-

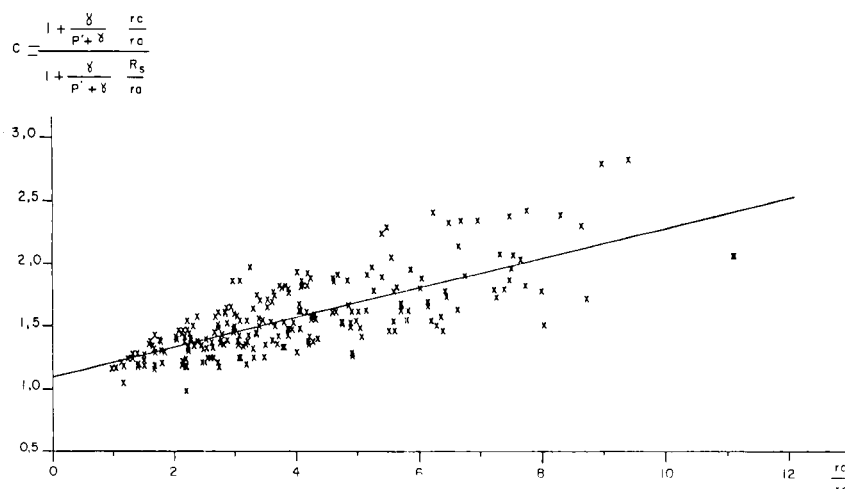


Figure 7

Variation du coefficient C en fonction de rc/ra .
Variation of the coefficient C in relation to rc/ra .

libre au niveau des échanges et la fonction d'estimation de l'ETR que peut jouer ce terme d'ET avec ($C = 1$) dans de nombreuses conditions réelles.

Plusieurs auteurs ont observé sur des parcelles de surface réduite (2-4 ha), généralement bien alimentées en eau et dans des conditions où l'advection (l'apport latéral d'énergie) est négligeable (ROSENBERG, 1974 ; SEGUIN, 1977), une forme de relation entre R_n et ETR semblable à celle exprimée par la relation (8).

Ces résultats ont été obtenus sur plusieurs cultures (blé, maïs, riz, luzerne, gazon, forêt) et dans des conditions climatiques assez variables (climat humide, semi-aride, continental) correspondant à des régions géographiques très différentes (Amérique, Afrique, Proche-Orient, Australie, URSS, Europe). Dans tous ces travaux, on peut trouver une certaine forme de relation entre ETR et R_n , soit :

$$\begin{aligned} \text{ETR} &= C \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0) \\ &= C_1 \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n) \\ &= C_2 (R_n + \phi_0) \\ &= C_3 (R_n) \end{aligned}$$

Une revue de tous ces travaux se trouve résumée dans le tableau 2.

Avant d'entreprendre l'analyse de ces résultats, on peut avancer quelques observations nécessaires à la compréhension de ces données.

1) Tout d'abord, il est possible de faire la correspondance entre toutes les valeurs de C_1 , C_2 , C_3 du moment que l'on sait que :

— pour une culture bien développée, $\phi_0 \sim 0,05 R_n$
 — $P'/(P' + \gamma)$ varie de 0,55 à 10°C à 0,74 à 25°C. En moyenne on peut considérer que $P'/(P' + \gamma) = 0,65$.

2) Certaines valeurs des coefficients (C) présentées sur le tableau 2 correspondent à des valeurs obtenues à l'échelle de toute la période de végétation, c'est le cas par exemple des résultats obtenus sur maïs par DECKER (1965), McCAUGHEY (1968), KATERJI *et al.* (1977), sur coton et sorgho par RITCHIE (1971), sur blé par HANK *et al.* (1968), KATERJI *et al.* (1977), sur gazon par ROSENBERG (1974), sur des prairies du Canada par RIPLEY & REDMANN (1976) ; d'autres correspondent à des valeurs obtenues sur une ou plusieurs périodes de croissance. Or, tous les auteurs qui ont analysé les coefficients (C), au cours de la période de croissance (DECKER, 1965, RITCHIE, 1971 ; KATERJI *et al.* 1977) mettent en évidence la diminution des coefficients (C) obtenus au cours de la période de maturation. Les valeurs des coefficients (C) obtenus au cours de la période de végétation ou seulement sur un seul stade de développement ne doivent pas être considérées de la même façon.

