

Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien

G. GOSSE, A. PERRIER et B. ITIER

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I.N.R.A.,
78000 Versailles

Résumé

La détermination, par la méthode du bilan d'énergie, de nombreuses valeurs d'ETR d'une culture de blé, a permis l'application de méthodes statistiques pour estimer certaines variables difficiles à mesurer en pratique, notamment le déficit de saturation au niveau de la surface du couvert Y_n . Cette approche a conduit à proposer différents modèles d'estimation d'ETR pour la culture étudiée. Une synthèse des résultats est présentée dans le tableau 1. Une étude plus fine de la formulation la plus simple :

$$ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0)$$

avec $\frac{P'}{P' + \gamma}$ constante

R_n Rayonnement net

φ_0 Flux de chaleur échangée par conduction avec le sol,
nous a amenés à proposer différents coefficients k selon l'âge et le stade phénologique de la culture étudiée (tabl. 3).

Introduction

Pour l'agronome, la connaissance des besoins en eau des cultures est un des paramètres nécessaires à l'établissement d'un plan d'aménagement d'une région ou à la conduite d'une irrigation. Cette connaissance implique la détermination et la compréhension des variations des consommations réelles en eau des cultures dans diverses conditions. L'impossibilité jusqu'à nos jours de mesurer, d'une façon simple et à une échelle de temps fine, ces pertes ou évapotranspirations (ETR) dans les conditions naturelles a amené les praticiens à utiliser une formulation qui tienne compte des facteurs du climat, et néglige autant que faire se peut les paramètres contingents à la culture. Cette formulation climatique, notamment à travers les études théoriques de Penman (1948) et de Bouchet (1964) conduit à la définition d'évaporations potentielles EP qui représentent la demande climatique, borne supérieure des évapotranspirations observables dont la valeur peut être éloignée de la valeur réelle des pertes en eau.

22 OCT. 1979
O. R. S. T. O. M.

Collection de Références

n° B 9851 B.B.V.

En fait, face à ces divergences toujours présentes entre les ETR et les EP calculées, il y a souvent intérêt à cerner au plus près cette consommation en eau ; c'est pourquoi dans le cadre de cette étude, nous avons, à la suite de nombreuses mesures d'ETR, essayé de dégager une méthode d'estimation de l'ETR de la culture étudiée. Pour cela nous avons utilisé plusieurs expressions analytiques d'ETR, expressions dans lesquelles certaines variables difficilement mesurables en pratique ont été estimées grâce à une approche statistique. Selon le nombre et la nature des variables utilisées, ce système d'analyse a permis d'une part de mettre au point des méthodes d'estimation de l'ETR, et d'autre part de hiérarchiser le rôle des différentes variables entrant en jeu notamment celles de nature biologique.

I. — Rappels théoriques

Penman (1948) a proposé une formulation de l'évapotranspiration pour un couvert végétal schématisé et réduit à une surface idéale à saturation au niveau de laquelle toute l'énergie disponible serait absorbée. En transposant cette formulation à l'échelle instantanée, on peut écrire :

$$EP^* = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \left(1 + \frac{\rho \cdot c_p \cdot H \cdot Y_R}{R_n + \varphi_0} \right) \quad (1)$$

avec, en exprimant les unités dans le système international :

- EP* : évapotranspiration potentielle ($W \cdot m^{-2}$)
- R_n : rayonnement net ($W \cdot m^{-2}$)
- φ_0 : flux de chaleur à la surface du sol ($W \cdot m^{-2}$)
- ρ : masse spécifique de l'air ($kg \cdot m^{-3}$)
- c_p : chaleur massique ($J \cdot ^\circ C^{-1} \cdot kg^{-1}$)
- H : coefficient d'échange convectif entre la surface et le niveau de référence ($m \cdot s^{-1}$)
- Y_R : la différence entre la température de l'air et la température du point de rosée mesurée au niveau de référence R pris suffisamment haut pour que l'influence du couvert puisse être négligée
- P' : valeur de la dérivée de la pression de vapeur saturante pour la température du thermomètre humide T_h
- γ : constante psychrométrique ($65 P \cdot ^\circ C^{-1}$).

On peut généraliser cette formulation au cas concret d'un couvert végétal présentant, de par sa structure, d'une part une répartition verticale de l'énergie disponible ou rayonnement net et, d'autre part une régulation des échanges gazeux au niveau de toutes les surfaces évaporantes (pas de saturation au niveau de la surface des feuilles sauf cas exceptionnel après pluie, rosée ou irrigation). On doit alors prendre en considération, non plus une surface quelconque représentative du couvert mais de façon précise la surface supérieure du couvert (plan de cote h). Dans ces conditions les températures de l'air et du point de rosée au niveau de la surface h ne sont plus égales mais présentent une différence Y_h et l'expression de l'ETR devient :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \left(1 + \frac{\rho \cdot c_p \cdot H (Y_R - Y_h)}{R_n + \varphi_0} \right) \quad (2)$$

H est alors le coefficient d'échange entre le sommet du couvert h et le niveau de référence R.

Il est possible d'exprimer la relation (2) d'une autre façon, en termes de résistances (Perrier *et al.*, 1975) :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \cdot \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_c}{r_a}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_v}{r_a}} \quad (3)$$

avec : r_a = résistance aérodynamique du couvert

= inverse du coefficient d'échange H

r_v = résistance du couvert à la diffusion de la vapeur d'eau

r_c = résistance critique définie comme suit :

$$r_c = \frac{P' + \gamma}{\gamma} \cdot \rho c_p \cdot \frac{Y_R}{R_n + \varphi_0}$$

On verra dans la suite de l'exposé l'intérêt de cette formulation. Outre ces deux formulations de l'ETR qui correspondent à une généralisation de la formule de Penman grâce à l'introduction de résistances à la diffusion caractérisant la réaction du couvert, il est possible, à partir de l'équation du bilan d'énergie, d'exprimer l'ETR de la façon suivante, qui ne tient compte que des grandeurs mesurées par la méthode du bilan d'énergie :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \left(1 - \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot X \right) \quad (4)$$

avec : X = rapport des gradients de températures sèche et humide au-dessus de la culture envisagée.

C'est cette formulation de l'ETR qui a été retenue dans le dispositif de mesures automatiques ou système BEARN (Perrier *et al.*, 1975) qui a fourni les valeurs utilisées dans la suite de cette étude. On pourra noter au passage la similitude entre les relations 2, 3 et 4 donnant ETR ; seul le choix des paramètres explicatifs a changé.

En effet, on peut écrire :

$$ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \quad (5)$$

Les termes de passage, les différentes variables Y_h (écart entre la température de l'air et la température du point de rosée au niveau h), r_v (résistance globale du couvert) et X (rapport des gradients de température sèche et humide au-dessus du couvert), sont parfaitement définis.

Compte tenu des problèmes expérimentaux posés par la détermination de ces différentes variables, X, Y_h et r_v , nous proposons une méthode d'estimation d'ETR d'une culture à partir de variables plus simples à mesurer, notamment R_n et Y_R .

