

ORSTOM - ADIOPODOUME

Septembre 1984

**MODELISATION HORAIRE
DE LA RESISTANCE GLOBALE D'UN COUVERT DE BLE
EN FONCTION DE SON ETAT HYDRIQUE .**

par Bruno ZELLER

- PLAN -

INTRODUCTION	p 1
A . DEFINITION DE LA RESISTANCE GLOBALE DU COUVERT LIMITES ACTUELLES DE MODELISATION	p 3
B . PROPOSITIONS D 'INTERPRETATIONS DE QUELQUES VALEURS EXPERIMENTALES OBTENUES DANS UN CHAMP DE BLE	p 14
1.. Données disponibles - Principe de la modélisation	p 14
2.. Régulation photique	p 18
3.. Régulation hydrique selon un système à réservoir : problèmes de modélisation	
3.a.... Le potentiel hydrique du couvert	p 20
3.b.... Premier essai de modélisation	p21
3.c.... Second essai de modélisation : prise en compte empirique de Ψ_{sol} et LAI	p 24
CONCLUSION	p 32
BIBLIOGRAPHIE	p 33

Résumé :

La première partie consiste en une discussion de la signification de la résistance globale du couvert à l'échelle horaire : un aperçu bibliographique, concernant des mesures sur des cultures diverses, justifie sur le plan théorique la considération du fonctionnement stomatique d'une part et de la stratification du couvert d'autre part. Dans le cas particulier du Blé, les données sont insuffisantes pour simuler ces deux aspects du fonctionnement du couvert ; pour cette raison on procède à la simulation d'un terme global de résistance : R_c . Deux facteurs sont considérés comme essentiels dans le calcul de R_c : le rayonnement et l'état hydrique du couvert défini par une valeur globale de potentiel hydrique ; R_c résulte alors d'une ouverture photique avec, éventuellement, une fermeture hydrique. Deux modèles sont successivement proposés pour calculer cette dernière : le premier, inspiré de données obtenues sur Luzerne, est insatisfaisant ; le second, plus simple, a des paramètres déterminés et calés à partir des tendances respectives de l'état hydrique du sol, de l'indice foliaire et de la transpiration quotidienne de la culture durant la phase végétative active. Appliqué à l'échelle horaire pour quelques journées particulières le modèle alors établi donne des valeurs calculées de R_c reflétant bien le contraste des situations hydrique du sol, du développement aérien et de la demande climatique.

Avertissement :

Cette note consiste en la description de la mise au point de la subroutine " STOMATE " d'un modèle de bilan hydrique détaillé dans un précédent mémoire de DEA intitulé " Essai de modélisation du bilan hydrique d'une parcelle de Blé d'Hiver en fonction des conditions météorologiques locales , des caractéristiques du couvert et du sol " . Pour cette raison le détail du fonctionnement global du modèle n'est pas repris .

Enfin , faute de moyens informatiques adéquats , cette mise au point n'a pu être réalisée qu'avec l'aide d'un micro-ordinateur CASIO FX 702 P ce qui enlevait toute possibilité de discuter la mise au point du sous-programme au niveau précis du calcul horaire de ETR du couvert .

Antérieurement, nous avons proposé un modèle de bilan hydrique pour une parcelle de Blé d'Hiver, du semis à la récolte. Dans celui-ci il s'agissait entre autres de simuler à l'échelle horaire, la régulation des transferts d'eau entre d'une part les surfaces des feuilles et du sol, et d'autre part, un niveau de référence au-dessus du couvert : ce niveau est celui où sont reconstitués, à partir des relevés météorologiques quotidiens, les valeurs horaires des différents facteurs physiques qui définissent la demande évaporatrice à laquelle répond la culture en fonction de la disponibilité de l'eau, quantifiée par des résistances à la perte de cette eau.

Le bilan hydrique porte sur toute la période de culture, c'est à dire qu'il s'accomplit sur une parcelle tout d'abord nue (où l'évaporation est prédominante) puis progressivement recouverte de végétation (où la transpiration devient prédominante); étant donné la grande différence entre les mécanismes mis en jeu dans la régulation des transferts d'eau à partir de la surface du sol où à partir d'un végétal, il est apparu nécessaire d'envisager séparément le calcul de l'évaporation à partir du sol et de l'évapotranspiration à partir de l'ensemble de la surface foliaire en résolvant l'équation du bilan d'énergie au niveau de chacune de ces surfaces; ETR (EvapoTranspiration Réelle) globale de la culture est donc la somme de 2 termes :

$$ETR_{global} = ETR_{feuillage} + ETR_{sol} \quad (1)$$

Ces deux termes sont calculés d'une part en définissant au niveau de référence une demande évaporative pour chacune des surfaces, puis, d'autre part, en quantifiant le frein à la satisfaction de cette demande pour chaque surface. Avec le développement du feuillage se produit une diminution de la demande évaporatrice au sol (essentiellement du fait de l'interception accrue du rayonnement par les feuilles) et un accroissement du frein à sa satisfaction (les strates foliaires constitue un système poreux s'opposant à la diffusion de la vapeur d'eau); pour ces raisons, l'évaporation à partir du sol devient négligeable dans le calcul de ETR_{global} pour un indice foliaire dépassant 2.5. L'essai de modélisation qui suit se situe dans ce cas particulier où LAI (Leaf Area Index) est supérieur à 2.5, c'est à dire où nous ne considérons que la régulation liée au couvert végétal : dans le temps, cette situation concerne la période des mois de Avril à Juillet, lorsque les quantités d'eau perdues quotidiennement par la culture sont les plus importantes (figures 1a et 1b).

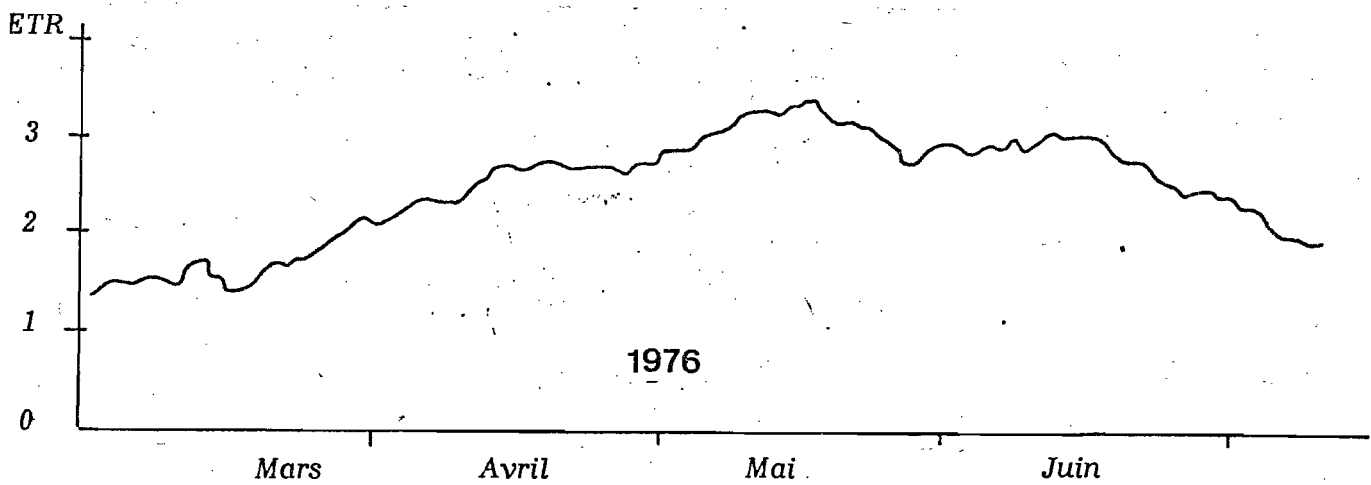
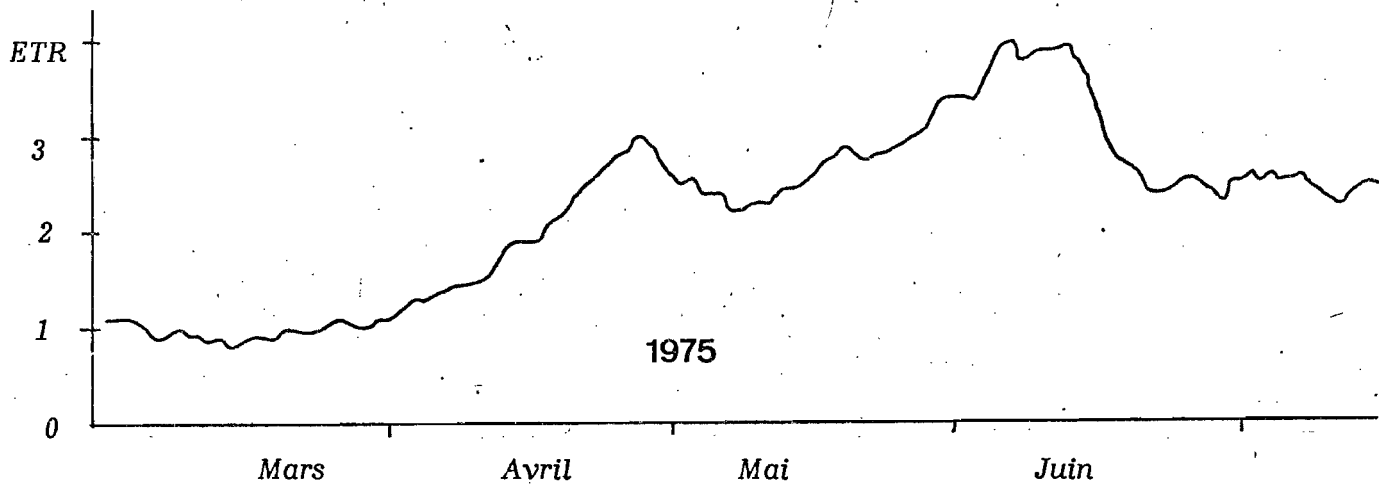


figure 1 : Evolution de ETR journalier (mm) pendant la période végétative du blé , calculée en moyenne glissante sur 20 jours consécutifs - (d'après KATERJI , 1977)

A. DEFINITION DE LA RESISTANCE GLOBALE DU COUVERT LIMITES ACTUELLES DE MODELISATION .

Dans le modèle antérieurement décrit , la régulation du couvert est envisagée selon un schéma à deux résistances en série quantifiant l'une le frein à la diffusion de la vapeur au travers des stomates , l'autre le frein à la diffusion à l'extérieur des feuilles au sein du couvert . Pour simuler l'évolution horaire de ces deux termes , il est nécessaire de disposer de valeurs expérimentales afin de valider les valeurs calculées . A ce sujet , la bibliographie est encore inexistante pour deux raisons :

1°) D'une part parce que dans les études de la régulation du couvert , le schéma généralement adopté est celui de MONTEITH (MONTEITH.1964) : le couvert est assimilé à une surface évaporante avec une résistance unique qui intègre tous les aspects de la régulation du couvert ; cette résistance est quantifiée de façon indirecte à partir de mesures de ETR et de profils de température et d'humidité de l'air qui permettent d'extrapoler le déficit de saturation de l'air au niveau D de la surface évaporante fictive :

$$R_c = \rho C \frac{DPV(D)}{\lambda ETR} \quad (2) \quad (\text{MONTEITH, 1965})$$

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau

ρC : chaleur spécifique de l'air

$DPV(D)$: déficit de saturation de l'air au niveau D selon un profil logarithmique

R_c : résistance du couvert selon MONTEITH

ETR : évapotranspiration mesurée au dessus du couvert

La comparaison de valeurs de R_c ainsi calculées , à des mesures simultanées de résistances stomatiques permet aux auteurs de conclure à une similitude de variation entre ces deux termes dans des conditions définies d'humidité du sol et de développement de la surface foliaire ; l'influence de ces deux derniers facteurs n'est discutée que qualitativement . MONTEITH parvient ainsi à proposer , pour une culture d'Orge , une relation empirique entre sa résistance globale du couvert et la résistance stomatique mesurée sur la 1^{ère} feuille au haut du couvert , pour un LAI compris entre 6 et 10 :

$$r_s = 1.11 + 0.87 R_c \quad (3)$$

r_s : résistance stomatique de la 1^{ère} feuille ($s.cm^{-1}$)

Une telle relation permettrait de calculer une résistance du couvert à partir de la simulation de la résistance stomatique de la 1^{ère} feuille dans les limites définies de LAI ; comme toutes les relations empiriques , elle n'est valable que pour le type de couvert sur lequel elle a été établie . D'une façon générale , l'approche de MONTEITH

intègre tous les phénomènes de régulation en un seul terme : s'il est certain que la régulation stomatique représente une part importante de ceux-ci , du moins dans le cas d'un couvert suffisamment développé (JOHNS et al .1983) , rien ne permet d'affirmer que celle-ci soit toujours la même par rapport à l'autre aspect qui concerne le trajet de la vapeur d'eau déjà transpirée au sein du couvert : cette étape dépend du profil de diffusivité dans le couvert , lié à la vitesse du vent et à l'importance de l'instabilité thermique lorsque les températures de surface sont trop élevées . A partir de ceci , l'établissement d'une formule empirique entre la résistance du couvert et la résistance stomatique d'une feuille ou la moyenne harmonique des résistances stomatiques des différentes strates , ne peut conduire à son application que dans les limites expérimentales trop contraignantes pour l'échelle horaire de calcul .

L'avantage du modèle proposé par PERRIER (PERRIER .1975) est que celui-ci ajoute au terme stomatique (R_s) un terme de "structure" (R_o) complémentaire : derrière celui-ci , on peut intégrer tous les aspects de la diffusivité au sein du couvert, fonction et de son architecture et du climat . Dès lors il semble possible de déterminer des valeurs de la résistance du couvert au cours des situations contrastées qui se succèdent pendant la période de culture , en envisageant d'une part une réponse stomatique qui est liée à la physiologie des feuilles - et au sujet de laquelle des relations empiriques faisant intervenir des facteurs climatiques et l'état interne de la plante ont été établies - et d'autre part une réponse liée à la structure du couvert dont la signification est détaillée plus loin .

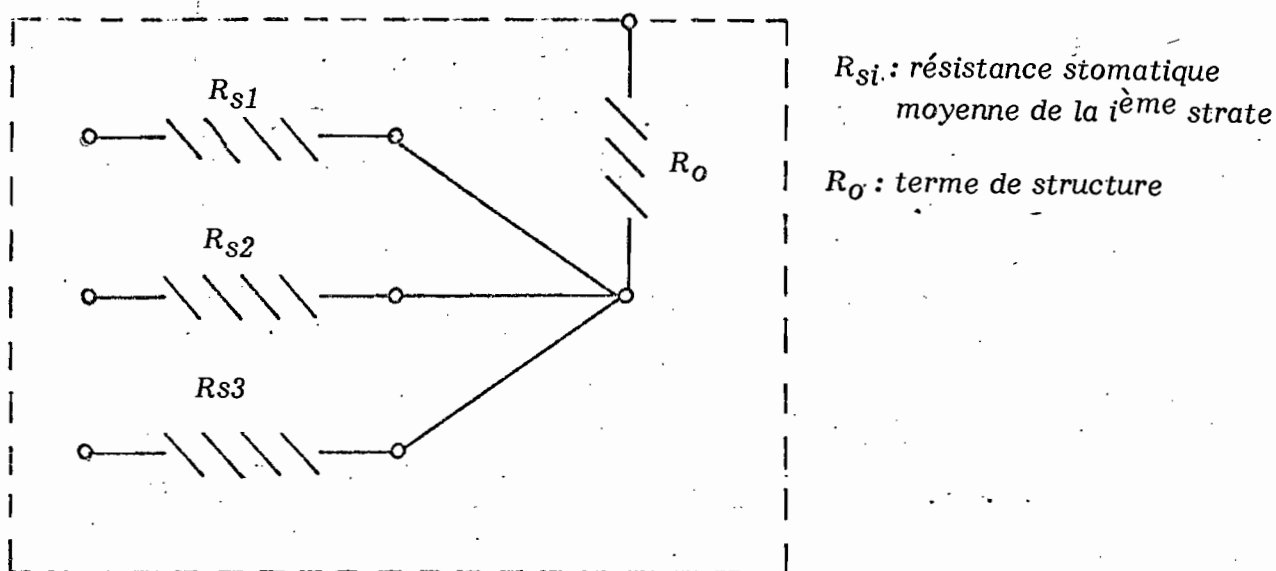
2°) A ma connaissance , aucune mesure n'a été pratiquée de façon conjointe pour les valeurs de R_o et R_s telle qu'elle nous intéresse , c'est à dire à l'échelle horaire . PERRIER (1976) propose des valeurs de R_o pour le Blé , mais elles ne sont fonctions que des différents stades de croissance et de conditions climatiques définies pas assez précisément pour une caractérisation horaire du climat . (cf tableau I)

Tableau I : Evolution de R_o pour différents stades de croissance du Blé et conditions climatiques . (PERRIER , 1976)

Valeur moyenne de R_o s.m ⁻¹	Blé 0.2m	Blé 0.4m	Blé 0.6m
Conditions de faible demande climatique	0	6	10
Conditions normales	5	10	20

Le modèle à deux résistances $R_C = R_O + R_S$ a été étudié en définissant le terme stomatique R_S comme la moyenne harmonique des résistances stomatiques moyennes des différentes strates du couvert se lon le schéma suivant :

figure 2 : Analogie électrique du terme stomatique et du terme de structure définis par PERRIER .



