

L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET LA PHOTOSYNTHÈSE D'UNE CULTURE EN FONCTION DE SES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Alain Perrier

De façon générale, les propriétés physiques des plantes interviennent au niveau d'un grand nombre de domaines de recherche que l'on peut regrouper en quatre rubriques:

Les propriétés physiques qui interviennent sur la croissance et le développement des plantes depuis le semis jusqu'à la récolte.

Les propriétés physiques importantes pour toutes les interventions mécaniques incluant en particulier le semis et la récolte.

Les propriétés physiques à prendre en considération pour les problèmes de transport, d'emballage, de conditionnement et de conservation jusqu'à la consommation du produit.

Les propriétés physiques qui permettent de définir une bonne qualité du produit tels que la texture, la composition, le goût, etc....

Le but de cette présentation est d'étudier uniquement le premier point qui concerne la croissance et le développement des plantes et d'analyser certaines propriétés physiques qui interfèrent au niveau du complexe sol-plante-atmosphère. Cette analyse se fera à travers l'étude de deux processus qui contribuent très largement à la production des cultures et qui sont d'une part l'évapotranspiration et son efficacité et d'autre part la photosynthèse.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES PHÉNOMÈNES ET DESCRIPTION DES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Pour analyser dans les conditions naturelles les processus d'échanges dans le but d'étudier l'évapotranspiration et la photosynthèse, il faut rappeler:

— que les échanges de masse ou d'énergie sont sous la dépendance des transferts turbulents qui résultent d'une analyse aérodynamique ou d'un bilan mécanique des transferts de quantité de mouvement,

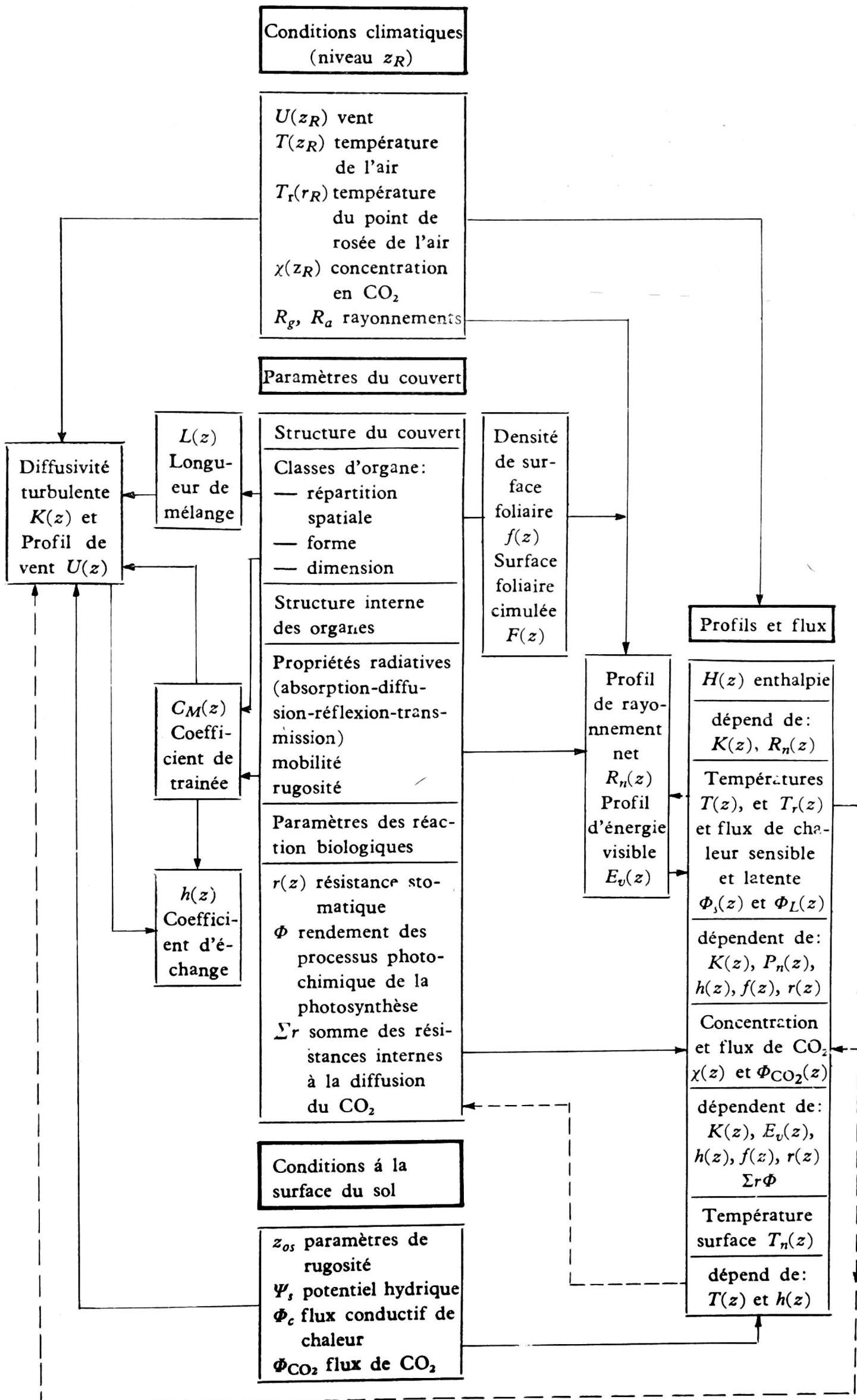
— que les échanges d'énergie et la photosynthèse, flux de CO_2 , dépendent aussi de l'absorption au sein de la culture, de l'énergie radiative, soit de l'atténuation du rayonnement net (pour les problèmes d'énergie et d'évapotranspiration) soit de l'absorption de l'énergie lumineuse visible (pour la photosynthèse),

— que les échanges d'énergie et de masse (H_2O ou CO_2) ne peuvent être traités sans passer par un bilan de ces quantités à chaque niveau au sein de la culture et au niveau de chaque surface élémentaire d'échange.