La relation (4) qui a donc servi à calculer toutes les valeurs d'ETR, semblait privilégiée par rapport aux formules (2 et 3) pour une étude statistique globale selon une méthode de régression linéaire progressive (optimisation de l'ordre d'introduction des variables) ; en effet, de ces trois formules et de leurs variables respectives représentatives de l'action du couvert (X, Y_h et r_v), seule X (relation 4) était directement

mesurée. Ainsi, l'indépendance entre X , variable à expliquer, et les variables explicatives caractérisant le climat (R_n , Y_R , T_a et r_a) ou la plante (indice de surface foliaire LAI ou encore par l'intermédiaire du système racinaire et de la régulation stomatique, l'évolution du stock en eau ΔH) était-elle assurée. Cette étude très globale sous la forme :

$$X = a_9 R_n + b_9 Y_R + c_9 LAI + d_9 \Delta H + e_9 r_a + f_9 T_a \quad (6)$$

donne un modèle d'estimation précis d'ETR (cf. modèle IX). Ce modèle sera développé dans un autre article ; on ne considérera ici que les résultats. Cependant, afin de minimiser la recherche toujours un peu arbitraire de corrélations, nous avons, après cette première étude, essayé de limiter l'analyse statistique et pour cela nous avons retenu l'expression (2) et la variable Y_h . En effet, la relation (2) fait intervenir :

- des variables purement climatiques Y_R et P' ,
- des variables intermédiaires dépendant très largement du climat, mais aussi dans une moindre mesure, des paramètres physiques de la végétation, ce sont R_n , φ_0 et H ,

- une variable Y_h caractérisant essentiellement la réponse du couvert (régulation stomatique) aux conditions extérieures, mais qui dépend aussi, dans une certaine mesure, des conditions climatiques (Perrier, 1976). Ainsi, si l'on considère les variables Y_R , R_n , φ_0 et H comme étant déterminées par le climat et les caractéristiques purement physiques du couvert végétal, la variable Y_h traduit seule la réaction biologique de ce couvert face aux conditions d'approvisionnement hydrique. C'est le terme qui traduit la réduction d'ETR par rapport à EP^* (relations 1 et 2) ; on pourra donc écrire :

$$Y_h = f \left(\begin{array}{l} \text{climat et déficit hydrique du sol par l'intermédiaire} \\ \text{de la régulation stomatique du couvert.} \end{array} \right) \quad (7)$$

Compte tenu de la relation (2) et des informations concernant la variable Y_h , nous allons établir et tester différents modèles d'estimation d'ETR ; ces modèles différeront par la manière dont on a cherché à expliquer la variable Y_h . Pour ces modèles, la complication croissante en fonction du nombre de variables utilisées n'ira d'ailleurs pas toujours de pair, ni avec une meilleure précision, ni avec le but recherché qui, suivant l'emploi que l'on compte faire d'une formule d'ETR, nécessite plus ou moins de précision mais toujours une certaine simplicité.

II. — Définition des modèles utilisés pour estimer Y_h

Le facteur climatique dominant, intervenant sur Y_h , est la valeur de Y_R . Il est en effet évident qu'il existe une certaine proportionnalité entre ces deux termes. On écrira donc :

$$\alpha = \frac{Y_R - Y_h}{Y_R}.$$

Cette hypothèse permet d'écrire la relation (2) sous la forme suivante :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{\rho c_p H \cdot Y_R}{R_n + \varphi_0} \right) \quad (8)$$

L'objet de cette étude est de tester le déterminisme du paramètre α représentatif du couvert et de sa réaction au climat par une analyse statistique portant sur un grand nombre de mesures effectuées sur un couvert de blé à la Minière. En effet, à partir de la relation (7), différentes hypothèses peuvent être émises correspondant à différentes approches.

1. — Recherche de α sous forme d'une constante (modèle I et II)

Il est possible de supposer qu'en première approximation, cette valeur de α , pour toute une saison de végétation, prend une valeur donnée :

— on ne retiendra pas la valeur unité pour α puisqu'elle correspond à la formulation de Penman (relation 1) qui s'éloigne le plus fortement des valeurs d'ETR. En effet, cette relation suppose la saturation au sommet du couvert ($Y_h = 0$), ce qui est irréalisable dans les conditions naturelles (Perrier, 1971-1975),

— par contre la valeur $\alpha = 0$ est non seulement une valeur moyenne très souvent rencontrée dans les conditions naturelles de plein champ (Perrier, 1977), mais encore la valeur qui conduit à la relation la plus simple :

Modèle I :

$$\alpha = 0 \quad \text{soit } Y_h = Y_R$$

d'où :

$$\text{ETR} = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) ; \quad (9)$$

— bien entendu, les valeurs expérimentales concernant un couvert végétal donné permettent de préciser une valeur moyenne de α , positive ou négative, plus ou moins proche de 0 (valeur précédente) qui permet de mieux ajuster les valeurs d'ETR estimées avec le lot de données expérimentales :

Modèle II :

$$\alpha = \text{Cte} \neq 0$$

$$(\bar{\alpha}_{75} = 0,12 \quad \bar{\alpha}_{76} = 0,14).$$

2. — Recherche du coefficient α sous forme d'une fonction de variables climatiques (Modèles III, IV et V)

Ce type de choix suppose que, pour un couvert donné, les paramètres biologiques, assez stables dans le temps, sont traduits par les constantes introduites dans les fonctions recherchées et que les grandeurs climatiques, très fluctuantes sont les variables qui, par l'intermédiaire des fonctions biologiques, modifient le coefficient α . Il faut souligner que cette hypothèse n'est pas apparemment en parfait accord avec les arguments développés précédemment (formule 7 donnant Y_h) puisque la régulation biologique déterminait seule dans une large mesure cette valeur de α . En fait si, pour un couvert donné, on a une relation assez bonne entre régulation et paramètres du climat, il est possible de rechercher α , uniquement sous la forme d'une relation dépendant des facteurs climatiques. On a donc recherché des relations linéaires simples entre α et certains facteurs climatiques, notamment :

— le rayonnement net, dont on sait le rôle sur la régulation stomatique au niveau d'une feuille (Djavanchir, 1973) et, par conséquent, très probablement sur le couvert végétal pris dans son ensemble :

Modèle III :

$$\alpha = a_3 R_n + b_3 ;$$

— la résistance critique

$$r_c \left(r_c = \frac{\rho c_p}{\gamma} \cdot \frac{(P' + \gamma) \cdot Y_R}{(R_n + \varphi_0)} \right)$$

qui est en fait une combinaison entre le déficit de saturation de l'air et le rayonnement net. Compte tenu d'une part du modèle III et d'autre part du fait que la résistance stomatique est inversement proportionnelle au déficit de saturation (Berger, 1971 ; Shawcroft et Lemon, 1971), nous avons adopté l'expression suivante :

Modèle IV :

$$\alpha = a_4 \frac{1}{r_c} + b_4 ;$$

— bien que l'effet majeur de Y_R ait déjà été pris en compte en posant $Y_h = a Y_R$, il est possible, comme les résultats le justifient, de rechercher malgré tout α en fonction de ce terme, soit :

Modèle V :

$$\alpha = a_5 Y_R + b_5$$

ce qui revient à rechercher une relation quadratique entre Y_R et Y_h .

3. — Recherche de α sous forme d'une fonction de variables à la fois biologiques et climatiques (Modèles VI, VII et VIII)

Sous cette forme, l'approche est différente de celle faite aux paragraphes précédents. En effet, on suppose qu'en dehors de Y_R , introduit dans la relation $Y_h = a Y_R$, le climat n'intervient plus comme seul facteur direct ; on introduit une action conjuguée du climat agissant à travers le déficit hydrique ΔH^* et la résistance critique r_c définie précédemment et des paramètres biologiques. Ces paramètres sont la surface foliaire totale du couvert LAI et la régulation de l'évapotranspiration réelle qui se traduit à travers l'évolution du déficit hydrique. Trois relations linéaires ont été choisies, compte tenu de ces paramètres, pour calculer :

— une action conjuguée du déficit hydrique et de la surface foliaire, soit

Modèle VI :

$$\alpha = a_7 \Delta H + b_7 LAI + c_7 ;$$

— une action conjuguée du déficit hydrique et de la résistance critique (facteur climatique complexe) soit :

* Le déficit hydrique est défini simplement ici comme étant la différence entre la somme des pluies et la somme des évapotranspirations réelles ($\Sigma P - \Sigma ETR$), valeurs qui sont cumulées à partir de la fin du ressuyage du sol, soit environ fin Février pour nos données expérimentales de la Minière. Bien entendu un terme correctif, fonction de la réserve facilement utilisable, pourrait être introduit. Mais, dans cette première analyse, il n'a pas été pris en compte pour réduire le nombre de grandeurs climatiques qu'il serait nécessaire de mesurer dans le cas d'une utilisation pratique, sans compter qu'un tel terme, de par sa forme linéaire, se retrouve en grande partie dans les constantes c_6 , c_7 et c_8 .