3) Les valeurs présentées sur le tableau 2 sont également obtenues en l'absence de transfert advectif d'énergie (observé généralement sur une surface suffisamment étendue de manière à éviter les transferts d'énergie par advection locale (ITIER *et al.*, 1978). En effet, lorsque l'air est sec et le vent fort, les transferts par advection locale sont élevés et ceci provoque une forte augmentation du coefficient C (ROSENBERG, 1974 ; THOMPSON & BOYCE, 1967 ; SEGUIN, 1977). A titre d'exemple THOMPSON & BOYCE (1967) ont trouvé en Afrique du Sud, sur une culture de canne à sucre, un coefficient moyen pour C_3 égal à 1,08, ce qui est nettement supérieur à la plupart des valeurs obser-

vées sur le tableau 2, valeurs qui se situent entre 0,7 et 0,9. Cependant, les auteurs détaillent leurs résultats en fonction des catégories suivantes :

— 6 j pendant la période pluvieuse, conduisant à un coefficient C_3 de 0,72.

— 7 j pendant la période sèche accompagnés d'un vent du nord, élevant le coefficient C_3 qui passe à la valeur 1,04.

— 11 j pendant la période sèche accompagnés d'un vent du sud, conduisant à un coefficient C_3 de 1,56, dont une journée au cours de la dernière période pendant laquelle les auteurs obtiennent un coefficient C_3 supérieur à 3.

On constate bien, d'après l'exemple précédent, que la signification d'un coefficient C global est différente selon que l'on se trouve en présence ou non d'un apport de flux advectif.

Si l'on considère maintenant les valeurs de $|C|$ présentées sur le tableau 2 et obtenues sur cultures de maïs, blé, gazon ou luzerne, on est frappé par la quasi-stabilité du coefficient C observé dans des climats différents allant de la zone semi-aride aux zones humides. Il est donc bien évident que, lorsque les conditions hydriques sont satisfaisantes et quelle que soit la localité géographique, la culture s'adapte de la même manière aux facteurs climatiques du milieu à travers un ajustement entre R_s et rc , si bien que l'on obtient toujours le même coefficient C . Le coefficient C prend ici une signification biologique qui s'ajoute à celle physique constatée déjà dans la littérature (SLATYER & McILROY, 1961 ; PRIESTLEY & TAYLOR, 1972 ; BOUCHET & PERRIER, 1973).

Observons maintenant les coefficients C_2 et C_3 obtenus sur toutes les cultures ; on constate que, dans la majorité des cas, les variations de C sont comprises entre 0,7 et 0,9 ; ces variations sont très faibles, si l'on considère les facteurs qui peuvent perturber ces coefficients (prise en considération ou non du stade de maturation, valeurs de $P'/(P' + \gamma)$ considérées comme constantes, alors qu'elles peuvent varier avec la température, erreurs expérimentales dues à la sensibilité des appareils de mesure). Tout semble donc indiquer que l'hypothèse selon laquelle l'adaptation des cultures qui se manifeste par l'accroissement proportionnel entre rc et R_s conduit à un coefficient C stable est valable dans tous les cas précédents.

VI. CONCLUSION GÉNÉRALE

L'aspect le plus important présenté dans cette étude est la démonstration expérimentale de la liaison entre le terme de la régulation biologique R_s et le terme de la résistance critique rc qui caractérise les principaux paramètres du climat. Dès lors il était possible de justifier l'emploi d'une formule approchée dont le coefficient C apparaît comme un véritable paramètre cultural. L'analyse fine de ce coefficient, dans nos conditions de travail, a permis de constater qu'il baisse généralement de façon sensible (< 1) lorsque la plante se trouve en phase de maturation et que cette baisse apparaît aussi lorsque le déficit hydrique du sol atteint un certain seuil.

La confrontation expérimentale entre les coefficients C obtenus dans la région parisienne et ceux trouvés par différents chercheurs et dans diverses régions du monde, a permis de constater que le coefficient C semble assez constant lorsque les conditions du sol sont satisfaisantes et les mesures effectuées non perturbées par des apports d'énergie

TABLEAU 2
Revue bibliographique de la relation entre ETR et R_n
Bibliographical review of the relationship between ETR and R_n