Ce schéma traduit une étape d'interprétation des échanges, intermédiaire entre l'empirisme de MONTEITH et la véritable analogie du couvert selon la loi d'OHM, représentée par la figure (3). A la différence de la figure (2), celle-ci répartit la diffusivité en un profil qui interagit avec le profil de résistance stomatique. La formulation analytique selon la figure (3) s'écrit :

$$R_C = \frac{1}{\bar{h}_1} \left(\frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \left(\frac{1}{R_{s2}} + \left(\frac{1}{R_{s3} + \frac{1}{\bar{h}_3}} \right)^{-1} \right)^{-1}} \right)^{-1} \quad (4)$$

ceci ne peut se réduire sous une forme $R_C = R_O + R_S$.

Rmq : pour être rigoureux, le détail du schéma de résistances du couvert devrait faire apparaître les coefficients d'échange sur les faces supérieures et inférieures des feuilles et les valeurs respectives des résistances stomatiques .

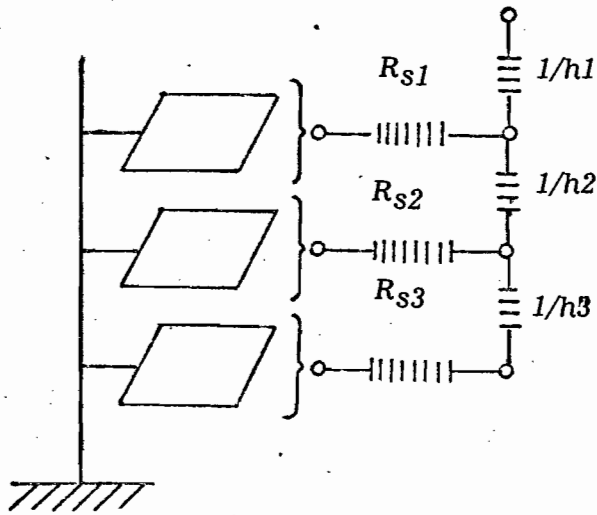
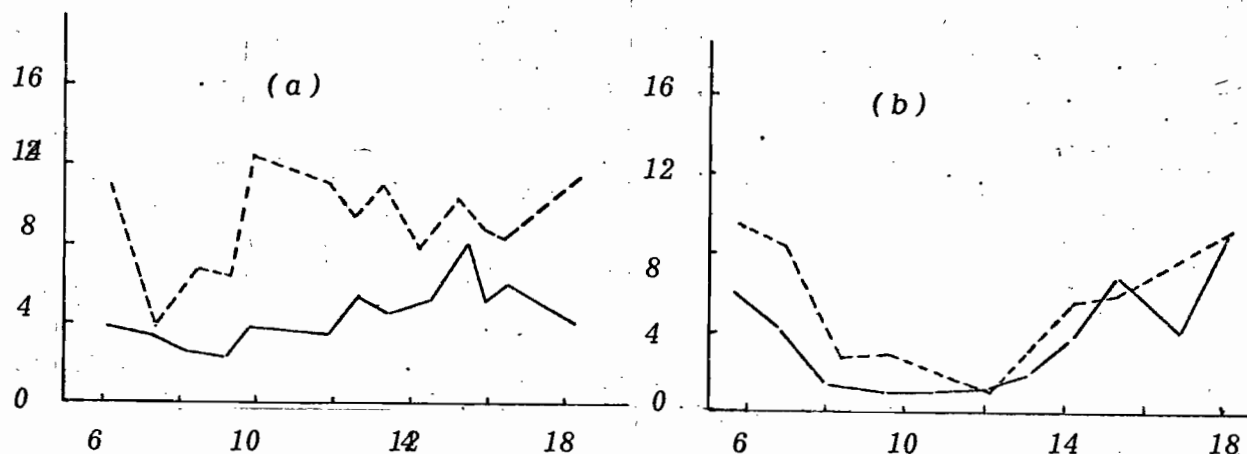


figure 3 : Analogie électrique de la régulation des flux de vapeur d'eau dans le couvert divisé en trois strates

R_{si} : résistance stomatique moyenne de la $i^{\text{ème}}$ strate
 $1/h_i$: coefficient d'échange dans la strate i

La représentation rigoureusement analytique du couvert n'est pas une fin en soi, pourvu que la simplification du schéma préserve les interactions susceptibles d'être importantes à notre échelle temporelle de calcul. A ce titre, des mesures au champ de la cinétique diurne de l'ouverture stomatique de chacune des deux strates d'un couvert de Maïs, ont montré (SHAWCROFT, 1970) que celles-ci évoluaient différemment selon la profondeur dans le couvert, cette différence s'accroissant avec l'état de stress hydrique de la culture (figures 4a et 4b). Ceci permet de penser que à valeur égale du terme stomatique R_s défini antérieurement, le frein à l'évaporation résultant de la structure du couvert sera plus ou moins important pour un stade de développement et une demande climatique comparable : en effet, si on considère un même profil de diffusivité au sein du couvert, ce pourra être la strate inférieure la plus disposée à transpirer avec $R_{s \text{ inf}}$ la plus faible, mais alors l'essentiel de la vapeur devra diffuser à travers tout le couvert ; à l'opposé, si $R_{s \text{ sup}}$ est la plus faible, le rôle de la diffusivité au sein du couvert devient alors plus réduit. De ceci, il ressort que le terme R_o , étant donné la définition du terme stomatique qu'il vient compléter, ne peut être lié uniquement à l'architecture du couvert et à la façon dont

celle-ci définit un profil microclimatique au sein du couvert : il doit prendre en compte également un " profil d'aptitude à transpirer " des strates foliaires (ou profil de sources de vapeur d'eau) : cette aptitude provient aussi bien de l'environnement microclimatique de chacune des strates, que de la physiologie moyenne de leurs feuilles qui règlera leurs réponses selon le moment de la journée.



figures 4 a et b : Mesures de résistances stomatiques moyennes (s.cm⁻¹) d'un Maïs divisé en deux strates foliaires (SHAWCROFT , 1970)

- 4.a au cours d'une journée de stress hydrique modéré
- 4.b au cours d'une journée de stress hydrique marqué

De façon concrète, des observations sur un couvert de Canne à sucre d'une hauteur de 2m, divisé en 3 strates, ont montré l'importance d'une définition horaire du terme de structure même lorsque le profil stomatique relatif restait constant au cours de la journée ; la comparaison du terme R_s mesuré à la résistance du couvert calculée (figures 5a et 6a) à partir de mesures de ETR et de gradients de température, montre une variation systématique du terme résiduel $R_o = R_c - R_s$, selon l'heure et ceci parallèlement aux variations des gradients de température de surface foliaire au sein du couvert (figures 5b et 6b), alors que le rapport de la résistance stomatique moyenne de chacune des strates à la résistance stomatique globale du couvert (tableau II) restait constant du matin au soir. Ceci permet de penser que l'établissement de gradients thermiques élevés dans le cou-

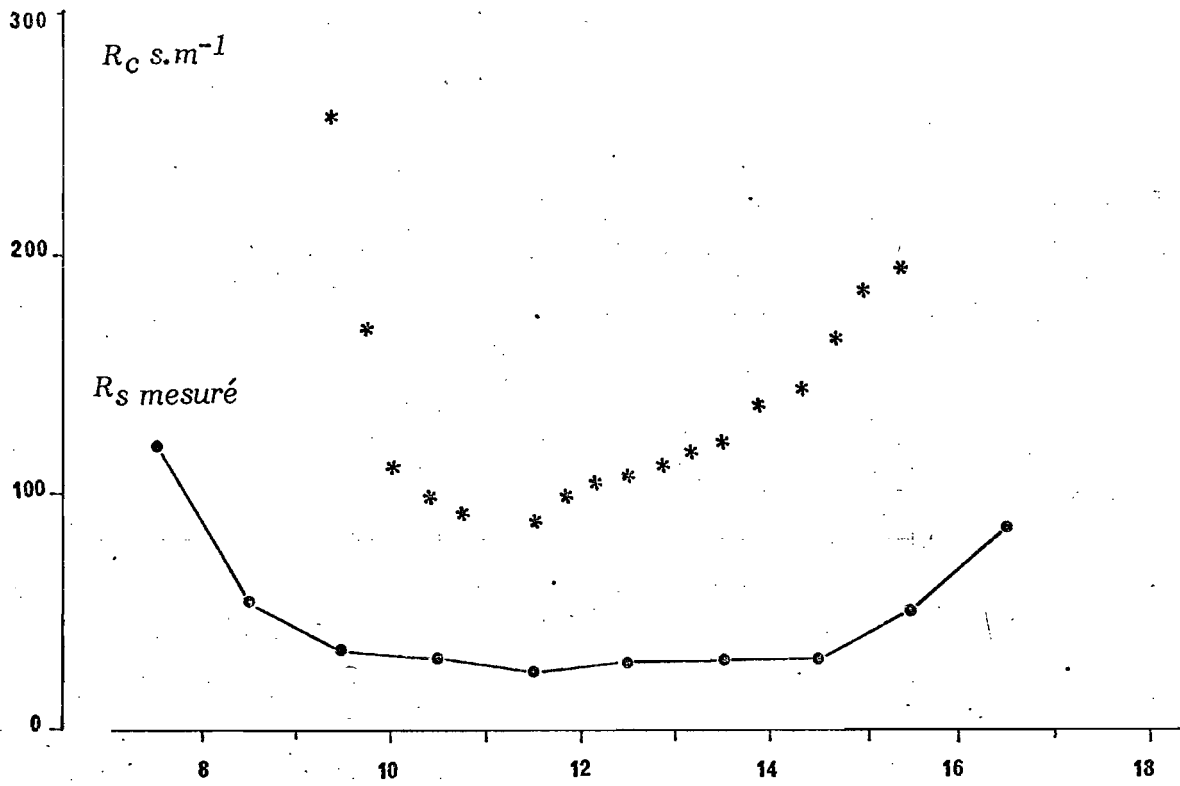
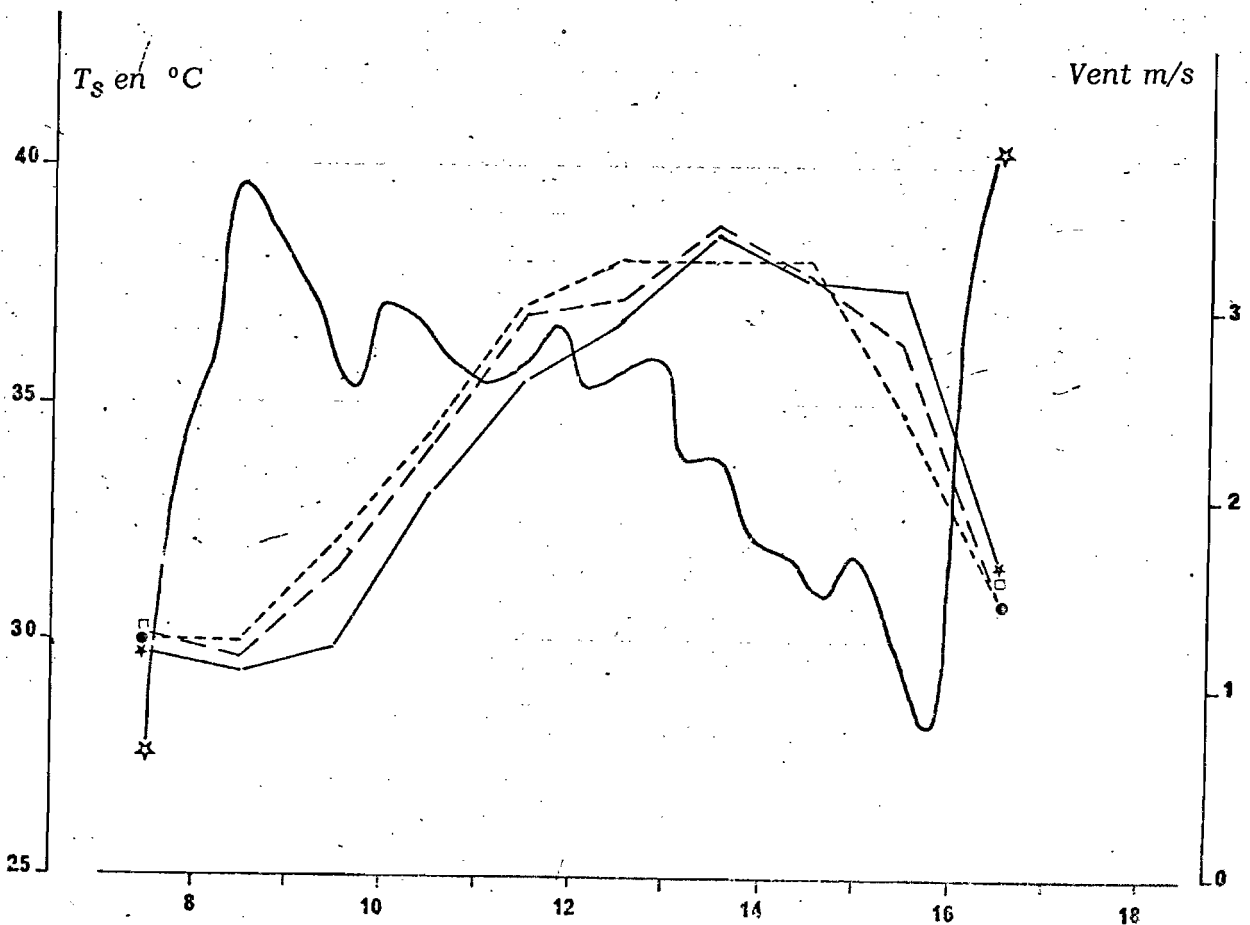
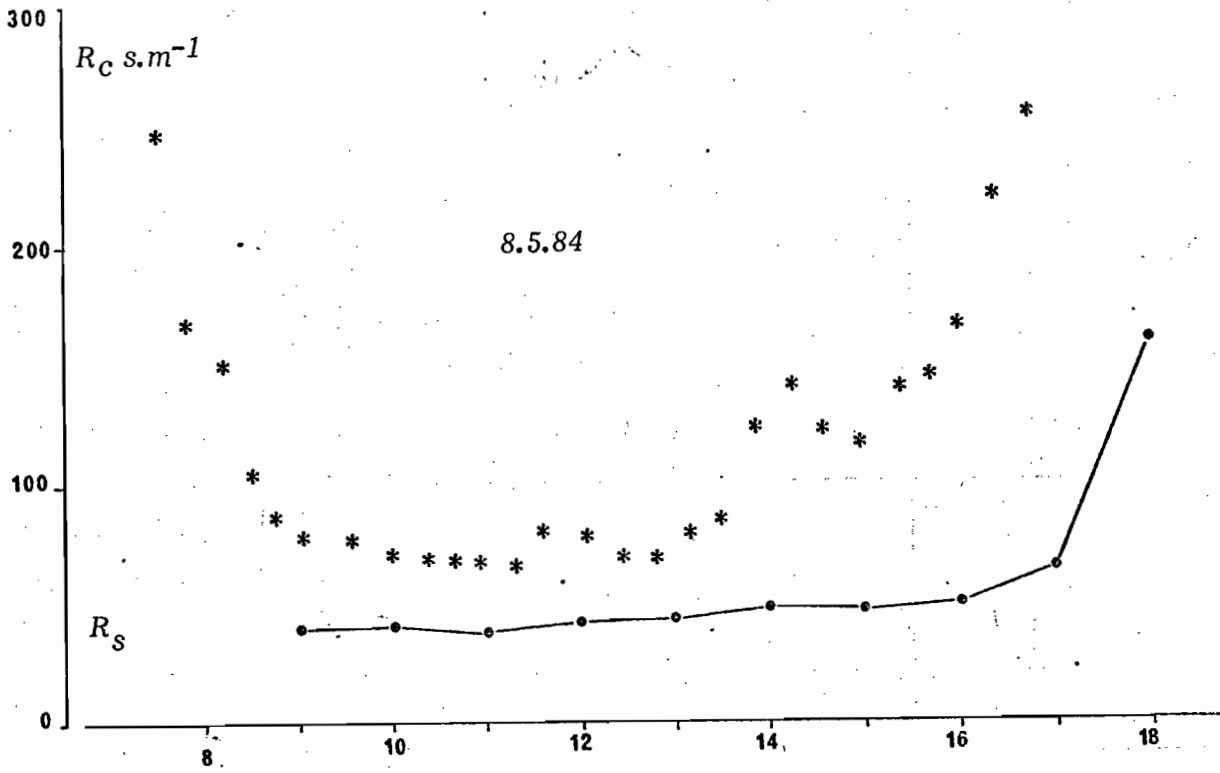