Modèle VII :

$$\alpha = a_0 \Delta H + b_0 r_c + c_0 ;$$

— enfin une action du déficit hydrique combiné à la résistance critique :

Modèle VIII :

$$\alpha = a_8 \Delta H + b_8 \frac{\Delta H}{r_c} + c_8 .$$

III. — Dispositif expérimental

Les différents modèles décrits ci-dessus ont donc été testés à partir de mesures horaires de l'évapotranspiration réelle faites sur une culture de Blé de plein champ (plusieurs hectares) sur le domaine expérimental de la Minière. Ces mesures sur une variété de blé d'hiver « Talent » furent réalisées à l'aide du dispositif « BEARN » mis au point au laboratoire (Perrier *et al.*, 1975) et complétées, à un niveau de référence (3 m au-dessus du couvert en 1976 et 2 m en 1975) par la mesure de la température de l'air, la température du point de rosée (psychromètre) et la vitesse du vent. Ces derniers paramètres climatiques sont indispensables d'une part pour la détermination du coefficient d'échange $H(H = f(u))$ et d'autre part pour le calcul de α par l'intermédiaire de la relation (8).

Ces mesures poursuivies en 1975 et 1976 se réfèrent donc à deux années climatiques qui présentent une assez bonne homogénéité au point de vue météorologique à l'exception de la pluviométrie, différente à l'extrême :

— L'année 1975 est une année très proche des années normales avec une très bonne répartition des pluies (230 mm entre la mi-février, début tallage du blé et fin juillet, juste avant la récolte). Malgré ces apports d'eau importants et probablement à cause des nombreuses périodes de beau temps sec, on a pu observer des évapotranspirations potentielles calculées (PENMAN) souvent élevées, la somme de ces valeurs pendant la période citée (mi-février à la récolte fin juillet) ayant été d'environ 470 mm.

— L'année 1976 n'a reçu que très peu d'eau puisque les pluies n'ont atteint que 70 mm pendant la même période. Ces conditions très sèches ne furent pas associées à un ensoleillement très supérieur, ni à des déficits de saturation de l'air constamment élevés ; aussi la somme des évaporations potentielles calculées ne fut que de 10 p. 100 supérieure à celle de 1975, soit 470 mm pour toute la période de végétation (mi-février à la récolte, mi-juillet). La différence entre ces deux années se traduit à travers la durée de végétation, période un peu plus courte en 1976 consécutive à une maturité plus rapide du blé (15 jours environ).

IV. — Discussion et comparaison des modèles

Une analyse statistique sur l'ensemble des données de 1975, puis de 1976 a été faite, pour déterminer pour chaque modèle la valeur de α et par conséquent des paramètres (a_i , b_i , c_i) qui permettent de le déterminer.

1. — Comparaison des modèles

Le tableau 1 représente pour chacun des modèles envisagés et pour chaque année leurs caractéristiques : le coefficient de corrélation et le coefficient de la régression entre ETR estimée par le modèle et ETR observée.

TABLEAU 1

Caractéristiques statistiques des ajustements testés

- coefficient de corrélation
— biais (pente de la droite de régression entre ETR estimée et ETR mesurée)

Modèle	Blé 75		Blé 76	
	Coeff. de corrélation	Pente de la droite de régression entre ETR estimée et ETR observée	Coeff. de corrélation	Pente de la droite de régression entre ETR estimée et ETR observée
I $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$	0,90	0,86	0,91	0,85
II $\alpha^* = \text{Cte}$	0,92	1,05	0,80	1,17
III $\alpha = aR_n + b$	0,92	1,01	0,76	1,15
IV $\alpha = \frac{a}{r_e} + b$	0,92	1,04	0,83	1,15
V $\alpha = a(Ta - Tr) + b$	0,89	1,01	0,88	1,08
VI $\alpha = a\Delta H + bLAI + c$	0,96	1,03	0,93	1,02
VII $\alpha = a\Delta H + \frac{b}{r_e} + c$	0,94	1,03	0,91	1,01
VIII $\alpha = a\Delta H + b\frac{\Delta H}{r_e} + c$	0,94	1,03	0,92	1,03
IX Modèle complet	0,97	1,01	0,96	1,00

* α est défini comme suit $\frac{Y_R - Y_h}{Y_R}$ avec Y_h et Y_R déficits de saturation de l'air respectivement au niveau de la surface du couvert (h) et de référence (R).

— Le modèle I, qui suppose une valeur moyenne de α nulle, réduit l'évapotranspiration réelle à une fonction simple de R_n et φ_0 . Cette solution permet d'expliquer respectivement pour 1975 et 1976, 81 et 84 p. 100 de la variation. Toutes les autres solutions considèrent l'évapotranspiration réelle comme fonction de cette première expression $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$ (relation 5). Il est à noter, pour cette première estimation, que l'étude de la régression entre valeurs estimées et mesurées montre une remarquable stabilité d'une année à l'autre malgré leur différence sous l'angle hydrique mais une sous-estimation d'environ 15 p. 100 (pente de 0,86 et 0,85). On verra au chapitre suivant, l'intérêt pratique que l'on peut tirer de ces deux constatations.

— Le modèle II ne donne pas d'amélioration sensible par rapport à la version précédente. S'il y a une légère amélioration en 1975, on constate en 1976, une nette

dégradation du coefficient de corrélation donc de la variation expliquée. Cette instabilité dans le temps, assez compréhensible, fera rejeter ce type de formulation. En effet, la relation (7) soulignait que Y_R , et par conséquent α , dépendait du climat et de la régulation du couvert. Aussi, en année normale, par le jeu des résistances en présence, il est possible d'admettre $\alpha = Cte \neq 0$; par contre, pour une année sèche à forte régulation biologique α variera beaucoup, entraînant ainsi un mauvais coefficient de corrélation. Ces constatations concernant ce modèle II se vérifient puisque les estimations sont bonnes en 1975 (pente de la droite de régression égale à 1) et plus mauvaise en 1976 (pente de 1,17, soit une surestimation moyenne de 17 p. 100).

— Les modèles suivants III, IV et V, qui font intervenir des variables climatiques, ne présentent finalement pas un très grand intérêt. En effet, ils compliquent le modèle sans pour cela améliorer de façon nette le coefficient de corrélation par rapport au premier modèle; on constate même une diminution sensible de ce coefficient pour 1976, comme pour le modèle II, quoique les pentes des droites de régression soient voisines de l'unité en 1975 et tout aussi différentes de l'unité en 1976 que pour les modèles précédents. Seul le modèle V présente un avantage marqué sur les modèles II, III et IV par son coefficient de corrélation plus élevé en 1976, de plus très stable dans le temps (0,89 et 0,88) et par la pente de la droite de régression proche de l'unité (1,01 et 1,08). Son intérêt n'est donc pas entièrement négligeable devant le modèle I, à sa complexité près, puisque si les coefficients de corrélation sont légèrement plus faibles que pour le modèle I, les pentes des droites de régression sont significativement plus proches de l'unité que pour le modèle I.

— Le modèle VI dit « biologique », par opposition à climatique puisque ses deux variables ΔH et LAI dépendent pour une large part des processus de croissance et de régulation stomatique, apparaît très satisfaisant. En effet, on constate un coefficient de corrélation bien meilleur que précédemment (0,96 et 0,93) et qui atteint pratiquement la valeur obtenue par celui de l'ajustement statistique général (modèle IX) ainsi que des pentes des droites de régression (1,03 et 1,02) très voisines de l'unité. Nous discuterons de la stabilité de cet ajustement par la suite.