Culture	Condition hydrique	C	C_1	C_2	C_3	Le lieu de mesure	Auteurs	Observations
Riz	irrigué				0,82	Japon	RGE, 1967	
Betterave	—			0,95		USA (Nebraska)	BROWN, 1976	
Coton	irrigué			0,81		USA (Texas)	RITCHIE, 1971	Valeurs calculées sur toute la période de végétation.
Sorgho	—			0,52		USA (Texas)	RITCHIE, 1971	Valeurs calculées sur toute la période de végétation.
Forêt caduque	—			0,88		URSS (Plaine de Moscou)	RAUNER, 1976	
Tournesol	irrigué			0,81		France (Montpellier)	ECKARDT <i>et al.</i> 1975	
Prairie	—			0,80		Canada	RIPLEY & REDMAN, 1976	Valeurs calculées sur toute la période de végétation d'après les résultats présentés par les auteurs.
Fève	—	1,1		0,72*		La région d'Ontario	DAVIES, 1972	
Canne à sucre	non précisé				0,8-0,9	Hawaii	CHANG (1961), cité par McCAUGHEY, 1968	
Pomme de terre	irrigué	1,28		0,83*		USA (Wisconsin)	JURY & TANNER, 1975	
Luzerne	irrigué	1,42		0,92*		USA (Wisconsin)	JURY & TANNER, 1975	
	irrigué				> 0,9	USA	TANNER & PELTON, cité par McCAUGHEY, 1968	
	non irrigué	1,35		0,88*		Versailles	KATERJI, 1982	Valeurs horaires
Blé	non irrigué	1,1-1,2		0,72-0,78*		Australie	DENMEAD & McILROY, 1970	Valeurs calculées d'après les résultats présentés par les auteurs
Blé	non irrigué				0,76	Les plaines centrales d'USA	HANK <i>et al.</i> , 1968	Valeurs journalières sur toute la période de végétation
Blé	bonne alimentation hydrique	1,16		0,70		Versailles	KATERJI <i>et al.</i> , 1977	Valeurs horaires sur toute la période de végétation.
Blé	Année sèche	1,16		0,72		Versailles	KATERJI <i>et al.</i> , 1977	Valeurs horaires sur toute la période de végétation.
Mais	irrigué				0,71	USA (Missouri)	DECKER, 1965	Valeurs journalières sur toute la période de végétation.
	irrigué				0,76	Canada (Sud Ontario)	McCAUGHEY, 1968	Valeurs journalières sur toute la période de végétation.
	irrigué		1,13		0,74	Versailles	KATERJI <i>et al.</i> , 1977	Valeurs horaires sur toute la période de végétation.
Gazon	irrigué				0,76	Zone semi-aride	ROSENBERG, 1974	
	irrigué	1,1		0,72*		Côte d'Ivoire	GOSSE, 1976	Valeurs horaires.
Gazon	non précisé				0,8-0,9	Hollande	SCHOLTE-UBING (1959) cité par McCAUGHEY, 1968	
Gazon	non précisé				0,8-0,9	Angleterre	RIDER & TUGWELL, 1960 cité par McCAUGHEY, 1968	
Ananas	irrigué	0,95		0,62		Côte d'Ivoire	COMBRES & PERRIER, 1976	

$$C = \frac{ETR}{P' / (P' + \gamma) \cdot (R_n + \phi_n)} \quad C_1 = \frac{ETR}{P' / (P' + \gamma) (R_n)} \quad C_2 = \frac{ETR}{(R_n + \phi_n)} \quad C_3 = \frac{ETR}{R_n}$$

* Valeurs calculées à partir du coefficient C en supposant $P' / (P' + \gamma) = 0,65$

d'origine advective. Il est important de noter que nos résultats concernent surtout des valeurs horaires ; bien que nos valeurs et celles d'autres auteurs (tabl. 1 et 2) se rapportent à des périodes journalières ou des stades phénologiques, les résultats restent sensiblement les mêmes et soulignent donc l'utilisation possible de telles formules à toutes les échelles. Enfin, il est probablement prématuré de se prononcer pour une formulation générale d'ETR s'appuyant