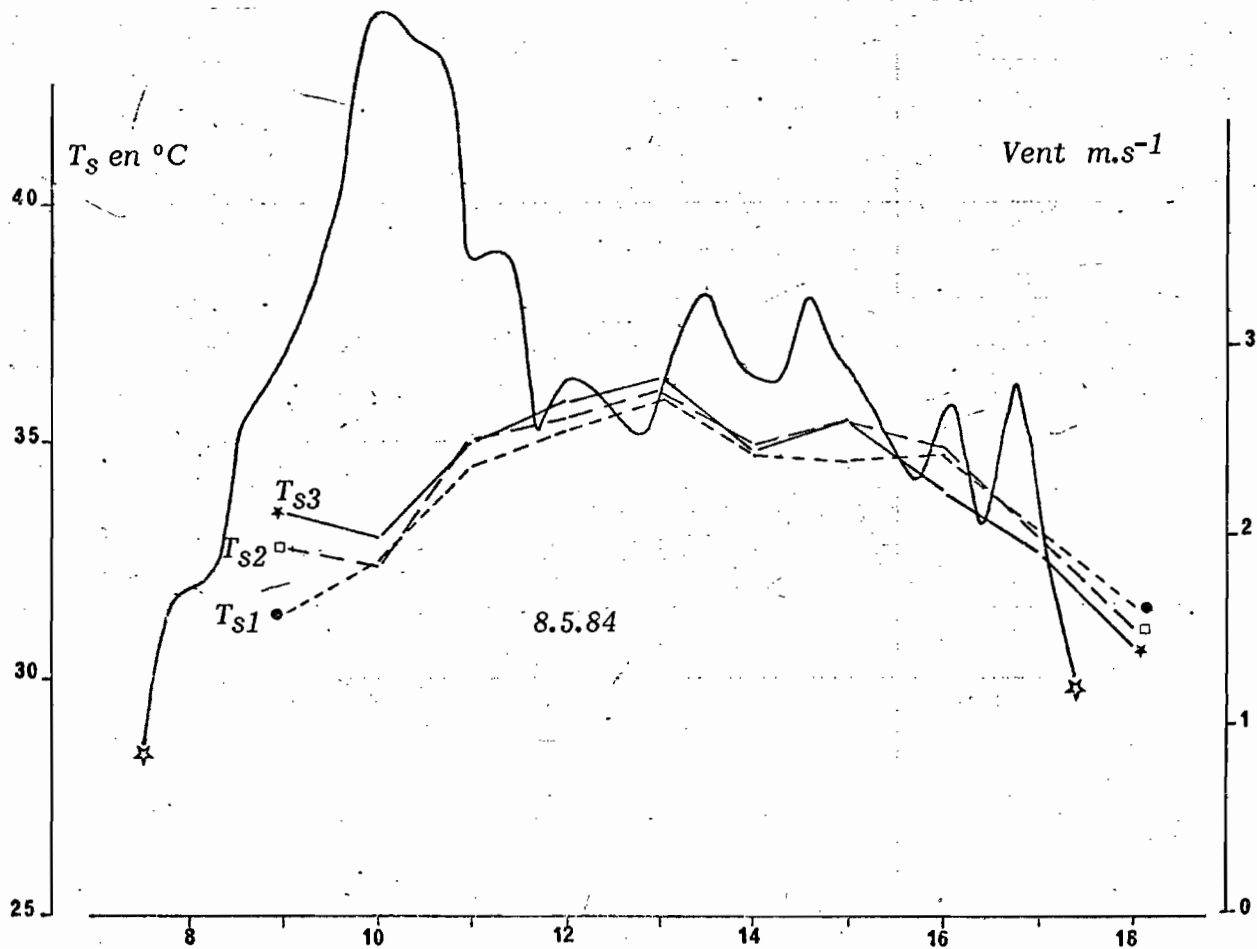
figure 5 a : Comparaison de R_C calculé et de R_S mesuré sur nu couvert de Canne à sucre de deux mètres, le 7.5.84 (MONTENY, ZELLER, non publié)

figure 5 b : Evolution des températures de surface foliaire de chacune des trois strates du couvert (1° *, 2° □, 3° ○) ainsi que de la vitesse du vent mesurée à 4 m.





figures 6a et 6b : mêmes légendes que respectivement 5a et 5b , mais pour la journée du 8 Mai 1984 .



-vert , s'accompagne d'une convection libre accroissant la diffusivité .

Tableau II : Contributions , en % , des différentes (3) strates d'un couvert de Canne à sucre , à la conductivité stomatique globale du couvert selon l'heure .

le 7/5/84 7h30 8h30 9h30 10h30 11h30 12h30 13h30 14h30 15h30 16h30

strate sup	48	37	41	45	42	43	45	48	56	50
strate int	31	39	33	33	32	35	34	36	27	29
strate inf	21	24	26	22	26	22	21	616	17	21

le 8/5/84 9h 10h 11h 12h 13h 14h 15h 16h 17h 18h

strate sup	42	44	39	41	43	45	46	46	54	51
strate int	33	35	37	35	34	34	32	35	30	32
strate inf	25	21	24	24	23	21	22	19	16	17

Ces observations montrent une décroissance de R_0 en début de journée , un minimum aux alentours de 12 h , puis un accroissement en fin de journée ou lors de passages nuageux . Ces variations sont également à interpréter en fonction de la vitesse du vent , indicatrice de l'importance de la convection forcée au sein du couvert ; pour les deux journées décrites , l'évolution du vent coïncide avec celle de R_0 : en particulier le 8.5.1984 , de fortes vitesses le matin entre 9h et 11h anticipent la réduction de R_0 alors que le profil thermique au sein du couvert est encore stable .

Conclusion : L'analyse des étapes du transfert au sein du couvert révèle l'insuffisance du calcul d'un seul terme stomatique pour une simulation de la résistance globale recouvrant des périodes très différentes du développement aérien de la culture . L'ajout d'un terme complémentaire selon le schéma de PERRIER prend en compte les divergences entre le terme stomatique mesuré et la résistance globale calculée ; nos mesures ont montré que celles-ci concernaient l'échelle de temps de la croissance aérienne du couvert , mais aussi l'échelle horaire à laquelle notre modèle de bilan hydrique accomplit la reconstitution du microclimat de la culture ; cependant pour répondre à l'objectif de simulation horaire de la résistance du couvert qui en découle , force est de constater l'absence de données expérimentales permettant de caler le modèle à deux résistances . Pour cette raison , le choix est fait de renoncer tempor-

-airement au schéma à deux résistances pour celui ramenant le couvert à un seul terme de régulation dont on souhaite qu'il prenne en compte les phénomènes essentiels d'interactions entre le couvert et son environnement, tels que les décrit la figure (7).

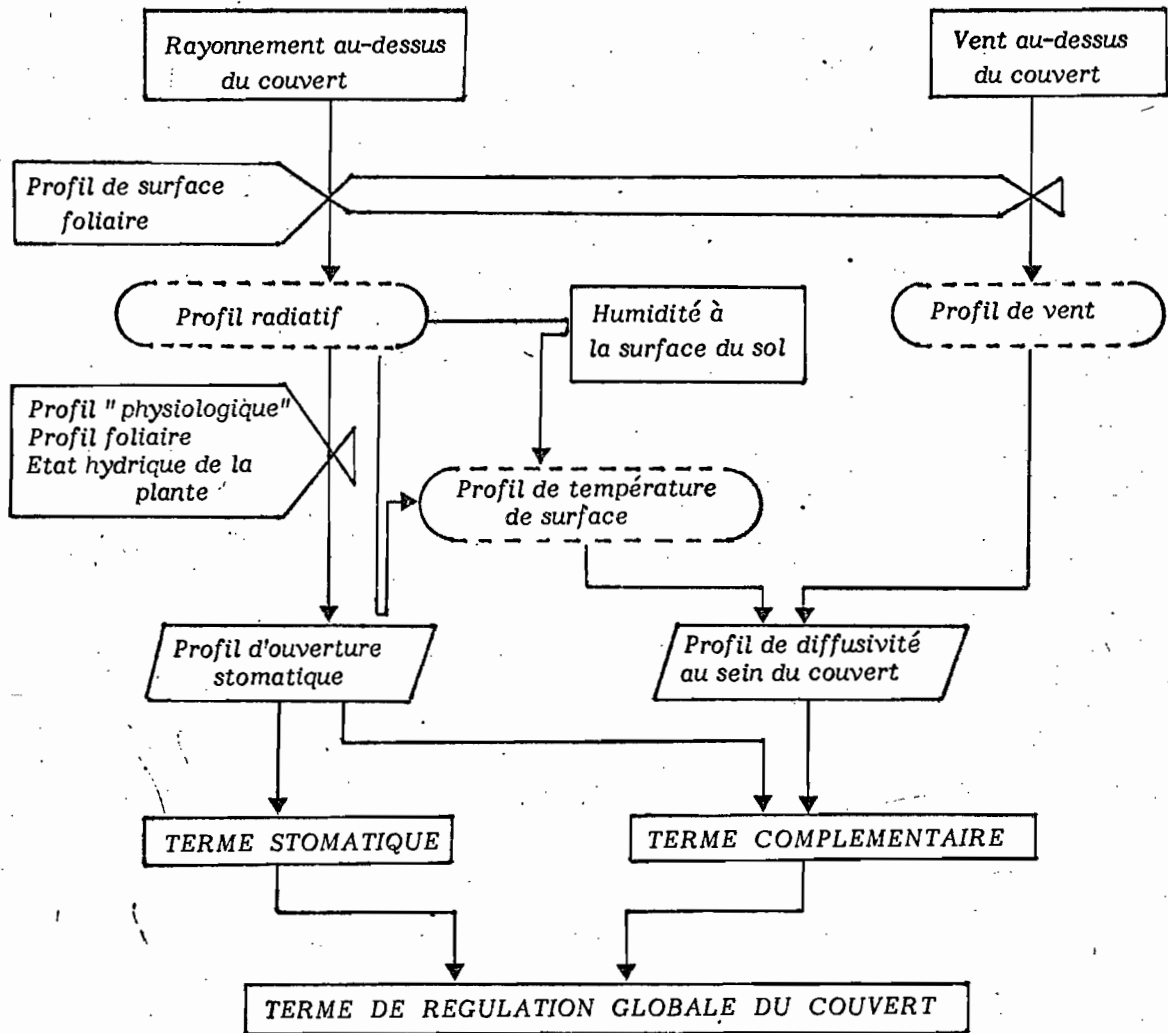
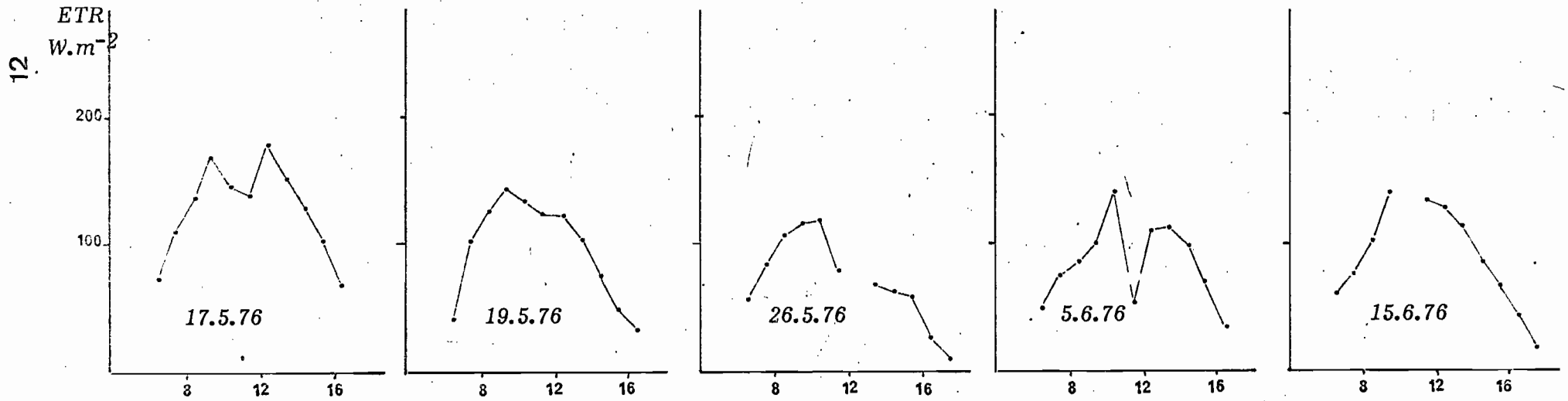
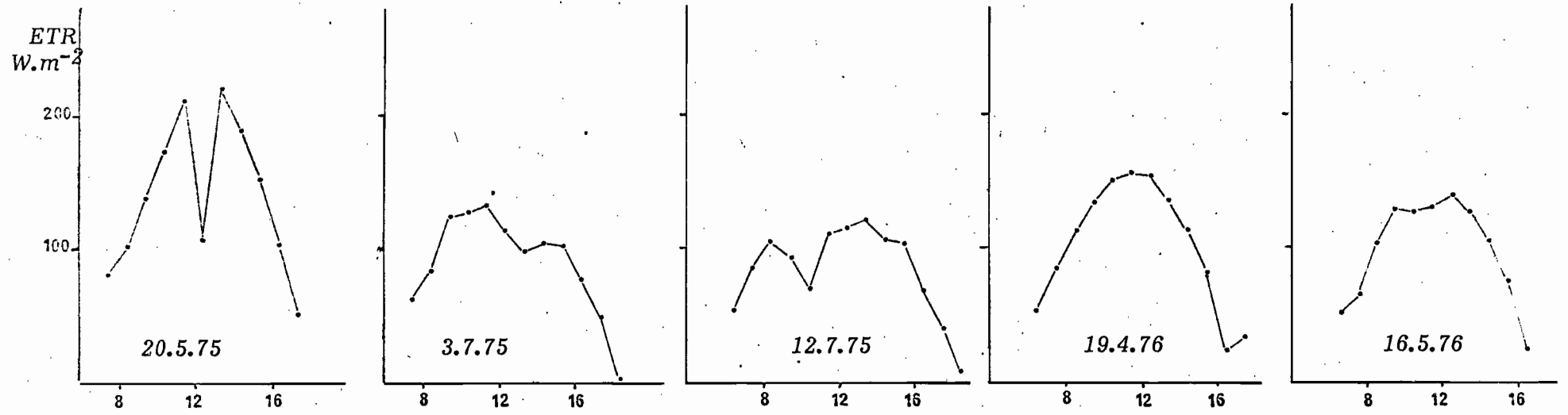
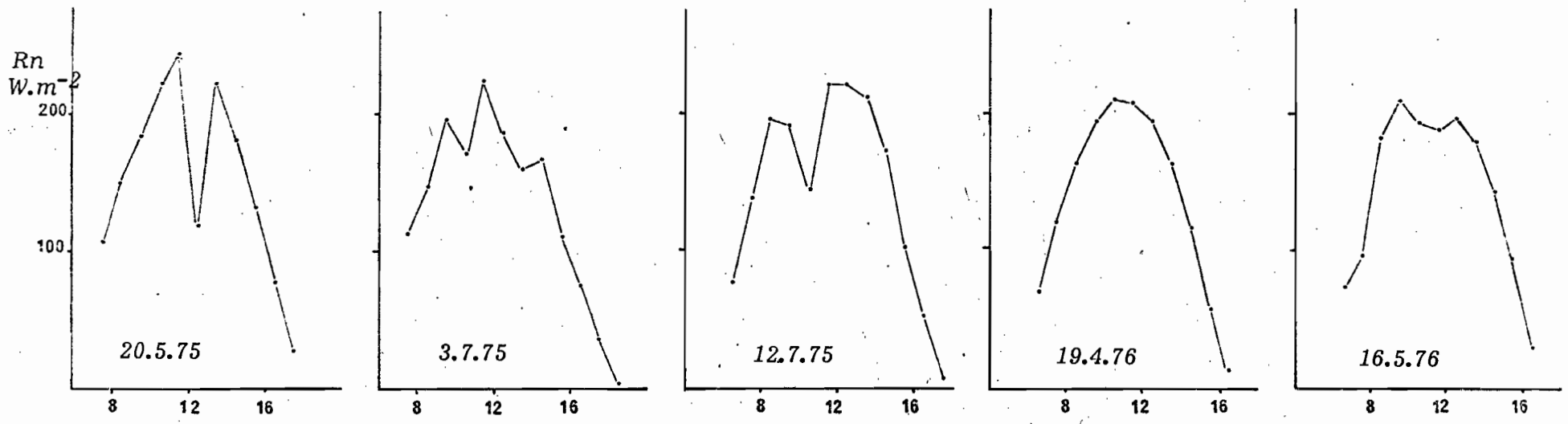