— Les deux modèles suivants (VII et VIII) un peu plus complexes que les précédents (3 variables : ΔH , R_n et Y_R au lieu de 2) se révèlent aussi légèrement moins efficaces et par conséquent ne se justifient pas par rapport au précédent.

De ces trois modèles, nous retiendrons surtout le modèle VI qui offre les meilleurs résultats, en tenant compte par l'intermédiaire des deux variables ΔH et LAI, des effets du couvert :

$$\alpha = a_6 \Delta H + b_6 \text{ LAI} + c_6.$$

2. — Discussion et choix des solutions

Nous allons choisir parmi ces huit modèles, fondés sur la relation (2 ou 8), celui qui satisfait aux qualités suivantes :

- La meilleure estimation (pente voisine de 1), une bonne précision (coefficient de corrélation élevé) et une stabilité dans le temps suffisante; pour cela, nous aurons à les comparer au modèle IX basé sur l'analyse du bilan d'énergie et dans lequel nous avons traité sous l'angle statistique le plus général X, variable dominante de la relation (4). Le tableau 1 en précise les caractéristiques statistiques : coefficient de

corrélation élevé, 0,97 et 0,96 et une bonne estimation ; cependant, ces résultats très intéressants sont obtenus avec un grand nombre de variables qui ne permet plus d'analyser les liens de causes à effets et rendent la formulation très peu aisément utilisable.

L'analyse précédente a montré que dans l'ordre croissant de complexité, les modèles I, VI et IX présentaient un bon critère de choix : la stabilité des performances obtenues pour les deux années très différentes sous l'angle hydrique. En fait, plus que cette stabilité des performances, il est nécessaire que le modèle testé en 1975 soit applicable en 1976 et vice-versa ; c'est donc une constance des coefficients a_i , b_i , c_i pour les deux années qu'il faut aussi tester.

Le tableau 2 donne pour chacune de ces années les coefficients trouvés ; le modèle IX présentant une certaine instabilité, on ne s'étendra pas sur ce modèle, cependant intéressant par ses performances, puisque nous le développerons par ailleurs. Quant au modèle I, de beaucoup le plus simple et le plus stable, il sera repris au chapitre suivant, car il présente la variation expliquée la plus faible parmi les modèles retenus et la pente de la droite de régression ETR estimée par rapport à ETR mesurée la plus différente de l'unité. Le modèle V, quant à lui, montre apparemment une mauvaise stabilité du coefficient « a », mais elle est essentiellement due aux valeurs de Y_R plus élevées en 1976 qu'en 1975 parce que le niveau de référence ne fut pas le même. Aussi, ce modèle peut être considéré comme stable et s'il n'apporte guère plus d'explications au niveau de la dispersion que le modèle I, la valeur des pentes de la droite de régression est meilleure car plus proche de l'unité (1,01 et 1,08). Pour des raisons de stabilité et de meilleure explication de la dispersion, le modèle VI sera analysé plus en détail. En effet, il faut souligner la très bonne stabilité des coefficients a_6 et b_6 d'une année sur l'autre, seule la valeur de la constante c_6 diffère notablement, pour la même raison que pour le modèle V. Cette efficacité et cette stabilité du modèle VI sont essentiellement dues au fait que l'on cherche à expliquer à partir uniquement de deux termes liés au couvert (ΔH et LAI) une variation résiduelle fonction de Y_R par

TABLEAU 2

Valeurs des coefficients de régression a, b, c, d pour les modèles les plus performants (I, V, VI et IX)

		a	b	c	d
Modèle I	1975	0	0		
	1976	0	0		
Modèle V	1975	0,014 8	0,199 7		
	1976	0,008 6	0,218 2		
Modèle VI	1975	0,001 7	0,016 5	0,435	
	1976	0,001 7	0,013 5	0,138	
Modèle IX	1975	0,009 74	— 0,207	— 0,021 3	— 0,114
	1976	0,008 17	— 0,06	— 0,013 9	— 0,289

rapport à un terme principal $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$ très stable d'une année sur l'autre (modèle I). Face au modèle IX, performant mais instable donc d'emploi difficile, nous avons le modèle I simple, très stable, mais donnant une estimation systématiquement biaisée. Entre ces deux modèles extrêmes, les modèles V et VI fournissent malgré la différence de nature des variables explicatives, des résultats similaires. Il est possible de donner l'interprétation suivante de cette convergence : dans une zone à contraste faible entre les cultures, le déficit de saturation au-dessus de cette culture est imposé par les conditions hydriques de celle-ci, soit, notamment ΔH ; cette remarque est en bonne concordance avec les idées développées par Bouchet et Perrier (1973). A titre d'illustration, les figures 1a et 1b représentent les résultats des régressions dans le cas du modèle VI entre l'ETR estimée en ordonnée et l'ETR observée en abscisse, pour chacune des années. Les figures 1c et 1d montrent la bonne stabilité dans le temps des ajustements puisqu'ils illustrent le résultat du modèle 1975 avec les données de 1976 et vice-versa. Ce modèle VI nécessite cependant presque autant de paramètres à mesurer que le modèle IX mais, compte tenu de sa bonne stabilité dans le temps, il pourra se généraliser plus sûrement. Cette formulation intéressante pour analyser les différents effets des paramètres climatiques et biologiques sur l'ETR d'une culture de blé pose, au niveau de la vulgarisation, les problèmes relatifs au nombre de mesures à effectuer ou de grandeurs à définir (R_n , Y_R , H , φ_0 , ΔH , LAI). Aussi, dans une optique très pratique, une amélioration du modèle I reste une des voies les plus intéressantes. Notons cependant, que toutes ces analyses nous ont montré d'une part, le rôle des facteurs climatiques, et d'autre part au niveau du coefficient α la dominance de ΔH , LAI ou dans une certaine mesure de Y_R .

V. — Modèle simplifié et applications pratiques

Lors de la discussion des résultats généraux (tabl. 1) nous avons remarqué la simplicité et la stabilité du modèle I conduisant à :

$$ETR = \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) . \quad (9)$$

Une telle relation permet d'expliquer, quelle que soit l'année, 81 et 84 p. 100 de la variation, précision souvent suffisante pour de nombreuses applications pratiques. De plus, cette estimation de l'ETR ne demande seulement que deux mesures spécifiques R_n et φ_0 et l'utilisation des données météorologiques classiques de réseau T_a , T_R pour calculer $\frac{P'}{P' + \gamma}$. C'est donc une formule d'une grande simplicité d'utilisation.

Il faut tout de même signaler que l'utilisation de la formule $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$ pour estimer ETR, introduit des écarts plus ou moins systématiques suivant la plante et surtout ses conditions hydriques. Ces écarts apparaissent lors du test (ETR estimée, ETR mesurée) sous la forme d'une divergence (0,86 pour le blé en 1975 et 1976). Il est donc possible d'écrire (relation 5) :

$$ETR_{BLÉ} = k \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0) \quad (5)$$

avec : pour 1975-1976 : $k = 1,16$.