sur un coefficient C constant et valable quelle que soit la culture considérée dans les conditions de bonne alimentation hydrique ; néanmoins, l'accès à ce genre d'approche ne pourra s'effectuer qu'à travers des études détaillées de ce coefficient C.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bouchet R.J., Perrier A.**, 1973. Bilan d'énergie et évapotranspiration à différentes échelles. *Comm. Cong. « Le soleil au service de l'homme »*, UNESCO, Paris.
- Brown K.W.**, 1976. Sugar beet and potatoes. In : " *Vegetation and the atmosphere* ". Vol. II, Monteith éd. Academic Press London.
- Brun L.**, 1972. *Evaluation of Monteith's evapotranspiration model in Soybean*. Ph. D. Thesis, Kansas State University, 82 p.
- Combres J.C., Perrier A.**, 1976. Bilan énergétique et hydrique de l'ananas. *Conf. I.R.F.A. « Culture de l'Ananas »*, sept. 1976, Montpellier.
- Daudet F.A., Perrier A.**, 1978. Etude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique. *Rev. gén. Therm.*, **76**, 353-364.
- Davies J.A.**, 1972. Actual potential and equilibrium evapotranspiration for a bean field in Southern Ontario. *Agric. Meteorol.*, **10**, 331-348.
- Decker W.L.**, 1965. The energy balance of a plant cover under high levels of productivity. In : « *Fonctionnement des écosystèmes terrestres au niveau de la production primaire* » Actes du colloque de Copenhague, UNESCO, 1968.
- Denmead O.T., McIlroy I.C.**, 1970. Measurements of non-potential evaporation from wheat. *Agric. Meteorol.*, **7**, 285-302.
- Djavanchir A.**, 1971. *Mise au point d'une chambre de transpiration et son application à l'étude de la régulation stomatique*. Thèse Doct. Ing. Université d'Orsay, 52 p. + figures.
- Eckardt F.R., Berger A., Méthy M., Heim G., Sauvezon R.**, 1975. Interception de l'énergie rayonnante, échange de CO₂, régime hydrique et production chez différents types de végétation sous climat méditerranéen. In : « *Les processus de la production végétale primaire* », Moyse A. éd.
- Gosse G.**, 1976. Evapotranspiration et caractéristique d'un gazon en climat équatorial humide. *Ann. agron.*, **27**, 141-163.
- Gosse G., Perrier A., Itier B.**, 1977. Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien. *Ann. agron.*, **28**, 521-541.
- Grebet Ph.**, 1982. *Evapotranspiration, mesure et calcul*. Thèse Doc., Ing. Université de Paris VI, 271 p.
- Hank R.J., Gardner H.R., Cury E.E.**, 1968. Evapotranspiration climate relation for several crops in the central great plains. *Agron. J.*, **5**, 538-542.
- Itier B., Katerji N.**, 1983. Une nouvelle expression généralisée de la résistance aérodynamique d'un couvert végétal (soumis à *Oecol. Gen.*).
- Itier B., Perrier A., Gosse G.**, 1978 Présentation d'une étude analytique de l'advection. III — Vérification expérimentale du modèle. *Ann. agron.*, **29**, 209-222.
- Jury W.A., Tanner C.B.**, 1975. Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula. *Agron. J.*, **6**, 840-842.
- Katerji N.**, 1982. *Etude et modélisation des transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère*. Thèse Doctorat d'état, Université Paris VII, 197 p., + annexes 97 p.
- Katerji N.B., Gosse G., Perrier A., Daudet F.A.**, 1977. Etude suivie de l'évapotranspiration réelle d'un couvert de blé et de maïs au moyen d'un dispositif automatique B.E.A.R.N. *La Météorologie*, VI^e série, **11**, 45-53.
- McCaughey J.H.**, 1968. *A test of the Penman combination model for potential evapotranspiration*. M.S. Thesis, University McMaster, Canada, 91 p.
- Makking R.**, 1957. Examen de la formule de Penman. *Neth. J. Agric. Sci.*, **5**, 290-305.
- Monteith J.L.**, 1965. Evaporation and environment. In : " *The state and movement of water in living organisms* ". Symp. of the Soc. for exper. Biol. XIX, 205-234, Univ. Press Cambridge.
- Perrier A.**, 1975. Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III — Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26**, 229-243.
- Perrier A., Itier B., Bertolini J.M., Katerji N.B.**, 1976. A new device for continuous recording of the energy balance of natural surface. *Agric. Meteorol.*, **16**, 71-84.
- Perrier A., Katerji N., Gosse G., Itier B.**, 1980. Etude « in situ » de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. *Agric. Meteorol.*, **21**, 295-311.
- Priestley C.H.B., Taylor R.J.**, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Month. Weather Rev.*, **100**, 81-92.
- Rauner J.V.L.**, 1976. Deciduous forests. In : " *Vegetation and the atmosphere* " Vol. II, Monteith éd. Academic Press London.
- R.G.E.**, 1967. Evapotranspiration from a Paddy field. *J. Agric. Meteorol. Tokyo*, **22**, 149-158.
- Ripley G.A., Redman R.G.**, 1976. Grassland. In : " *Vegetation and the atmosphere* " Vol. II, Monteith éd., Academic Press London.
- Ritchie J.T.**, 1971. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. *Agron. J.*, **63**, 51-55.
- Rosenberg N.J.**, 1974. *Microclimate. The biological environment*. Ed. John Wiley sons, New York, 315 p.
- Seguin B.**, 1977. Estimation de l'E.T.P. en climat méditerranéen du sud-est de la France. *La Météorologie*, VI^e série, II, 33-40.
- Slatyer R.O., McIlroy I.C.**, 1961. Evaporation and the principle of its measurement. In : " *Practical micrometeorology* " C.S.I.R.O. (Australia) UNESCO.
- Squire G.R.**, 1979. The response of stomata of pearl millet to atmospheric humidity. *J. exper. Bot.*, **30**, 925-933.
- Szeicz G., Van Bavel C.H.M., Takami S.**, 1973. Stomatal factor in the water use and dry matter production by Sorghum. *Agric. Meteorol.*, **12**, 361-389.
- Thompson G.D., Boyce J.P.**, 1967. Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugar cane. *Agric. Meteorol.*, **4**, 267-279.