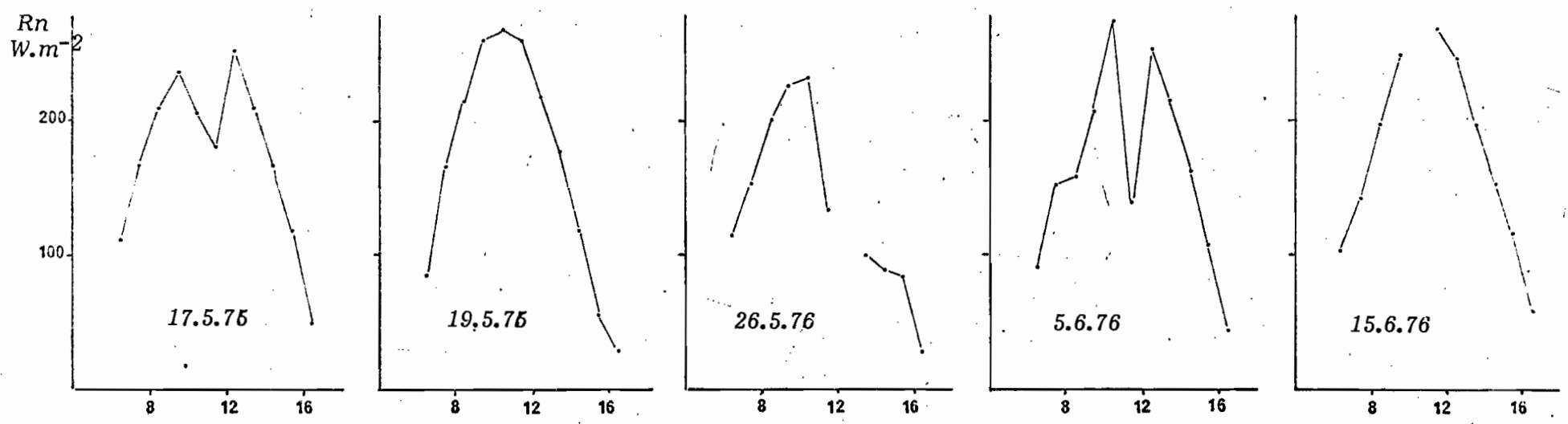
figure 7 : Proposition d'un diagramme décrivant les mécanismes de régulation de l'évaporation au sein du couvert .



- Mesures horaires de ETR du couvert disponibles pour la modélisation -



13



- Mesures de rayonnement net (R_n) disponibles pour la modélisation -

**B. PROPOSITIONS D'INTERPRETATIONS DE QUELQUES VALEURS
EXPERIMENTALES OBTENUES DANS UN CHAMP DE BLE .**

1. Données disponibles — Principe de la modélisation .

* Pour conserver une certaine crédibilité au modèle proposé , il est nécessaire de disposer de valeurs expérimentales permettant d'en discuter les hypothèses . A l'échelle de la parcelle , KATERJI (1977) propose des mesures pratiquées sur un Blé d'Hiver en Région Parisienne , au cours de deux années de déficits hydriques ($\Sigma(ETR-P)$) contrastés (figure 8) .

Des valeurs horaires des quatre termes du bilan d'énergie (R_n , Flux de chaleur sensible ,, Flux de chaleur latente , Flux de conduction dans le sol) mesurées en continu de Mars à Juillet , sont disponibles , ainsi que des observations phénologiques et le suivi de l'indice foliaire . D'autre part , l'évolution des profils hydriques déterminés à la sonde à neutron , ainsi que quelques mesures du potentiel hydrique de la dixième feuille pratiquées vers 13h , recouvrent la période du 15.5.76 au 26.6.76 au cours de laquelle se développe régulièrement le déficit hydrique du sol . Enfin une dizaine de journées , décrites dans le tableau III , fournissent des valeurs horaires de la résistance globale du couvert calculée selon l'équation (5) résultant de la résolution du bilan d'énergie :

$$R_c = r_a * (1 + \frac{P'}{\gamma}) * \left(\frac{ETR}{ETP} - 1 \right) \quad (5)$$

où r_a : résistance aérodynamique au-dessus du couvert
 ETR : valeur mesurée de l'évapotranspiration du couvert
 ETP : valeur calculée de l'évapotranspiration potentielle

Tableau III : Caractéristiques des journées de mesure de R_c .
 (date , LAI , nombre de valeurs horaires de R_c , potentiel moyen du sol calculé à partir du profil hydrique de l'horizon 0-150 cm)

Date	LAI	R_c	Potentiel moyen du sol
20.5.75	8.5	10	0.5 bars
3.7.75	3	11	0.8
12.7.75	3	9	1
19.4.76	2.2	12	0.7
16.5.76	5.5	8	3.4
17.5.76	5.5	8	3.6
19.5.76	5.8	11	4.2
26.5.76	6.2	10	5.3
5.6.76	5.5	11	7.1
15.6.76	3	13	8

La nature de ces données permet d'envisager la prise en compte des phénomènes suivants : la réponse horaire du couvert à la demande climatique externe en fonction des réserves en eau du sol et de la croissance aérienne du couvert (journées du 16.5.76 au

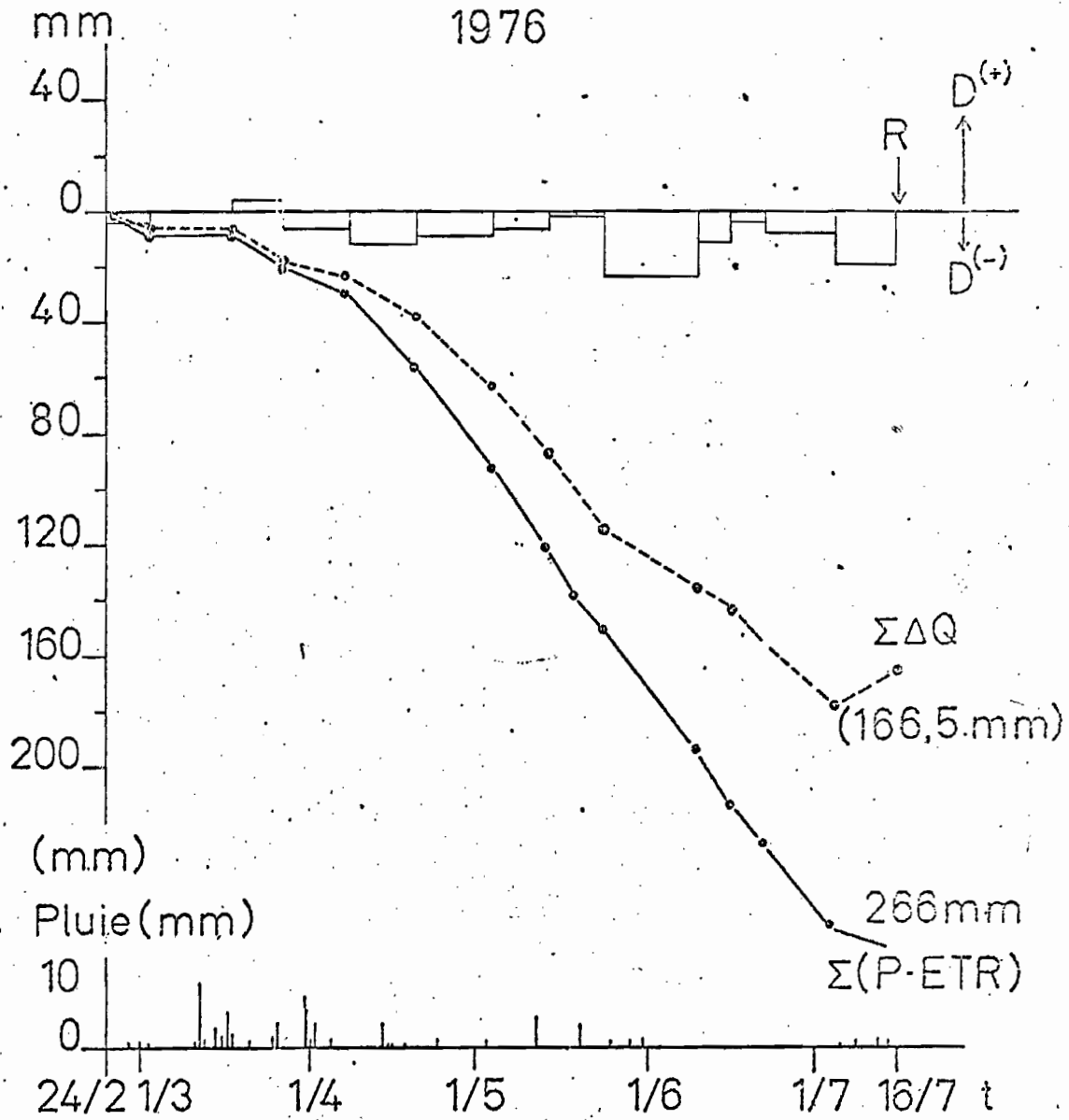
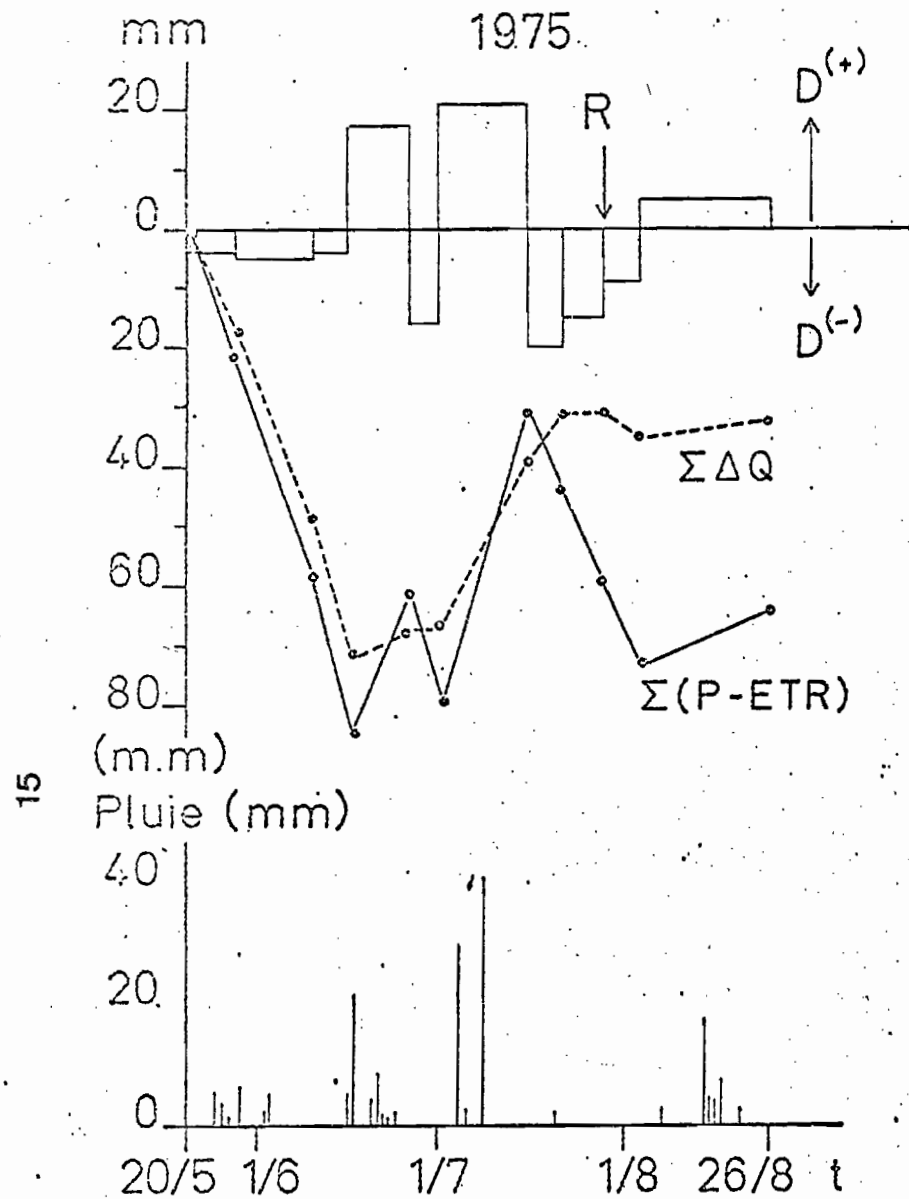
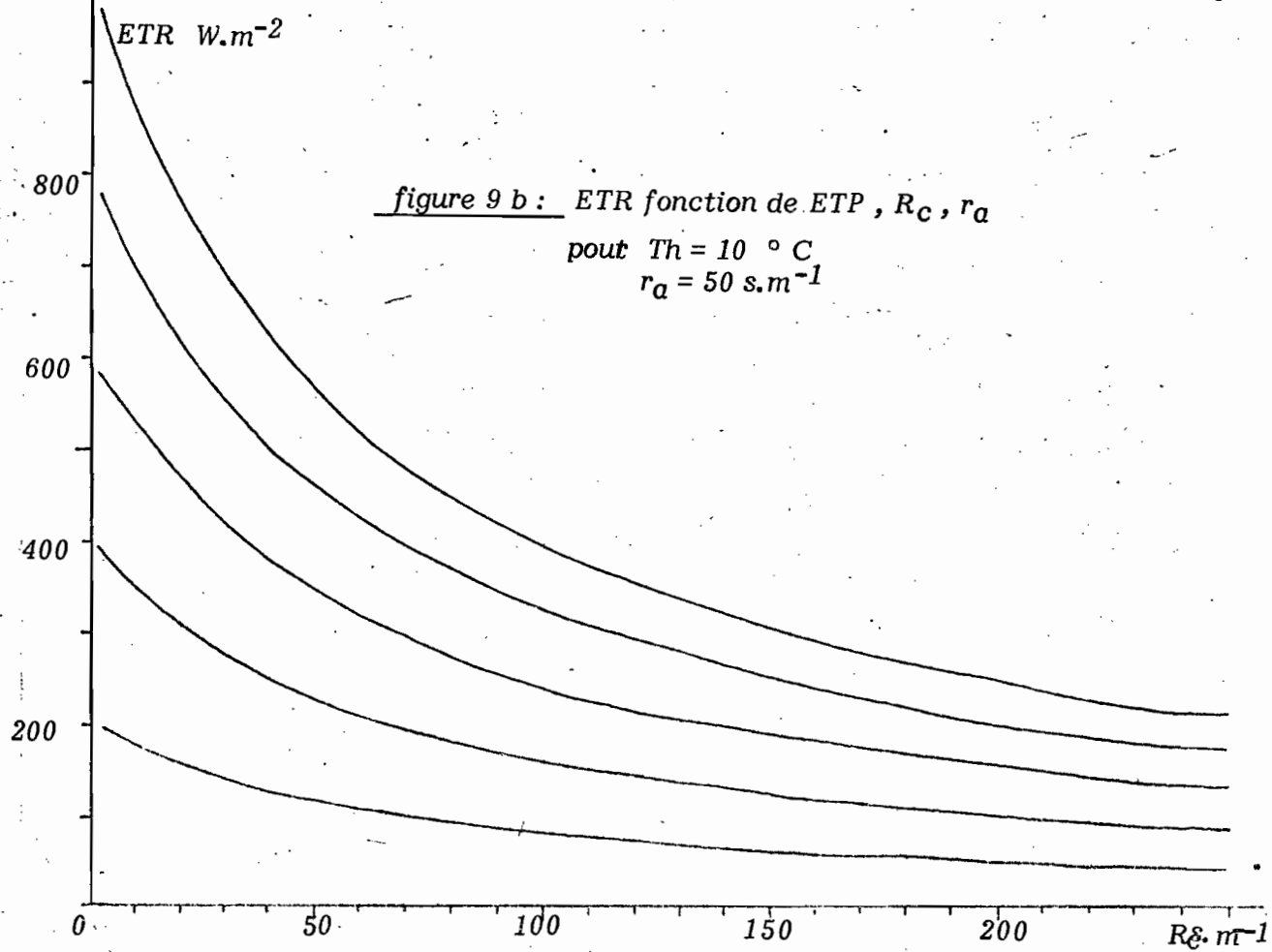
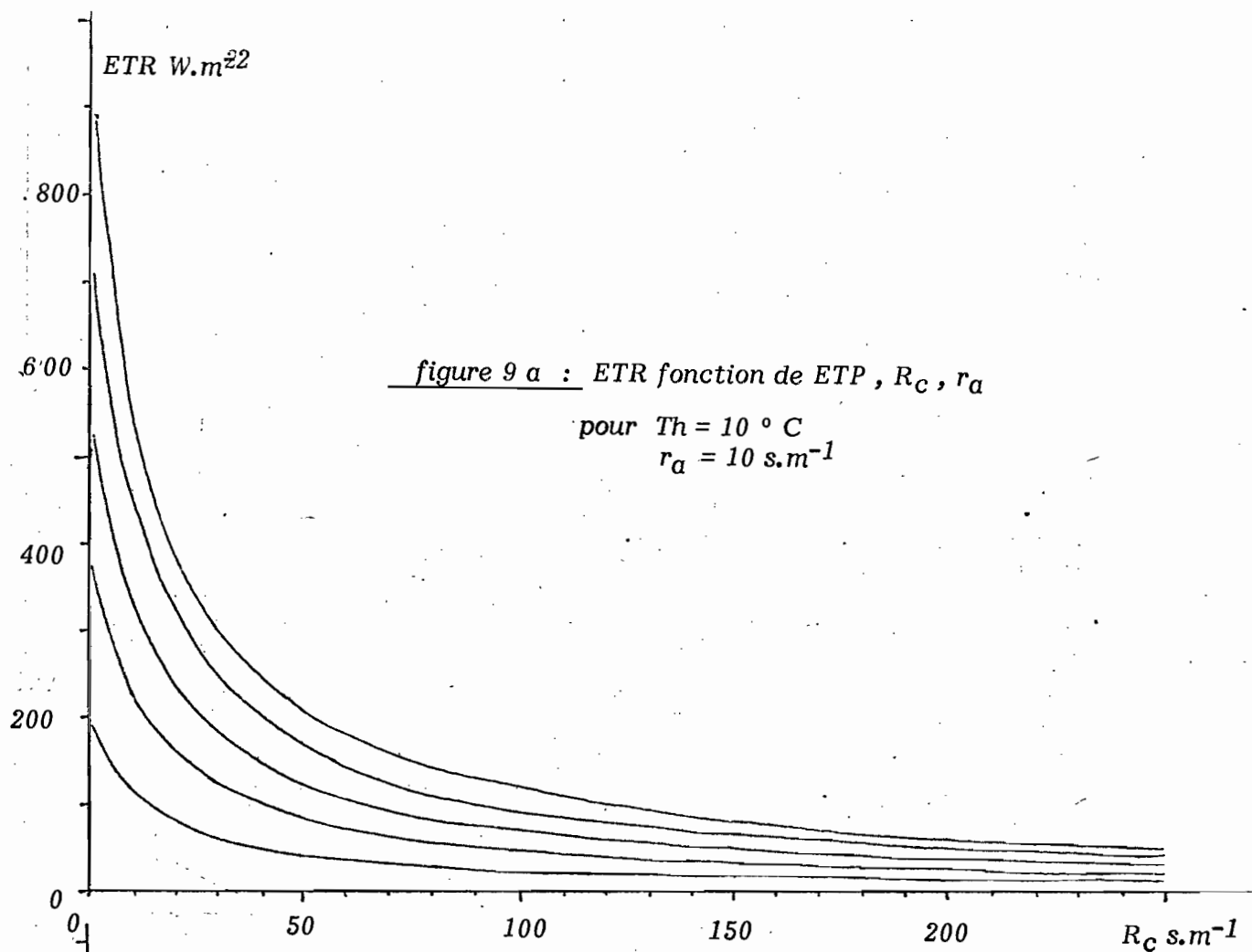