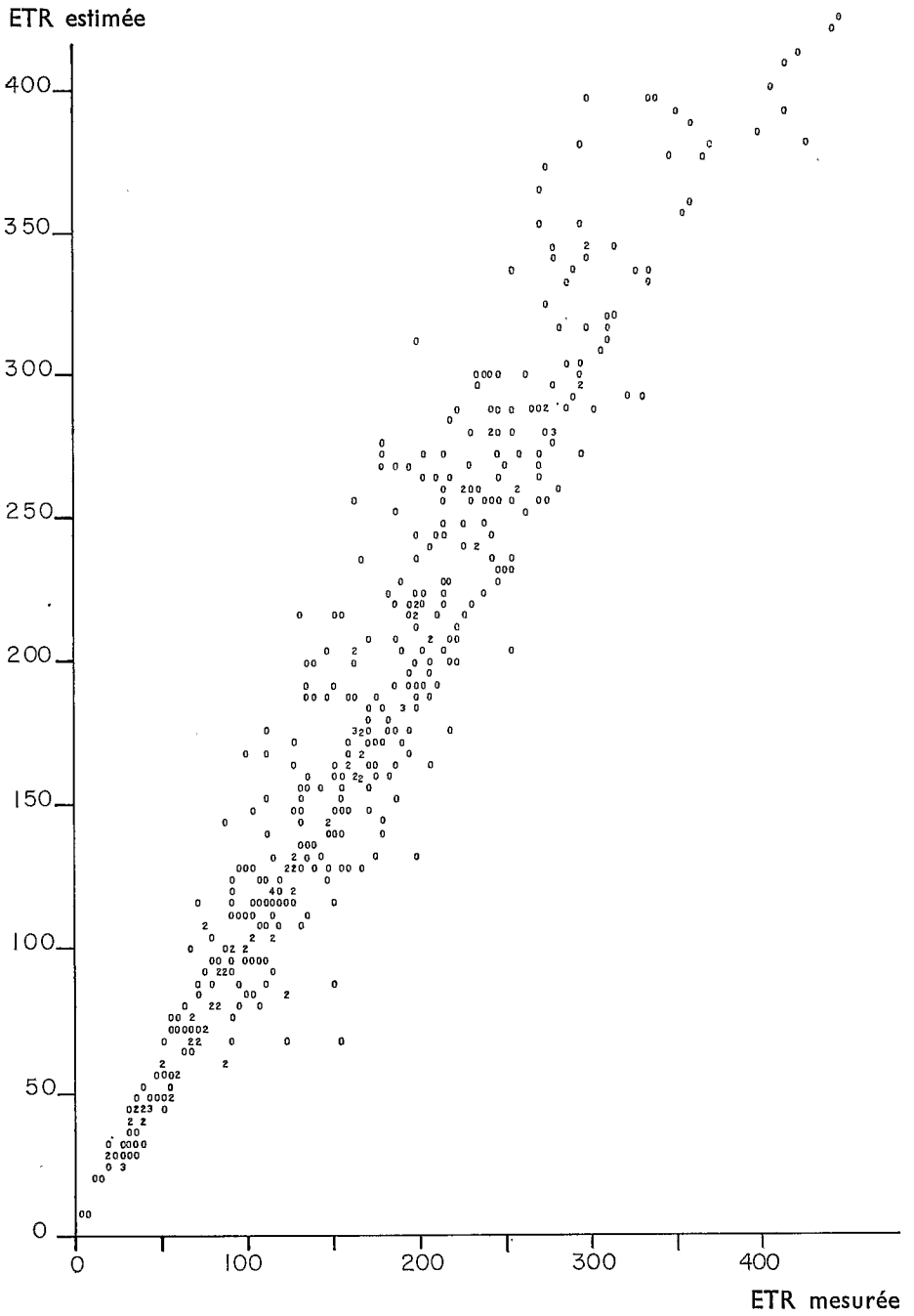


FIG. 1a.

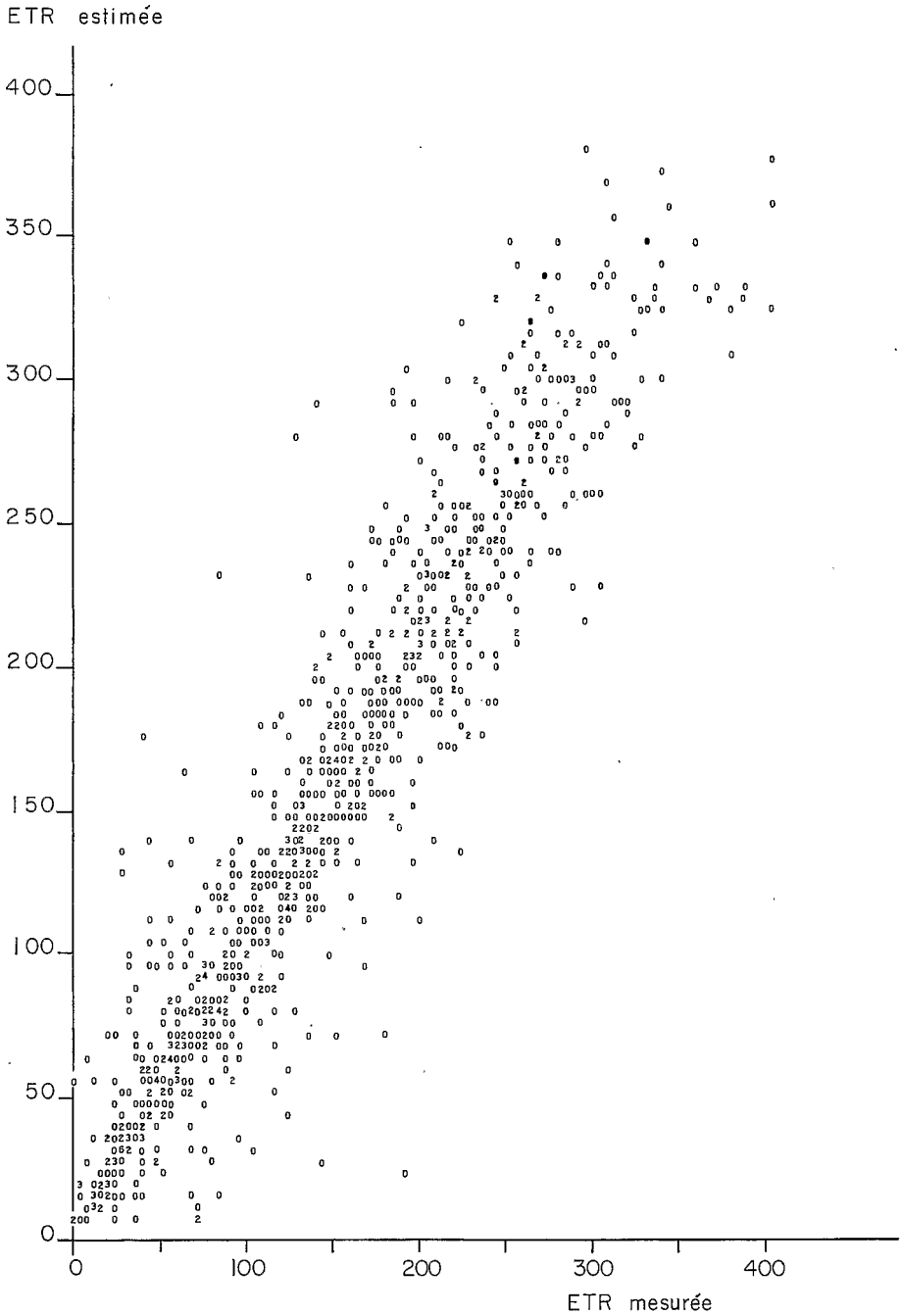


FIG. 1b.

FIG. 1b. — Comparaison entre l'ETR estimée selon le modèle VI et l'ETR mesurée (a = année 1975, b = année 1976).

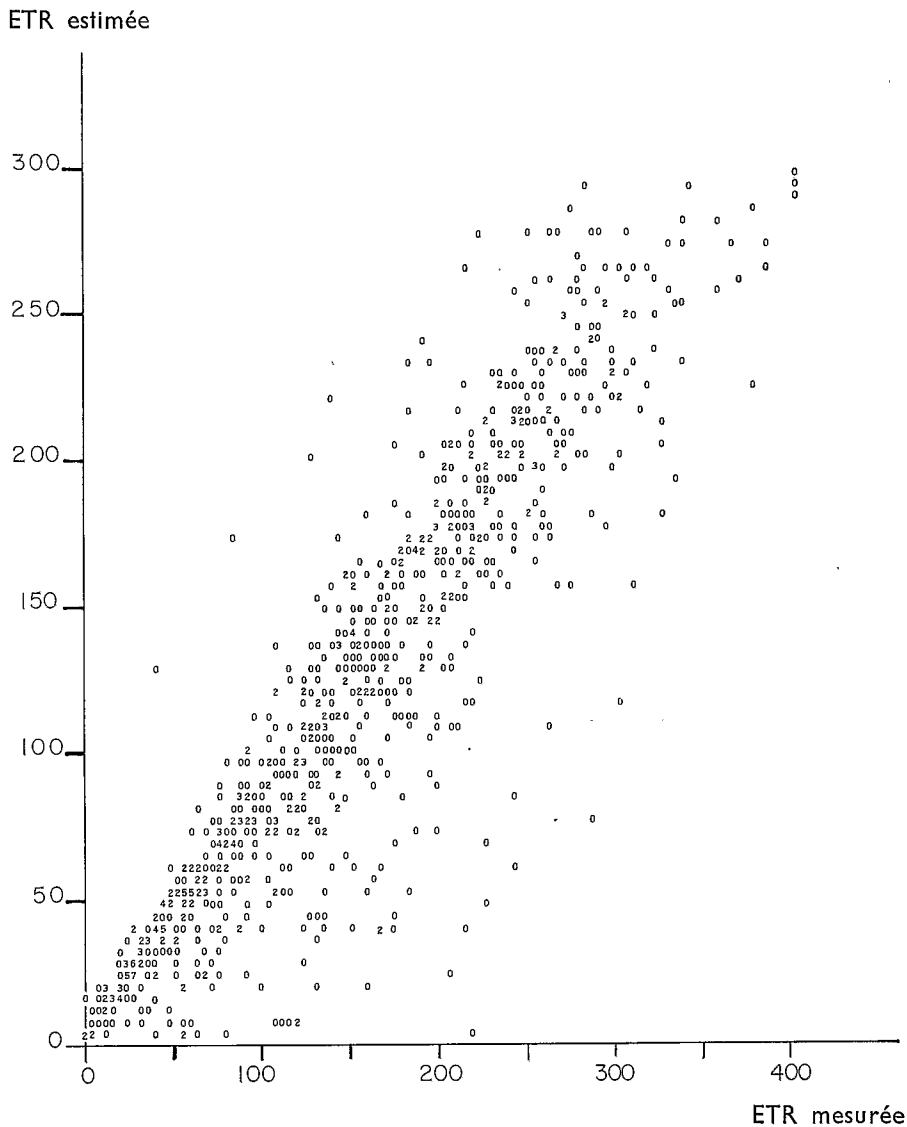


FIG. 1c. — Comparaison entre l'ETR estimée selon le modèle VI 1975 et l'ETR mesurée 1976.

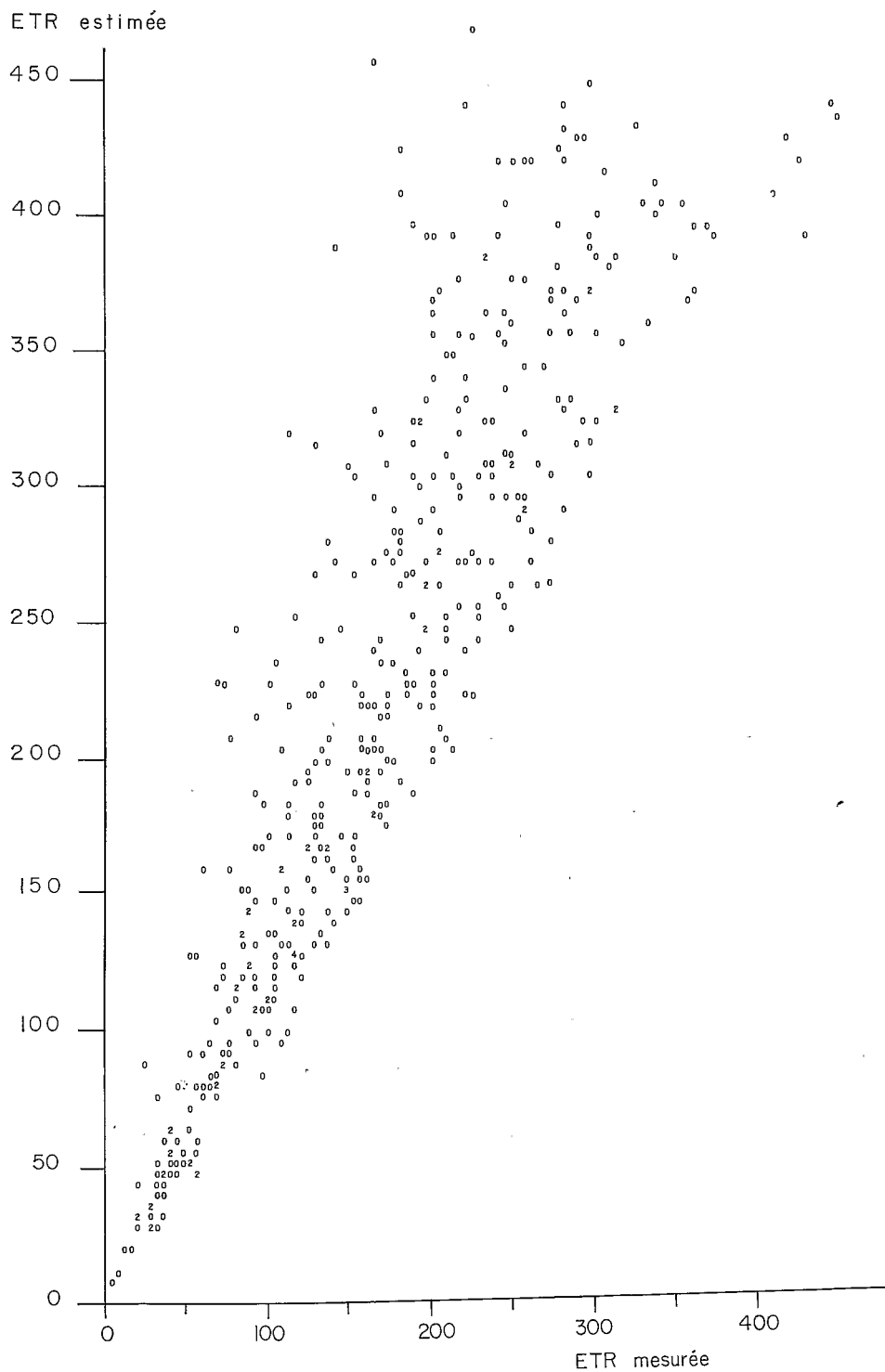


FIG. 1d. — Comparaison entre l'ETR estimée selon le modèle VI 1976 et l'ETR mesurée 1975.

Il est intéressant de rappeler le parallèle signalé entre cette formulation et celle proposée précédemment, relation (3) :

$$k = \frac{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{r_e}{r_a}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \frac{r_v}{r_a}}$$

Le fait que l'on puisse écrire la relation (5) montre qu'en moyenne la résistance de la végétation r_v varie dans le même sens que la résistance critique r_e ; des résultats similaires avaient été obtenus par ailleurs sur gazon (Gosse, 1976) et sur maïs (Perrier, résultat non publié).

Ce coefficient, qui traduit, entre autres, la réaction moyenne du couvert végétal aux conditions climatiques et hydriques, peut être interprété comme un coefficient cultural moyen pour la culture étudiée, aussi sera-t-il en partie fonction du développement de la culture. Ainsi, il est possible de penser qu'on peut affiner cette estimation en délimitant, dans le temps, des stades de végétation bien définis.

Le tableau 3 donne la valeur du coefficient k et du coefficient de corrélation pour chaque année et pour chacun des stades ainsi que pour l'ensemble de la période de végétation (l'ordonnée à l'origine b n'était pas significativement différente de zéro, nous l'avons considérée comme nulle).