figure 8 : Les différents termes du bilan hydrique sous Blé en 1975 et 1976 (d'après KATERJI . 1977)
 (remontées capillaires , drainage , variation du stock d'eau du sol , précipitations , bilan P-ETR)



15.6.76) ou en fonction du stade de développement de la plante (journées du 20.5.75 au 12.7.75), ou en fonction de la seule croissance aérienne du couvert (journées du 20.5.75 et 19.4.76).

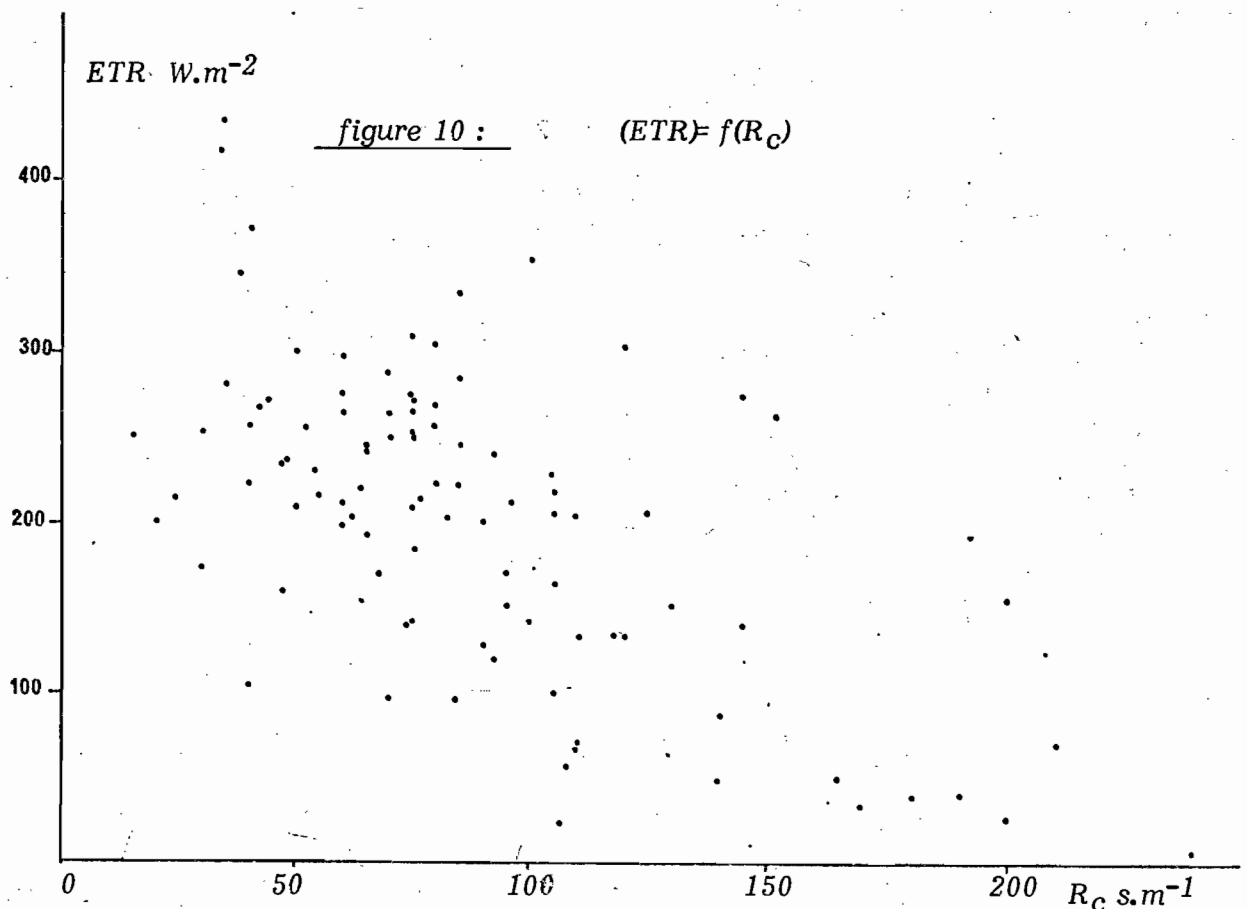
* Pour le calcul de la résistance globale du couvert, le choix est fait de considérer celle-ci comme répondant à l'environnement de façon similaire à un stomate en supposant que dans les limites de LAI posées ($LAI > 2.5$) et dans le cas d'une culture de Blé de forte densité ($600 \text{ pieds} / \text{m}^2$) la part essentielle de la régulation au sein du couvert résulte du transfert à travers les stomates. Étant l'impossibilité actuelle de définir un modèle stomatique mécaniste interprétant les effets de l'environnement, il faut se contenter d'une approche phénoménologique à partir de l'interprétation des valeurs expérimentales. Les principales variables intervenant dans l'ouverture stomatique sont le rayonnement, la teneur en CO_2 de l'air, le déficit hydrique de l'air au niveau de la feuille, la température de surface de la feuille, ainsi que son état hydrique (JARVIS, 1976). A l'instar de modèles stomatiques déjà proposés (SHAWCROFT, 1970 - SLATYER, 1967 - etc..) la régulation photique et la régulation hydrique sont considérées comme les principales fonctions de forçage de l'ouverture stomatique. Enfin, le degré de précision nécessaire dans l'estimation de R_C est précisé à partir des abaques (figure 9) de ETR fonction de ETP, R_C , r_a , tracées selon le calcul numérique (6) :

$$\text{ETR} = \text{ETP} * 1 / (1 + (\gamma / P + \gamma)) * R_C / r_a$$

$$(6) \quad \gamma / P + \gamma = 0.60124 + 0.01704 * Th - 0.00014 * Th^2$$

où Th est la température humide de l'air en degré Celsius

La figure 10 présente les valeurs de R_C mesurées sur le Blé au cours des dix journées et le niveau de ETR correspondant.



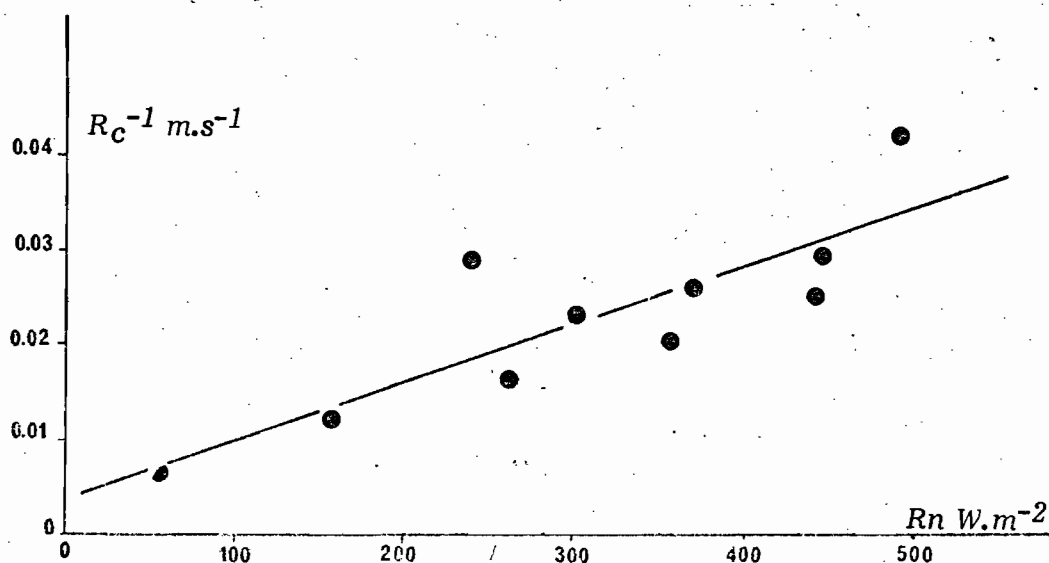
2. Régulation photique .

La constatation par BISCOE (1976) que les réponses relatives de la résistance d'une feuille et de celle du couvert à des variations de rayonnement , et ceci au cours de journées où l'état hydrique du sol est très différent , étaient identiques , permet d'adopter un schéma considérant de façon indépendante la régulation photique et la régulation hydrique au niveau du couvert comme cela a souvent été fait au niveau de la feuille .Le parcours de la bibliographie traitant du comportement des stomates fait apparaître des divergences quant à l'interprétation de la réponse photique de ceux-ci chez le Blé : BISCOE observe une relation non linéaire entre la conductance et le rayonnement , avec un seuil photique d'ouverture stomatique maximale ; DENMEAD (1975) obtient par contre une relation toujours linéaire : le modèle adopte cette seconde optique et fait l'hypothèse que la réponse photique du couvert est la même quelque soit LAI > 2.5 , et quelque soit le stade de développement du couvert . Le rapport du rayonnement net au rayonnement global étant constant pour la majeure partie de la période diurne , l'expression linéaire de la régulation photique est une fonction de R_n , faute de disposer des valeurs de R_g . Les coefficients sont déterminés par une régression sur les valeurs de R_n et R_c observées le 20.5.75 , journée où l'état hydrique du sol est satisfaisant pour la plante ($\Psi_{sol} = 0.5$ bars) et où la cinétique diurne de R_c ne montre aucune hystérésis qu'un stress hydrique aurait pu créer dans l'après-midi . L'expression (7) est obtenue à partir de la figure 11 :

$$\left(R_c \text{ photique} \right) (h)^{-1} = 10^{-4} * \left(37.5 + 1.698 * R_n (h^{-1}) \right) \quad (7)$$

$s.m^{-1}$ $J.cm^{-2}$

figure 11 : Détermination de la régulation photique à partir des valeurs mesurées au cours du 20.5.75 .



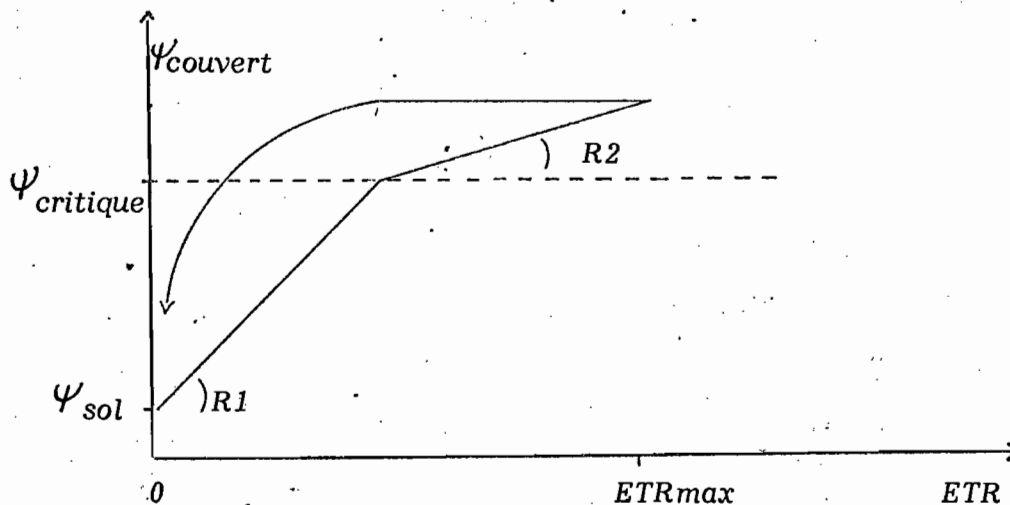


figure 13 : Résumé du modèle de potentiel hydrique du couvert : cinétique diurne de Ψ_{couvert} fonction de ETR_{couvert}

Ψ_{critique} : valeur du potentiel à partir de laquelle , la plante perdant de son eau , le potentiel du couvert s'accroît moins vite ($R1 > R2$) à augmentation égale de ETR .