TABLEAU 3

Valeurs des caractéristiques de l'ajustement de la formule $ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (R_n + \varphi_0)$
selon le stade de végétation

		Coefficient corrélacion	Valeur du coefficient k
Tallage	1975	0,966	1,29
	1976	0,979	1,46
Montaison	1975	0,933	1,35
	1976	0,942	1,40
Epiaison	1975	0,950	1,34
	1976	0,951	1,23
Maturation	1975	0,939	0,97
	1976	0,950	0,96
Tous Stades	1975	0,900	1,16
	1976	0,914	1,16

Si l'on teste les différents coefficients k pour définir ceux qui peuvent être considérés comme significativement différents, il apparaît :

— pour 1975, aucune différence significative entre les trois premiers stades dits « stades verts » ;

— pour 1976, une différence apparaît dès le stade épiaison et l'on peut attribuer

ce changement à la sécheresse ; dans ce stade, la plante évolue et réduit ses échanges en eau, alors que ce phénomène n'est vraiment net que pendant la maturation en 1975.

Pour ces trois stades, on peut prendre $k = 1,34$.

Par contre, le stade maturation se démarque nettement des autres pour les deux années et prend la valeur moyenne $k = 0,96$.

Les figures 2a et 2b illustrent les résultats précédents.

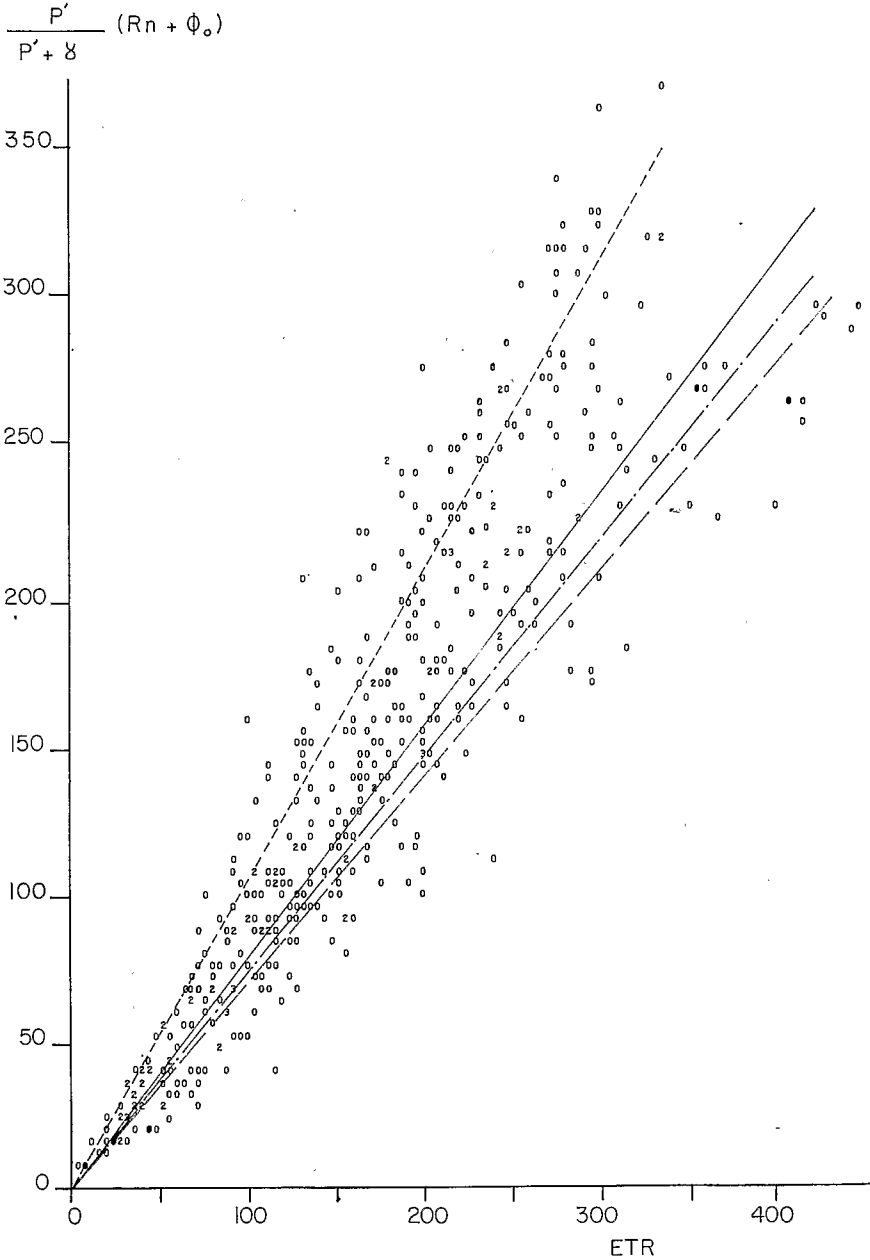


FIG. 2a.

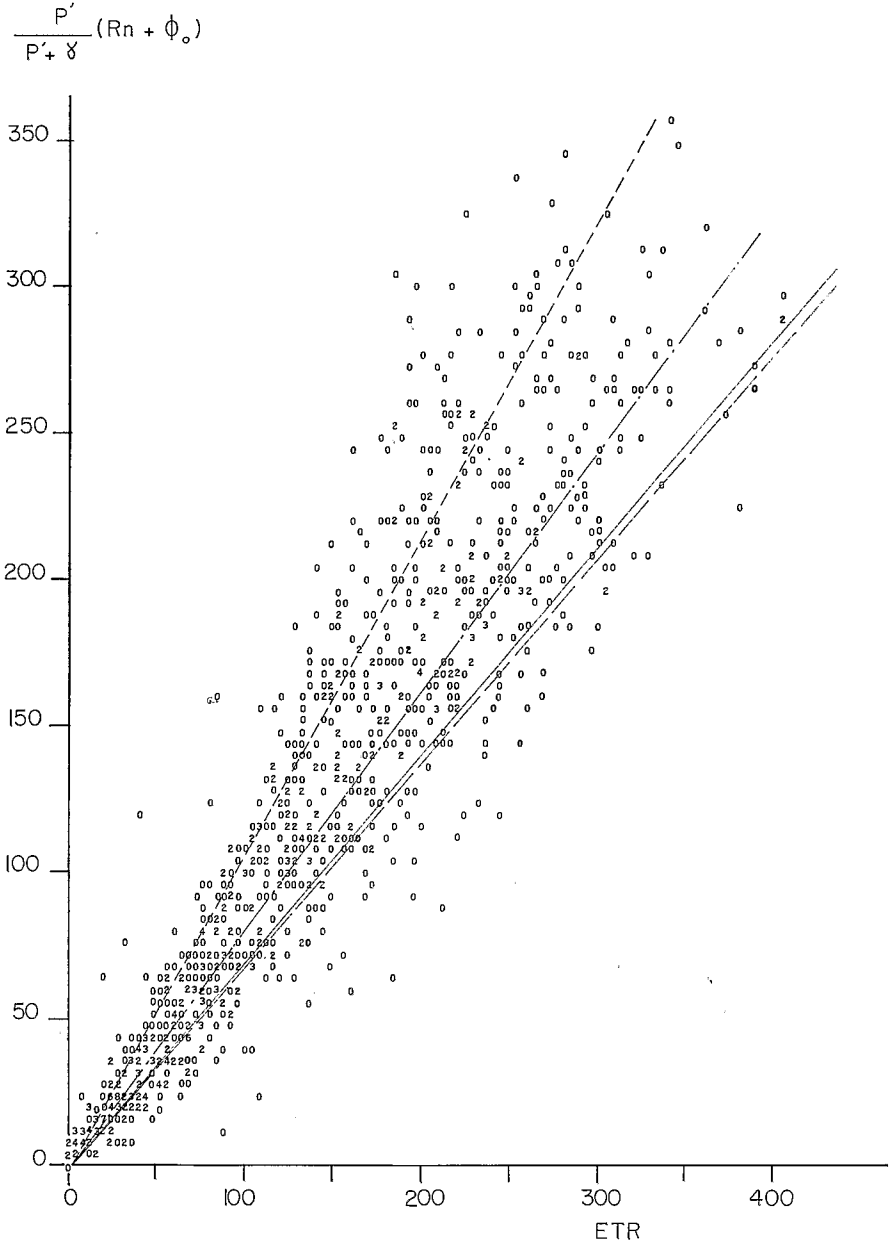


FIG. 2b.