Ψ_{sol} : valeur du potentiel hydrique du couvert en équilibre avec le sol en période nocturne = indicateur de l'accessibilité de l'eau du sol à la plante

$R1$: résistance au transfert de l'eau dans le système SOL-PLANTE en condition de transpiration réduite : c'est une fonction de l'état hydrique du sol et du développement de la plante .

$R2$: résistance au transfert de l'eau dans le système SOL-PLANTE en condition de forte transpiration , lorsque la plante alimente par l'eau de ses organes le flux transpiré ; ceci se produit lorsque la valeur critique du potentiel du couvert est dépassée .

Cette régression détermine la résistance maximale adoptée pour le couvert, soit 260 s.m^{-1} , ce qui correspond pour un $\text{LAI} = 4$ à une résistance stomatique de 1000 s.m^{-1} environ par unité de surface foliaire. L'application de cette formule pour les différentes journées de mesures montre généralement une bonne concordance en début de matinée, lorsque la plante commence seulement à transpirer (figure 20); cependant une divergence atteignant 30 à 60 s.m^{-1} apparaît pratiquement systématiquement en milieu de journée au moment où les valeurs de ETR sont les plus élevées, ce qui justifie la prise en compte de la régulation hydrique.

3. Régulation hydrique selon un système à réservoir : problèmes de modélisation.

3.a. le potentiel hydrique du couvert :

Dans son modèle de réponse stomatique du couvert, SHAWCROFT (1970) envisage la régulation hydrique à l'échelle de la journée par l'intermédiaire d'une résistance minimale du couvert fonction des réserves en eau du sol; ce schéma aboutit à une sous-estimation systématique de R_c dans l'après-midi et révèle ainsi la nécessité de considérer la régulation hydrique comme le résultat non seulement d'un état hydrique du sol (variable à un pas de temps au moins journalier) mais aussi d'un état hydrique de la plante dont on sait qu'il varie à chaque heure. L'étude du transfert d'eau dans la plante permet de comprendre que l'état hydrique de celle-ci est la résultante à la fois de la disponibilité de l'eau dans le sol, mais aussi de l'importance de la demande évaporatrice instantanée. Le terme privilégié pour déterminer l'état hydrique d'une feuille transpirante est son potentiel foliaire dont BISCOE (1976) estime qu'il est une bonne variable pour décrire la régulation hydrique des stomates. KATERJI (1982, 1983) propose une approche du potentiel hydrique à l'échelle du couvert, en le définissant alors comme la moyenne du potentiel moyen de chacune des strates foliaires, pondéré par ETR provenant de cette strate; il en suit l'évolution à l'échelle horaire en fonction de la transpiration globale du couvert, c'est à dire du flux à travers la plante: cette approche intègre en une courbe l'influence de l'état hydrique du sol tel que la plante peut le définir, et l'aptitude de la plante à transpirer en conditions de faible ou de forte demande extérieure. Le modèle se propose donc de reconstituer cette courbe (figure 13) potentiel hydrique du couvert Ψ_{couvert} fonction de $\text{ETR}_{\text{couvert}}$ (ZELLER, 1983) afin de déterminer à la fin de chaque pas de temps de calcul un état hydrique de la culture qui influencera sa réponse au climat défini pour le pas suivant.

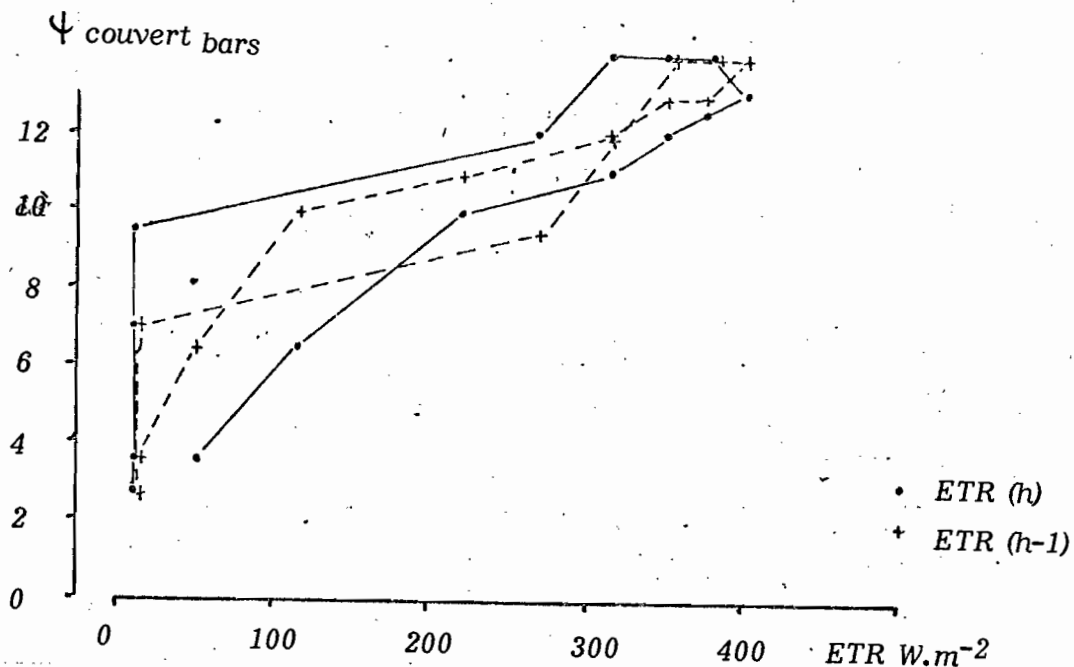
3.b. premier essai de modélisation :

Dans ce premier temps , après avoir testé ; à partir de données obtenues sur un couvert de Luzerne (KATERJI , 1983) le principe du modèle à réservoir , nous allons discuter son application au Blé .

...Luzerne...

KATERJI propose les valeurs horaires du potentiel hydrique du couvert et de ETR au cours d'une journée claire (c'est à dire pour laquelle l'évolution des facteurs climatiques est semblable à celle que reconstitue la subroutine météorologique du modèle général de bilan hydrique) , et dans le cas d'un sol relativement humide . La figure 14a présente la relation $\Psi_{\text{couvert}} = f(ETR(h))$ ainsi que $\Psi_{\text{couvert}} = f(ETR(h-1))$; ceci met en évidence une paramétrisation différente de la relation hydrique si on tient compte du décalage entre le calcul de ETR et celui de Ψ_{couvert} .

figure 14a :



Ainsi , plutôt qu'un modèle défini par les valeurs suivantes des paramètres (d'après KATERJI) : $R1 = 29 \text{ bars.h.mm}^{-1}$, $R2 = 12 \text{ bars.h.mm}^{-1}$, $\Psi_{\text{critique}} = 10 \text{ bars}$, $\Psi_{\text{sol}} = 1 \text{ bars}$, il est plus juste de considérer un modèle avec les paramètres suivants : $R1 = 123 \text{ bars.h.mm}^{-1}$, $R2 = 10 \text{ bars.h.mm}^{-1}$, $\Psi_{\text{critique}} = 8 \text{ bars}$, $\Psi_{\text{sol}} = 1 \text{ bars}$; La figure 14b compare la concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées selon chacun des modèles , mettant en évidence la faible variation des résultats au milieu de la journée , pour une forte variation de R1 .

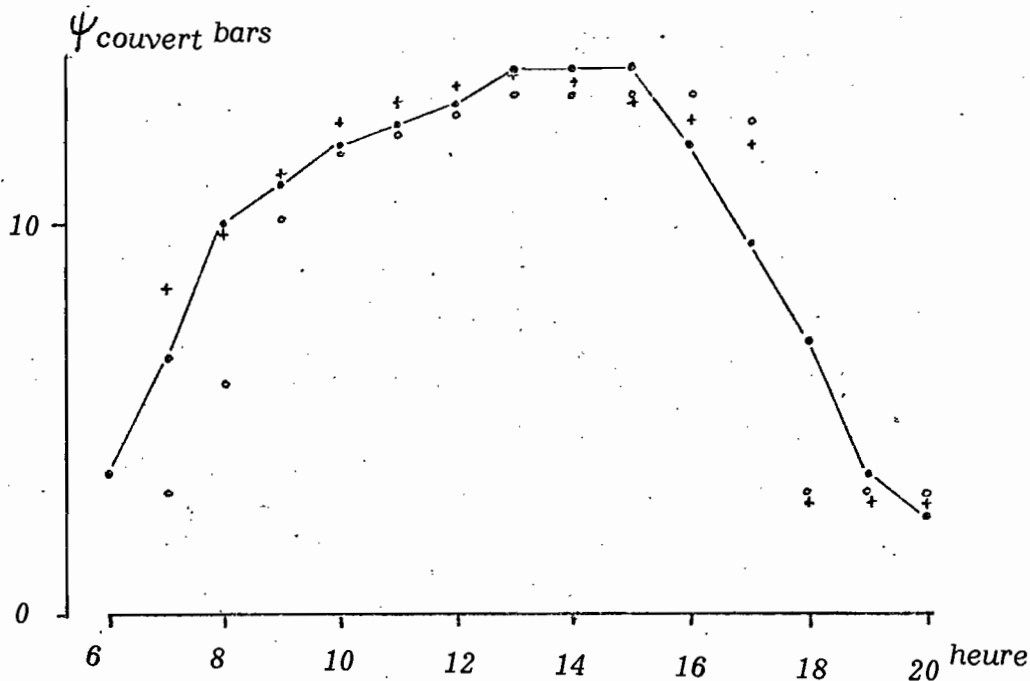


figure 14b : Comparaison des valeurs mesurées / calculées sur Luzerne
 + modèle R1=123, R2=10 o modèle R1 = 29 , R2= 12

...Blé...

A partir de ce qui précède, l'hypothèse est émise d'un fonctionnement identique du couvert de Blé. D'après des observations de BISCOE (1976) sur la huitième feuille, le potentiel critique du couvert-réservoir est estimé à 11 bars; dès lors, les valeurs des deux paramètres R1 et R2 sont calées à partir d'une part des valeurs estimées de Ψ_{sol} et d'autre part à partir des valeurs mesurées de ETR (12h) et le potentiel foliaire mesuré à 13 heures, durant la période du 15.5.76 au 25.5.76; on fait ainsi les suppositions suivantes: les valeurs de R1 et R2 restent constantes durant ces journées, à la fois parce que la phase végétative est inchangée, et parce que le potentiel hydrique moyen du sol reste inférieur à -4 bars (SZEICZ et al, 1969 - VAN BAVEL, 1967, ont observé l'absence de réaction du couvert dans ces limites de Ψ_{sol}). D'autre part, l'hypothèse est acceptée de l'égalité entre le potentiel hydrique de la dixième feuille, tel que KATERJI l'a mesuré, et le potentiel hydrique moyen du couvert, tel qu'il a été défini précédemment; ceci attire cependant des réserves étant donné la différence de cinétique diurne du potentiel foliaire selon les strates du couvert (SHINN et al, 1968). Une fois ce premier calage accompli, la comparaison des valeurs calculées de $\Psi_{couvert}$ (13h) aux valeurs mesurées montre une divergence à partir de la fin de Mai, c'est à dire lorsque la plante franchit le stade EPIAISON. Une nouvelle hypothèse est alors faite selon laquelle le couvert perd alors sa capacité de réservoir progressivement avec la maturation, ce qui se traduit par

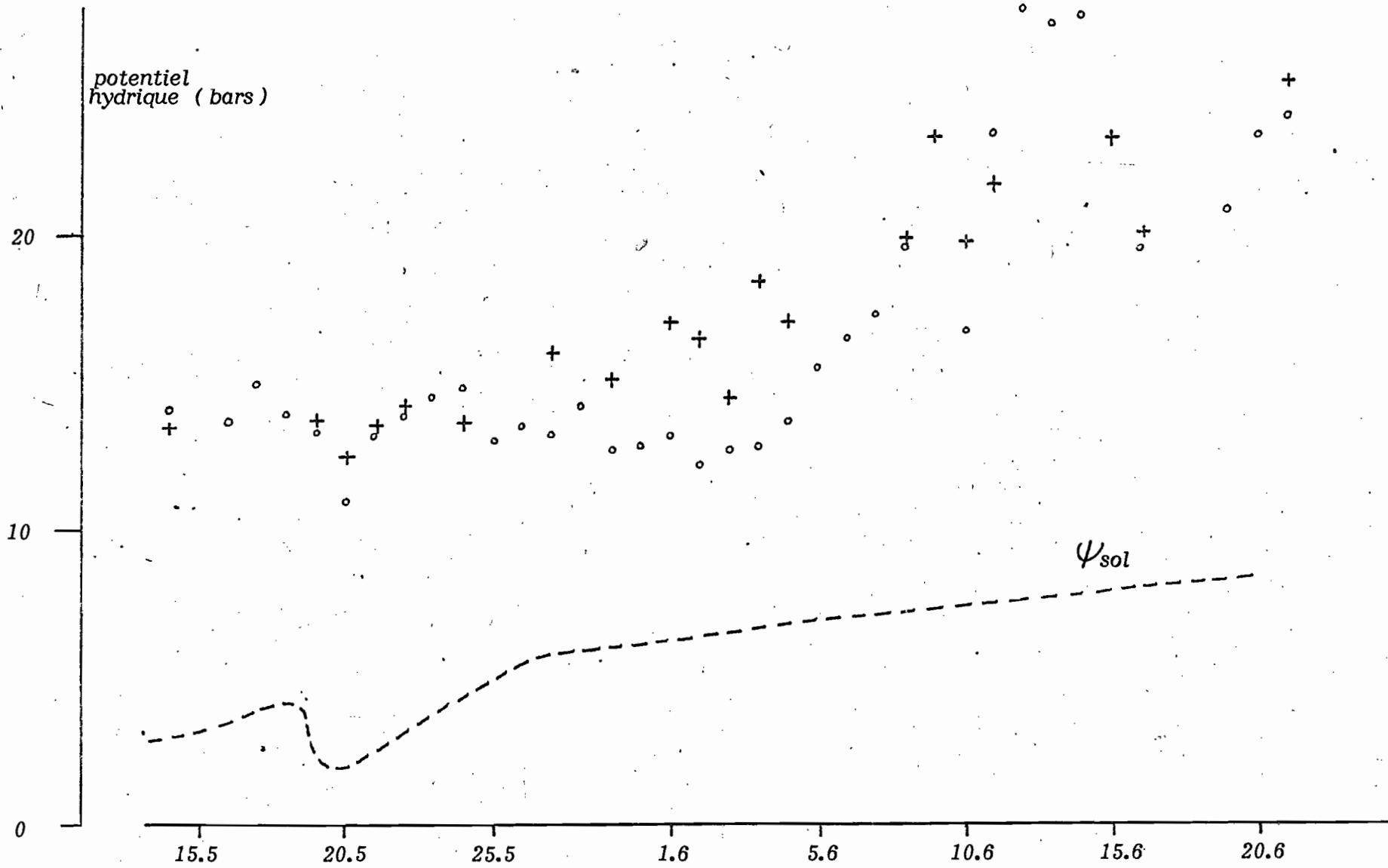


figure 15 : Valeurs calculées du potentiel hydrique du couvert (o) à 13 heures, en 1976, comparées aux valeurs (+) mesurées dans la dixième feuille et estimées dans le sol ;

un accroissement de R_2 qui tend vers R_1 ; un terme correcteur de R_2 est donc estimé à partir de la divergence constatée , et fonction du nombre de jours écoulés depuis l'épiaison :