FIG. 2ab. — Evolution de l'ETR en fonction du terme $\frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \phi_0)$ selon le stade de végétation

(a = année 1975, b = 1976).

- Tallage
- - - Montaison
- . . . Maturation
- · - · - Epiaison

Cette étude montre, d'une part, qu'il est possible de cerner au mieux les besoins en eau de la plante à partir de cette relation simple et, d'autre part, qu'un certain vieillissement apparaît lié à l'évolution du métabolisme de la plante. Les conséquences de cette évolution se traduisent par une réduction de l'évapotranspiration réelle de la culture.

Conclusion

Plusieurs modèles de complexité variable, intégrant plus ou moins bien la plante, sont donc envisageables (modèles I, V et VI) ; le choix demeure lié à l'utilisation qui en sera faite. Tous se basent sur une expression analytique qui traduit bien l'action directe des facteurs climatiques sur l'évapotranspiration, la répercussion de ces facteurs au niveau de la régulation biologique étant appréhendée pour un couvert donné, par analyse statistique sur le très grand nombre de données fiables et précises obtenues à l'aide du système BEARN.

Si le modèle VI présente sous cet angle un grand intérêt puisqu'il intègre l'action du déficit hydrique du sol ΔH qui pourrait être corrigé en fonction des connaissances de l'enracinement des plantes et du type de sol considéré, celle de la surface foliaire (LAI) et par ses coefficients, a , b , c , celle des caractéristiques propres à la culture, il n'en reste pas moins, comme on l'a déjà souligné, que ce modèle reste assez complexe d'emploi.

Aussi, d'un point de vue pratique et pour des échelles d'espace allant de la parcelle à la petite région, la formulation :

$$ETR = k \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$$

s'avère être la plus utile. En effet, elle fait appel à des paramètres relativement simples à mesurer et de plus, elle est facilement transposable à des échelles de temps supérieures (jour, décade...). Rappelons aussi que cette formule, appliquée à d'autres cultures (gazon, maïs, ananas) et sous d'autres climats, a donné des résultats similaires à ceux obtenus sur blé que nous venons d'analyser. Il serait cependant intéressant de tester cette relation en climat semi-aride, soit dans le cas où ETR serait très fortement influencée par des déficits hydriques importants, soit dans le cas où une zone irriguée (ETR_{max}) serait soumise à une forte advection générale due au climat semi-aride.

Reçu pour publication en août 1977.

Summary

Study of the actual evapotranspiration of a wheat field in the Parisian region

Numerous measurements of actual evapotranspiration of a wheat field have been made by the energy balance method. These data were analysed statistically to estimate the values of variables which it is difficult to measure, such as saturation deficit at the top of the canopy γ_h . We suggested

several models to estimate actual evapotranspiration of a wheat field, the results of which were compared in table 1. Determination of k as defined by the simplest formula :

$$ETR = k \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$$

with $\frac{P'}{P' + \gamma}$ function of the wet bulb temperature

R_n , net radiation

φ_0 , heat flux exchanged by conduction with the soil,

showed it to be systematically dependent on the age of the crop.

Zusammenfassung

Untersuchung der realen Evapotranspiration eines Weizenfeldes im Pariser Becken

Die Bestimmung zahlreicher Werte der ETR eines Weizenfeldes auf Grund der Energiebilanzmethode ermöglichte die Anwendung statistischer Methoden zur Schätzung gewisser Variablen, die in der Praktik schwierig zu messen sind, besonders das Sättigungs-defizit auf der Oberfläche der Yh-Decke. Diese Annäherung führte dahin, verschiedene Modelle zur ETR-Schätzung für die untersuchte Kultur vorzuschlagen. Eine Synthese der Ergebnisse ist in Tabelle 1 dargestellt. Eine genauere Untersuchung der einfachsten Formulierung

$$ETR = k \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} (R_n + \varphi_0)$$

mit $\frac{P'}{P' + \gamma}$ als Konstante

R_n = reine Strahlung

φ_0 = mit dem Boden durch Leitung ausgetauschter Wärmestrom
veranlaßte uns, verschiedene k -Koeffizienten vorzuschlagen (Tabelle 3) je nach Alter und phenologischem Stadium der untersuchten Kultur.

РЕЗЮМЕ

Изучение реальной эвапотранспирации культуры пшеницы в парижском бассейне. Госс Г., Перрье А., Итье Б.

Определение многочисленных величин ЕТЯ культуры пшеницы при помощи метода энергетического баланса, позволило применить статистические методы для оценки некоторых переменных, трудно поддающихся измерению на практике, как например, дефицит насыщения Y_n . Это позволило предложить разные модели оценки ЕТЯ для изучаемой культуры. Синтез результатов представлен в таблице И° 1. Более точное изучение формулировки

$$ЕТЯ = \Pi \cdot \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot (Y_n + \varphi_0)$$

с постоянным $\frac{P'}{P' + \gamma}$, и в которой Y_n представляет чистое излучение, а φ_0 — тепловой поток кондуктивно обменивающийся с почвой, — позволило предложить различные коэффициенты k -в зависимости от возраста культуры и фенологической стадии которую она проходит (таблица И° 3).

Références bibliographiques

- BERGER, 1970. Le potentiel hydrique et la résistance à la diffusion dans les stomates indicateurs de l'état hydrique de la plante. *Actes du Colloque d'Uppsala*, UNESCO, Paris, 1973.
BOUCHET R. J., 1964. Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. In *L'eau et la production végétale* (Ed. INRA), 151-241.

- BOUCHET R. J., PERRIER A., 1973. Bilan d'énergie et évapotranspiration à différentes échelles. *Soleil au service de l'homme*. UNESCO, Paris 2-6/7/73, 27 p.
- DJAVANCHIR A., 1970. Mise au point d'une chambre de transpiration pour mesurer la résistance stomatique. *Oecol. plant.*, **5**, 3, 301-318.
- GOSSE G., 1976. Evapotranspiration et caractéristiques d'échange d'un gazon en climat équatorial humide. *Ann. agron.*, **27**, (2), 141-163.
- GOSSE G., PERRIER A., ITIER B., 1977. Estimation de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. Publication en cours.
- PENMAN H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, **193**, 120-145.
- PERRIER A., 1970. Absorption de l'énergie radiative par un couvert végétal. Influence de celui-ci sur l'intensité des flux en présence. Application au calcul de l'évapotranspiration. In *Rayonnement solaire et hydrométéorologie*. C. R. séance d'étude Soc. Fr. Therm., section énergie solaire, AFEDES, 28 p.
- PERRIER A., 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Evapotranspirations réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. agron.*, **26** (3), 229-243.
- PERRIER A., 1976. *Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Paris VI.
- PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J. M., KATERJI N., 1976. A new device for continuous recording of the energy balance of natural surfaces. *Agric. Met.*, **16**, 71-84.
- SHAWCROFT R. W., LEMON E. R., 1970. Estimation of internal crop water status from meteorological and plant parameters. Actes du colloque d'Uppsala, UNESCO, Paris, 1973.
- THORNTON C. W., 1948. *Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere*. The John Hopkins. Lab. Climatol. Yearbook, New Jersey.
- TURC L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.* **12**, 13-49.
-