$$\text{avant épiaison } R_1 = 60 \text{ b.h.mm}^{-1} \text{e.}$$

$$R_2 = 10 \text{ " " " " "}$$

$$\Psi_{\text{critique}} = 11 \text{ bars}$$

$$\text{après épiaison } R_1 = 60 \text{ b.h.mm}^{-1}$$

$$R_2 = 10 * 1.024 * 10^{-4} * x^{2.7}$$

$$\Psi_{\text{critique}} = 11 \text{ bars}$$

où x est le nombre de jours après l'épiaison

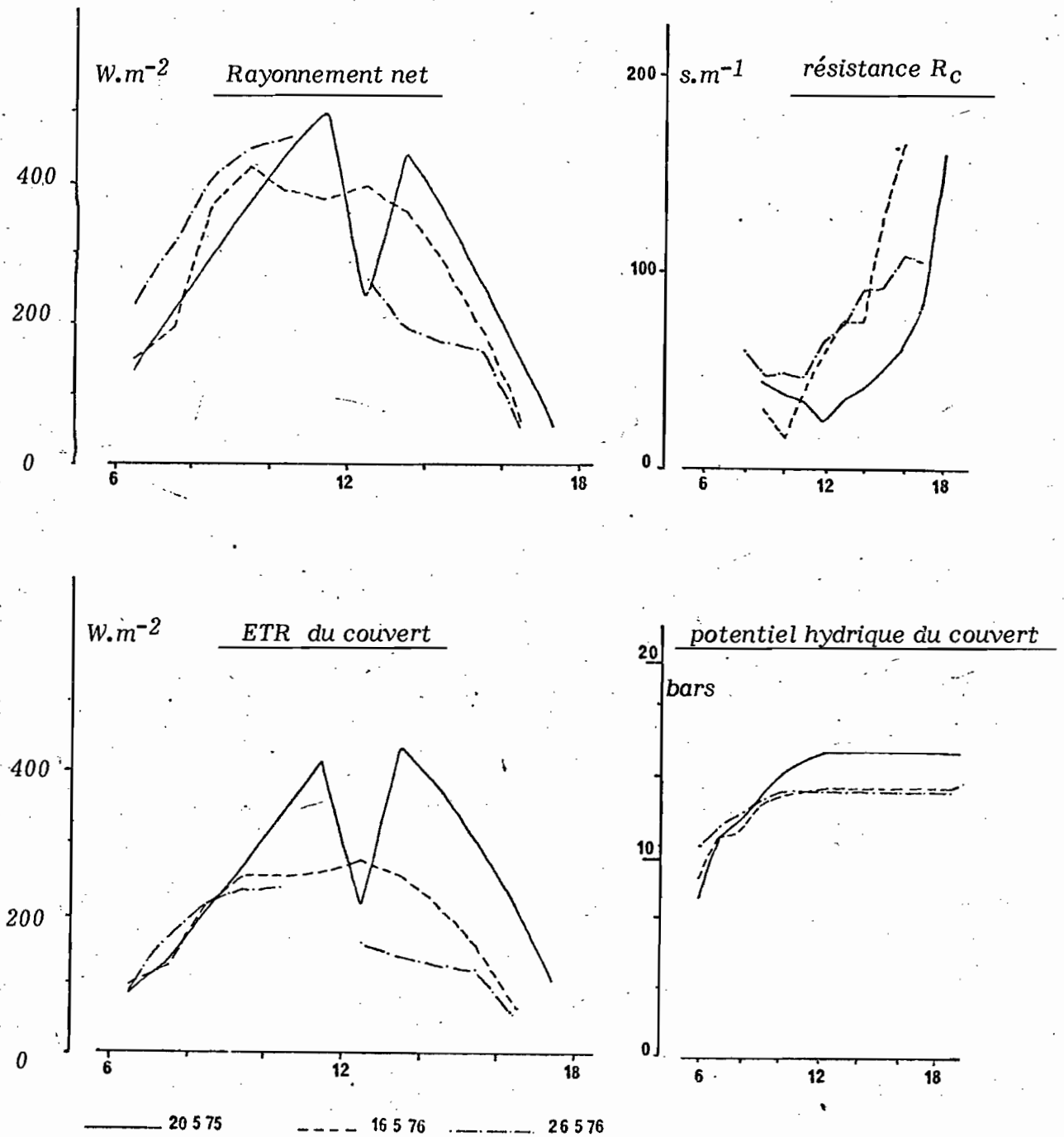
La figure 15 représente les valeurs mesurées et calculées ainsi à 13 heures entre le 14.5.76 et le 21.6.76 .

Le calage à partir d'une valeur horaire unique pour la journée , au cours d'une période de l'année 1976 aboutit alors à un modèle de potentiel qui doit permettre de calculer un coefficient réducteur de l'ouverture stomatique du couvert . Cependant le modèle défini à ce stade conduit à la contradiction suivante lorsque l'on étudie plus finement la cinétique diurne de Ψ_{couvert} : la comparaison de R_n , ETR pour les trois journées de la figure 16 montre que malgré une ETR quasiment double de celles des 16 et 26.5.76 , la journée du 20.5.75 ne s'accompagne pas de régulation stomatique . Etant donné les valeurs de R_n pour les trois journées , ce facteur ne peut expliquer à lui seul l'accroissement précoce de R_c le 16.5.76 et 26.5.76 : celui-ci résulte donc d'une régulation hydrique que les valeurs calculées de Ψ_{couvert} pour les trois journées respectives , n'expliquent absolument pas puisque Ψ_{couvert} est plus élevé le 20.5.75 ; en conséquence , soit le modèle hydrique est insatisfaisant , soit le seuil hydrique de fermeture stomatique varie selon les journées comparées ; rien ne permet de valider cette dernière hypothèse , et il serait trop opportuniste d'apporter au modèle une correction faisant disparaître cette contradiction .

3.c. second essai de modélisation : prise en compte empirique de Ψ_{sol} et LAI

Les premières hypothèses sont abandonnées , à l'exception de celle concernant la régulation photique . Le choix est fait désormais d'attacher plus d'importance à l'interprétation préalable des données dont on dispose , afin d'émettre les hypothèses de modélisation ; malgré le défaut d'une telle approche qui revient à simuler à partir de ce que l'on observe , il est permis de penser que dans la mesure où les données expérimentales englobent des situations suffisamment différentes sur des points tels que le stade végétatif , l'importance du développement aérien , la demande climatique , l'état hydrique du sol , alors parvenir à une simulation de bonne concordance pour les différentes journées s'accompagne d'une bonne

figure 16 : Variations horaires pour trois journées , des termes d'entrée du modèle hydrique , du résultat de calcul , et des valeurs observées de la résistance du couvert .



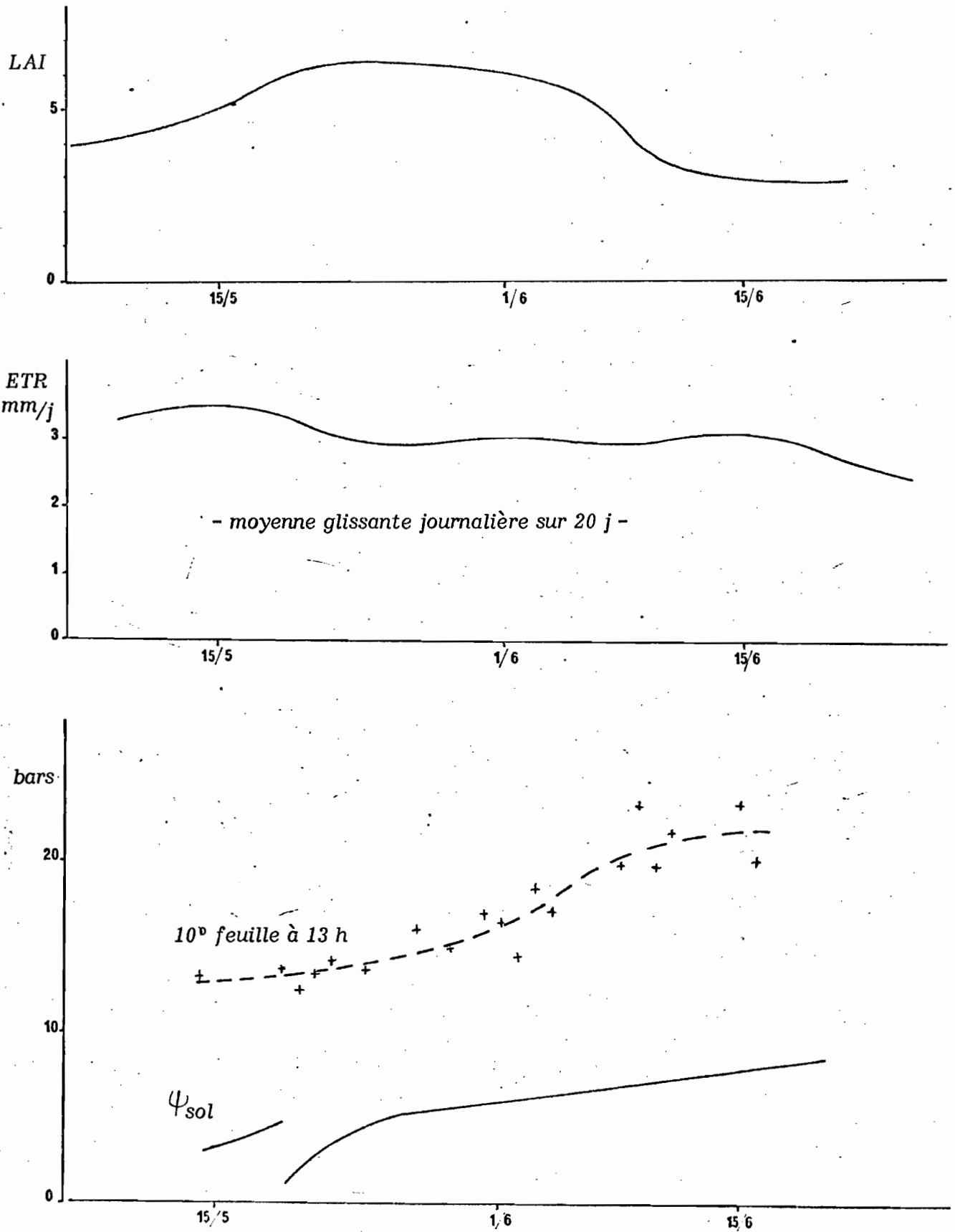


figure 17 : Evolutions comparées , en Mai et Juin 1976 , des différents termes susceptibles d'intervenir dans le comportement hydrique du couvert .

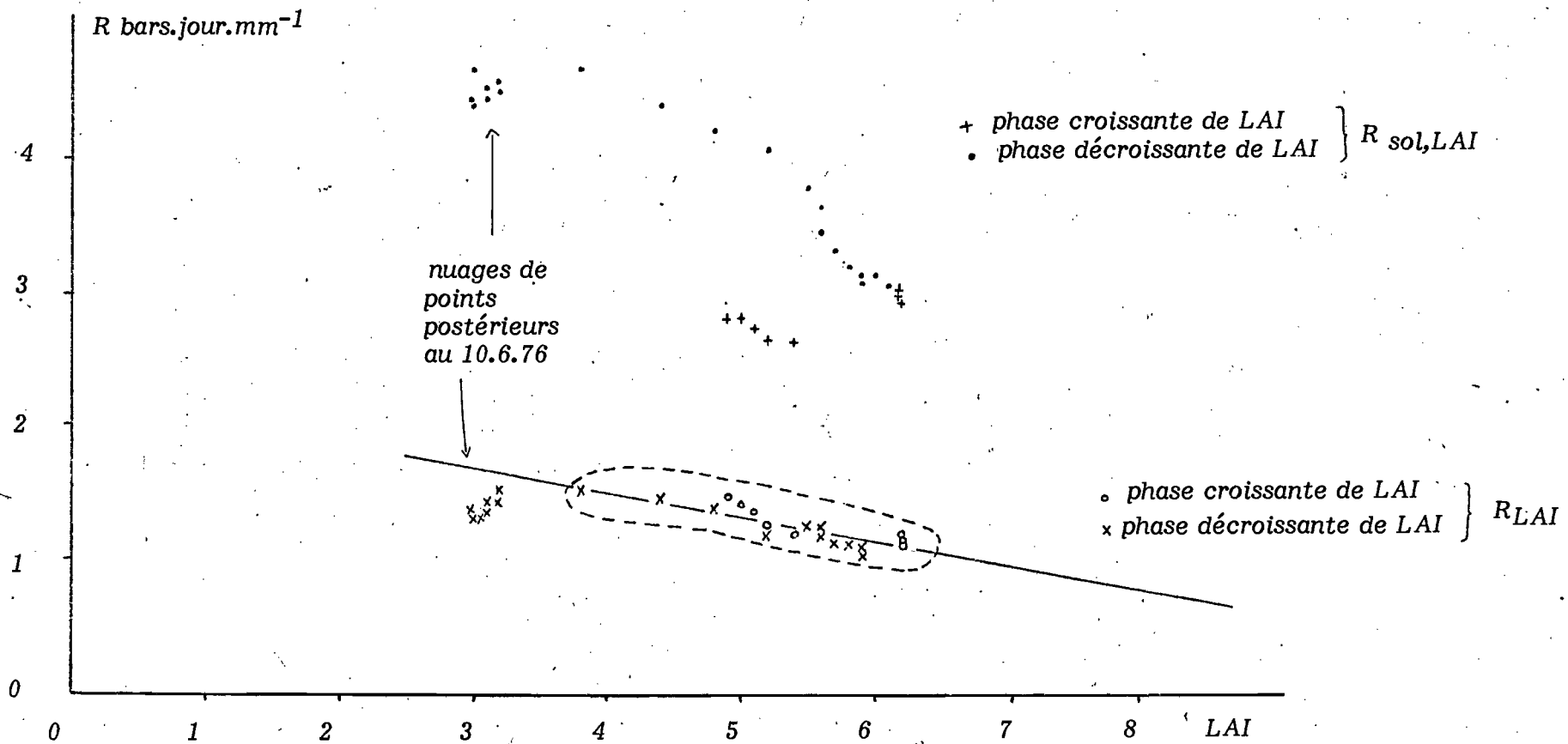


figure 18 : $R = (\Psi_{\text{feuille } 10, \text{ à } 13h} - \Psi_{\text{sol estimé}}) / ETR_{\text{jour}}$, représenté pour des journées espacées du 15.5 au 15.6.76
 R_{LAI} obtenu en déduisant un effet "état hydrique du sol".

valeur prédictive du modèle pour des situations hydriques très variables .

La figure 17 décrit l'évolution moyenne de LAI , ETR journalière et Ψ_{sol} ; ces courbes conduisent à plusieurs remarques :

1) entre le 25.5.76 et le 15.6.76 , le terme $R = (\Psi_{f13h} - \Psi_{sol}) / ETR_j$, qui peut-être considéré comme indicateur du fonctionnement hydrique du système sol-plante , s'accroît alors que ETR_j reste globalement constante ; il y aurait alors un effet lié à Ψ_{sol} , ou à LAI , ou à la phénologie du couvert .

2) l'accroissement de R devient rapide entre le 31.5.76 et le 10.6.76 (période au cours de laquelle Ψ_{sol} s'accroît tout aussi progressivement qu'auparavant) ; simultanément , la courbe d'indice foliaire chute brusquement , permettant d'imaginer une relation plus ou moins directe entre le développement aérien estimé par LAI , et une " sensibilité " hydrique du couvert estimée par R .

A partir de ces remarques , il sera successivement déterminé une relation entre l'état hydrique du sol , puis l'indice foliaire et une valeur moyenne pour la journée de la résistance du système SOL-PLANTE . Ainsi , les éléments considérés comme les plus importants pour le comportement hydrique global du couvert sont Ψ_{sol} et LAI .

* établissement des relations empiriques ...

La figure 18 représentant R en fonction de LAI , suggère l'influence de Ψ_{sol} à même valeur de LAI . Dans l'hypothèse d'un coefficient correcteur fonction linéaire de Ψ_{sol} , on établit son expression à partir des moyennes de R et Ψ_{sol} entre deux périodes à LAI comparables : 14.5 au 18.5 , et 5 au 8.6 ; le coefficient s'écrit alors :

$$K_{sol} = (1 + 0.29 * \Psi_{sol}) \quad (8)$$

$$\text{et } R = R (LAI) * K_{sol} \quad (9) \quad \text{où } R (LAI) \text{ correspond à } \Psi_{sol} = 0 \text{ bars}$$

En tenant compte de K_{sol} , la relation $R / K_{sol} = R (LAI)$ s'assimile à une relation quasiment linéaire . Il faut cependant constater une tendance à la réduction de R pour les dernières journées de Juin 1976 . L'absence de points concernant un LAI proche de 3 mais en situation de Ψ_{sol} proche de 0 , empêche de dire si cette réduction résulte d'une sous-estimation par K_{sol} de l'effet de Ψ_{sol} , ou s'il s'agit d'un effet sénescence de la culture . Dans le doute , étant ^{donné} la différence des coefficients de corrélations obtenus pour les régressions linéaires sur les nuages prenant en compte ou non les 7 points relatifs aux journées postérieures au 10.6.76 , le choix est fait d'admettre un effet sénescence non quantifiable et donc de laisser ces points de côté . L'expression finale de la résistance moyenne journalière du système SOL-PLANTE s'écrira alors :

$$R = R \quad * (1 - 0.081 * LAI) * (1 + 0.29 * \Psi_{sol}) \quad (10)$$

$$\int_{\substack{LAI=3 \\ \Psi_{sol}=0}}$$

où $R_{LAI=3}$ vaut environ $15 \text{ bars.h.mm}^{-1}$ (cette valeur a été estimée en posant $\Psi_{sol}=0$ $ETR(13h) = 1/10 * ETR(\text{jour})$ entre le 16.5.76 et le 15.6.76)

La valeur de R calculée pour chacune des dix journées de mesures de R_c , à partir des mesures de $ETR(13h)$, permet d'établir une relation que l'on choisit de type linéaire, entre le rapport $k = R_c \text{ mesuré} / R_c \text{ photique calculé}$ et Ψ_{couvert} calculé selon le modèle simplifié finalement adopté :

$$(11) \quad \begin{aligned} \Psi_{\text{couvert}}(h) &= \Psi_{\text{sol}} + R * ETR (h-1) \quad \text{lorsque } ETR \text{ croît} \\ \Psi_{\text{couvert}}(h) &= \Psi_{\text{couvert max}} \quad \text{lorsque } ETR \text{ décroît, où } \Psi_{\text{couvert max}} \text{ correspond à la valeur maximale de } ETR \text{ atteinte au cours de la journée de calcul} \end{aligned}$$

La figure 19 représente la droite de régression $k = f(\Psi_{\text{couvert}})$ qui a été établie en ne considérant que les points de mesures accomplies entre 8 h et 16 h. Les coefficients sont :

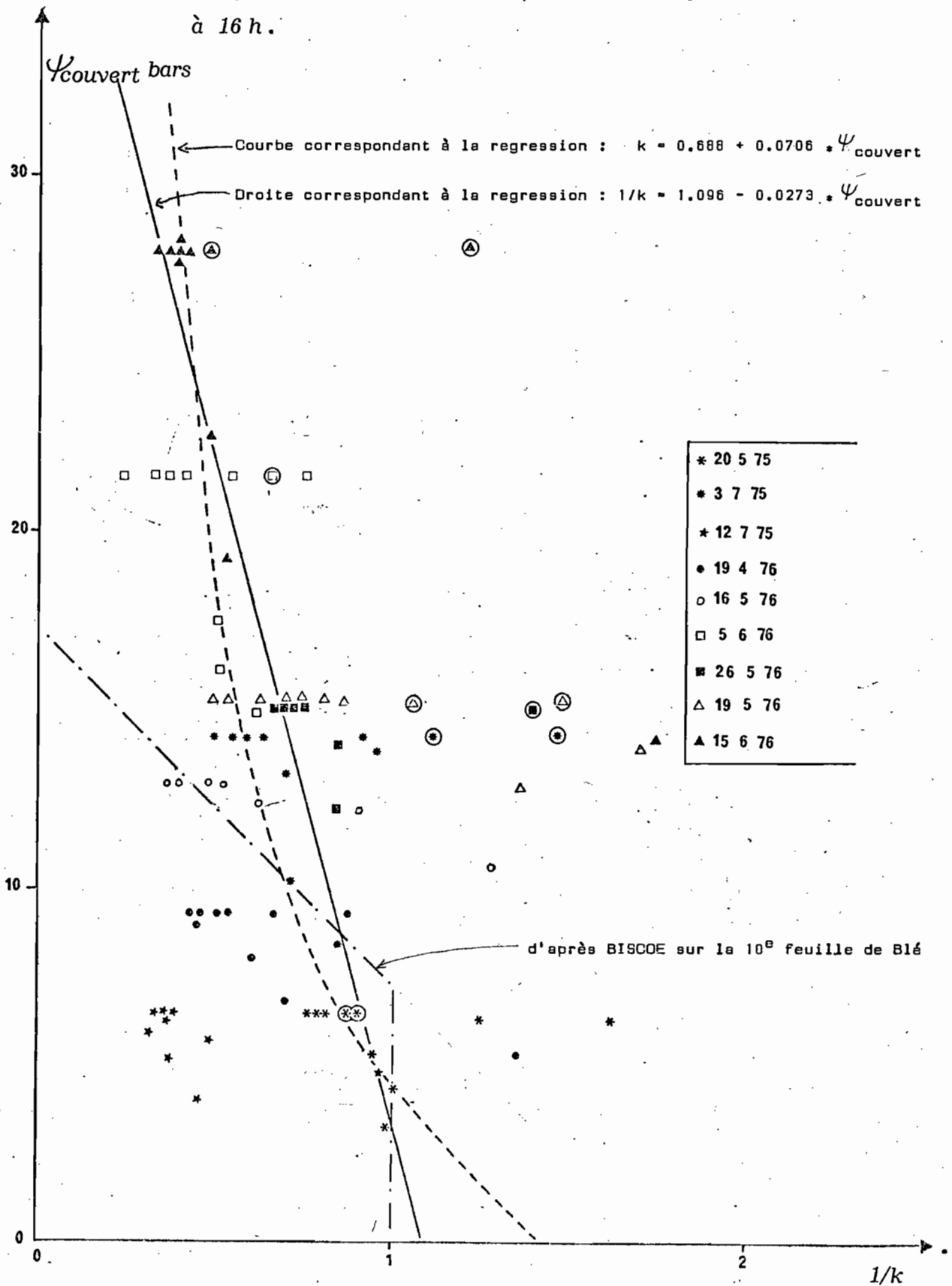
$$(12) \quad \begin{aligned} R_c \text{ mesuré} / R_c \text{ photique calculé} &= 0.688 + 0.0706 * \Psi_{\text{couvert calculé}} \\ \text{avec un coeff. de corrélation égal à } &- 0.62 \quad (\text{bars}) \end{aligned}$$

Une comparaison a été faite entre la réduction relative de R_c photique ainsi définie et celle obtenue expérimentalement par BISCOE (1976) sur la huitième feuille de Blé dans une large gamme de rayonnements. Elle montre des valeurs semblables du coefficient réducteur entre les limites de 0 et 10 bars des termes respectifs de caractérisation de l'état hydrique, puis une décroissance en fonction du potentiel hydrique plus lente dans le cas du couvert qui permettrait de discuter de la plus grande inertie à la régulation hydrique de ce dernier si on connaissait la signification précise de Ψ_{couvert} calculé par le modèle. L'expression finale de la résistance globale du couvert s'écrit donc :

$$(13) \quad \begin{aligned} R_c &= R_c \text{ photique} * (0.688 + 0.0706 * \Psi_{\text{couvert}}) \quad \text{pour } \Psi_{\text{couvert}} > 4.4 \\ R_c &= R_c \text{ photique} \quad \text{pour } \Psi_{\text{couvert}} < 4.4 \\ \text{où } \Psi_{\text{couvert}} &\text{ est calculé d'après les équations 10 et 11} \end{aligned}$$

Le modèle de calcul de la résistance globale du couvert se réduit donc au deux systèmes d'équation (11) et (13); il conduit aux valeurs calculées de R_c représentées sur la figure (20). De ceci, il ressort une bonne prise en compte des phénomènes de la

figure 19 : Répartition des valeurs du rapport $\frac{R_c \text{ photique calculé}}{R_c \text{ mesuré}}$ en fonction du terme hydrique ψ_{couvert} calculé.
Les points encadrés sont relatifs aux mesures postérieures à 16 h.



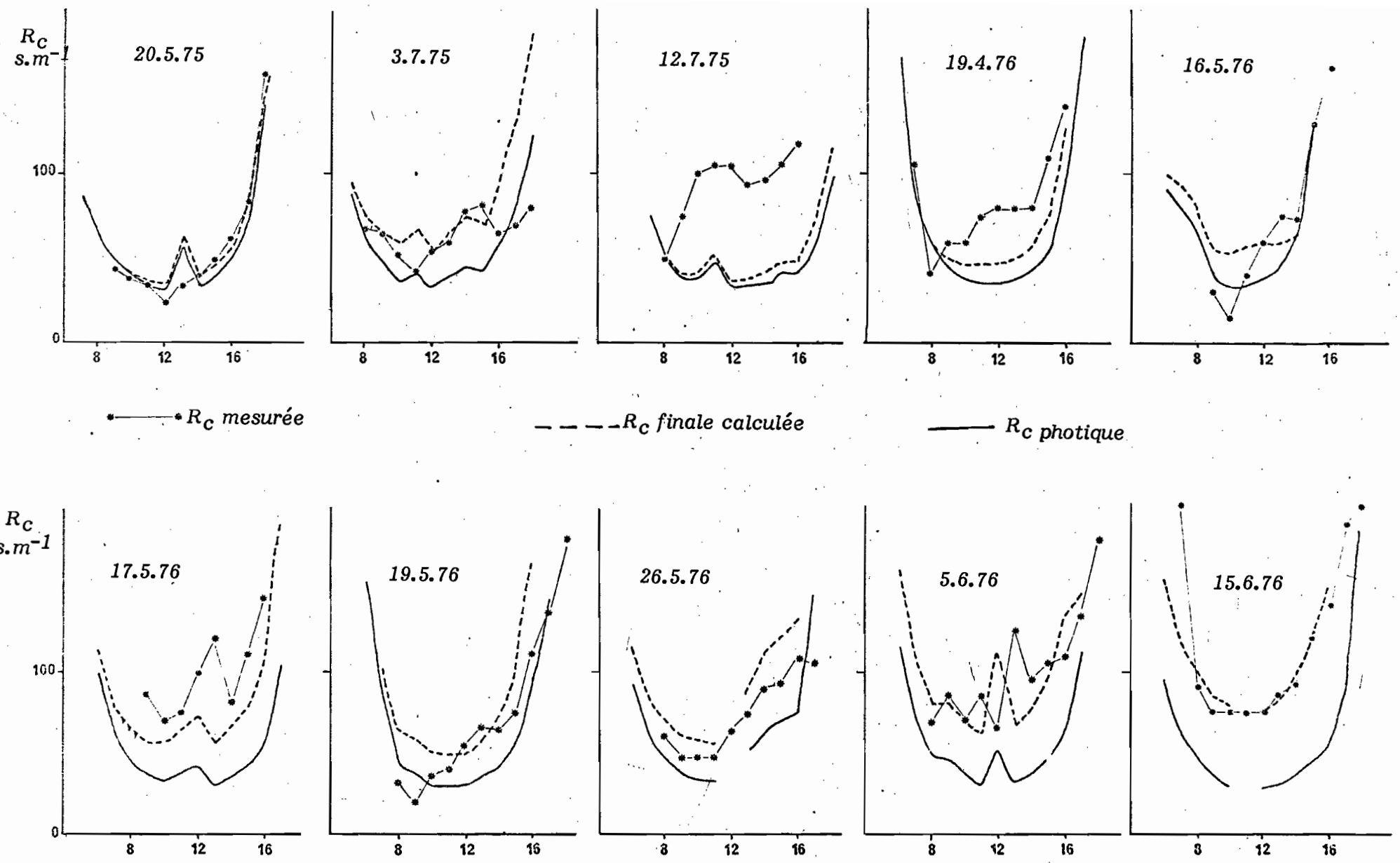


figure 20 : Comparaison entre les valeurs mesurées de R_C , et celles résultant des différentes étapes de calcul du modèle .

régulation diurne du couvert , à l'exception de deux journées parmi les dix :

- le 12.7.75 , le modèle sous-estime largement la fermeture du couvert , permettant de supposer qu'il considère mal un effet sénescence tardive .
- le 19.4.76 , le modèle accorde une moins grande sensibilité hydrique que celle observée . Ce cas concerne un couvert de $LAI = 2.2$, soit une valeur extrême (en regard à l'intervalle de modélisation) de l'un des paramètres déterminant du modèle . Malgré ces divergences , nous pouvons cependant affirmer que le modèle prend bien en compte d'une part un éventuel effet de la maturation : comparaison des 20.5.75 et 3.7.75 , d'autre part l'influence du rayonnement : comparaison des 26.5.76 et 16.5.76 , et enfin l'influence de l'état hydrique du sol : comparaison des 20.5.75 et 5.6.76 .

- CONCLUSION -

La recherche d'une simulation horaire de la résistance globale du couvert de Blé a conduit à un modèle empirique déterminé dans le cas où l'indice foliaire dépasse la valeur de 2.5 ; celui-ci prend en compte le rayonnement , l'état hydrique du sol , ainsi que l'indice foliaire ; il considère l'essentiel des facteurs incidant sur le terme stomatique décrit par la figure (7) ; bien que le modèle n'ait pas été validé sur des observations indépendantes de celles qui ont servi à le définir , la concordance satisfaisante des mesures et des résultats du calcul pour de nombreuses journées en 1975 et 1976 permet de penser que son domaine de prédiction s'étend à toutes les situations hydriques que peut connaître le Blé tendre d'Hiver en France , étant donné le caractère extrême de chacune de ces deux années d'étude à partir desquelles il a été calé . L'originalité de ce modèle de type stomatique réside dans la description qu'il fait d'un état hydrique global du couvert à l'échelle horaire , grâce à une relation qui caractérise le fonctionnement du système SOL - PLANTE .

- BIBLIOGRAPHIE -

- BISCOE P.V , COHEN Y. , WALLACE J.S -1976- Daily and seasonal changes of water potential in cereals - *Phil.. Trans . R . Soc .Lond .* 273 , 565 -580
- DENMEAD O . T , MILLAR R.D - 1975 - Water transport in wheat - in *Heat and Mass Transport in the Biosphere - I - Transfert Processes in Plant Environment 6-* Ed D.A de VRIES et N.H AFGAN - pp 395-402
- JARVIS P.G - 1976 - The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field - *Phil . Trans .R . Soc . Lond . B* 273 , 593 - 610
- JOHNS D. , BEARD J.B , VAN BAVEL C.H.M - 1983 - Resistances to Evapotranspiration from a St Augustinegrass Turf -*Canopy - Agron . J. ,* vol 75 , pp 419- 422
- KATERJI N.B. , 1977 - Contribution à l'étude de l'évapotranspiration réelle du Blé tendre d'Hiver , application à la résistance du couvert en relation avec certains facteurs du milieu- Thèse de troisième cycle - Paris VII
- KATERJI .N.B-1982 - Etude et modélisation des transferts hydriques dans le système S-P-A . Thèse de doctotat d'état - Paris VII
- KATERJI N.B., HALLAIRE M. , PERRIER A. , DURAND D. : 1983 - Transfert Hydrique dans le végétal - I - Modélisation à l'échelle du couvert en conditions naturelles - *ACTA OECOLOGICA* vol 4 (18) , n° 1 , pp11-26
- MONTEITH J. 1964 - Evaporation and environment in " The state and movement of water in living organisms " , G.E. Fogg (Ed) , *Symp.Soc.Exp.Biol.*,Swansea, Sept 1964 - Cambridge University Press , 1965 , pp 205-234
- MONTEITH J. et Al . 1965 - The measurement and control of stomatal resistance in the field . *J . Appl . Ecol .* 2, 345-355
- PERRIER A.- 1975- Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles - III- Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux - *Ann. Agron.* 1975 , 26 (3), 229-243
- PERRIER A.-1976- Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux : profils microclimatiques , évapotranspiration et photosynthèse nette - Thèse de doctorat d'état - INRA-PARIS
- SHAWCROFT R.W.-1970- Water relations and stomatal response in a corn field - Thèse - Cornell University
- SHAWCROFT R.W., LEMON E.R., STEWART D.W.: 1973- Estimation of internal crop water status from meteorological and plant parameters - UNESCO - Plant response to climatic factors -*Proc. Uppsala Symp . ,* 1970 , pp 449-459

SHINN J.H. , LEMON E.R. , 1968 - *Photosynthesis under field conditions - XI Soil-Plant-Water Relations during drought Stress in Corn - Agron . J. ,60 , 337-343*

SZEICZ G. , LONG I.F. - 1969 - *Surface Resistance of Crop Canopies - Water Resources Research , 5, 3 , PP 622-633*

SLATYER R.O. , 1967 - *Plant water relationships - London : Academic Press .*

Van BAVEL C.H.M., 1967 - *Changes in canopies resistances to water loss from Alfalfa induced by soil water depletion - Agric . Meteo . , 4 , pp 165-176*

ZELLER B. , 1983 - *Essai de modélisation du bilan hydrique d'une parcelle de Blé d'Hiver en fonction des données météorologiques locales , des caractéristiques du couvert végétal et du sol - Mémoire de DAA - Météorologie Nationale - INA Paris-Grignon - 60 p*