Compte tenu de cette triple analyse, il est possible d'affirmer qu'en fonction de conditions climatiques données (vitesse et turbulence de l'air — température, humidité et concentration en CO_2 de l'air et enfin énergie radiative incidente) et compte tenu de l'ensemble des propriétés physiques des plantes dont en particulier celles définissant la structure, chaque bilanse trouve déterminer par des relations analytiques. C'est le cas du bilan de quantité de mouvement (problème mécanique), du bilan d'énergie (flux d'énergie) et des bilans de masse (évapotranspiration et photosynthèse). Le diagramme suivant (fig. 1) permet de situer le point d'impact de ces propriétés physiques sur l'un ou l'autre de ces bilans; l'analyse globale de l'ensemble de ces relations traduisant les bilans et leur équilibre [7] permet de définir dans quel sens certaines propriétés physiques vont intervenir au niveau de l'évapotranspiration et de la photosynthèse.

A titre d'exemple, ce diagramme souligne (partie gauche) que les propriétés géométriques des organes — forme, dimension, répartition spatiale — et les propriétés de structure, caractérisant les états de surface de ces organes et leur mobilité, constituent les facteurs de base qui définissent les profils de vitesse du vent $U(z)$ et de diffusivité turbulente $K(z)$ par l'intermédiaire de grandeurs auxiliaires que sont la longueur de mélange $L(z)$ les coefficients de traînée D et d'échange au niveau des organes $h(z)$. La diffusivité turbulente $K(z)$ plus que la vitesse du vent étant le paramètre qui joue le rôle dominant sur les transferts de masse donc sur l'évapotranspiration et la photosynthèse. La partie droite de ce même diagramme montre que les propriétés de structure (densité de surface foliaire $f(z)$ soit des m^2 de surface par unité de volume m^3) et les propriétés radiatives (absorption, réflexion, transmission, diffusion de l'énergie radiative) définissent les profils de rayonnement net $\Phi_R(z)$ (rôle dans le bilan d'énergie) et d'énergie visible $E(z)$ (rôle dans la photosynthèse). C'est alors la combinaison de ces deux profils avec celui de la diffusivité turbulente $K(z)$ et l'introduction des propriétés de diffusion gazeuse

Fig. 1. Diagramme général des actions et interactions entre conditions limites du modèle, paramètres du couvert et flux et profils recherchés



à travers l'épiderme (résistance stomatique $r(z)$) ou au sein de la feuille (sommes des résistances internes Σr) qui permet de calculer l'ensemble des profils. Ce sera le profil de température humide $T_w(z)$, de température sèche $T(z)$ de température du point de rosée de l'air $T_d(z)$ et de la concentration en gaz carbonique $C(z)$. Par voie de conséquence, on en déduira aussi les flux soit dans le cadre du but poursuivi l'évapotranspiration (flux H_2O) et la photosynthèse (flux CO_2).

Ce sont donc les rôles directes de certaines de ces propriétés physiques des plantes qui vont être maintenant présentés, en tant qu'impacte sur l'évapotranspiration et la photosynthèse. La plupart des illustrations et résultats numériques sont obtenus à partir d'une modélisation analytique complète qui suit les éléments décrits ci-dessus [8].

RÔLE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES FEUILLES

PROPRIÉTÉS AÉRODYNAMIQUES

De façon générale, toute réduction du coefficient de traînée au niveau des organes, donc finalement d'une couche de végétation, contribue à accroître légèrement la vitesse du vent, le profil de décroissance $U(z)$ est alors d'autant moins accusé au sein d'un couvert que les valeurs de ce coefficient sont plus faibles. L'accroissement de ces vitesses constituent toujours un accroissement des échanges de masse. Ainsi, toute modification de forme et de surface permettant une forme plus petite et plus aérodynamique ainsi qu'une surface plus lisse va jouer dans le sens précisé ci-dessus, surtout si la résistance due à la couche limite au voisinage des organes diminue simultanément (organe plus petit) et si la résistance à la diffusion de l'épiderme évolue dans le même sens (perte des poils par exemple).

Il faut cependant mentionner que ces variations aérodynamiques qui jouent sur 10 à 30% des valeurs de résistances sont faibles devant les variations beaucoup plus importantes de la résistance stomatique qui présente d'autre part, dans la série des résistances aux transferts, un poids plusieurs fois supérieur (tableau 1 et 2).

Tableau 1

Rôle de la vitesse du vent, soit des variations de résistances aérodynamiques sur le transfert de CO_2 (photosynthèse nette en $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$)

$U(ms^{-1})$	1	2	3	4	5	7
Photosynthèse nette	1,93	2,07	2,10	2,12	2,13	2,14

Tableau 2

Rôle de la résistance stomatique sur le transfert de CO_2
(photosynthèse nette en $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$r_s(\text{sm}^{-1})$	50	100	200	300	400	500	750	1000	1500	2000
Photosynthèse nette	2,24	2,22	2,10	1,96	1,87	1,80	1,55	1,32	0,99	0,79

RÉSISTANCE STOMATIQUE

La résistance de l'épiderme à la diffusion du gaz est un des points dominant de la variation des flux. La figure 2 illustre précisément pour un couvert de maïs, l'évolution de l'évapotranspiration en fonction de la résistance stomatique moyenne du couvert. Une résistance nulle à tous les niveaux — végétation après une pluie ou une irrigation par exemple, puisqu'il y a saturation au niveau de toutes les surfaces — conduit en

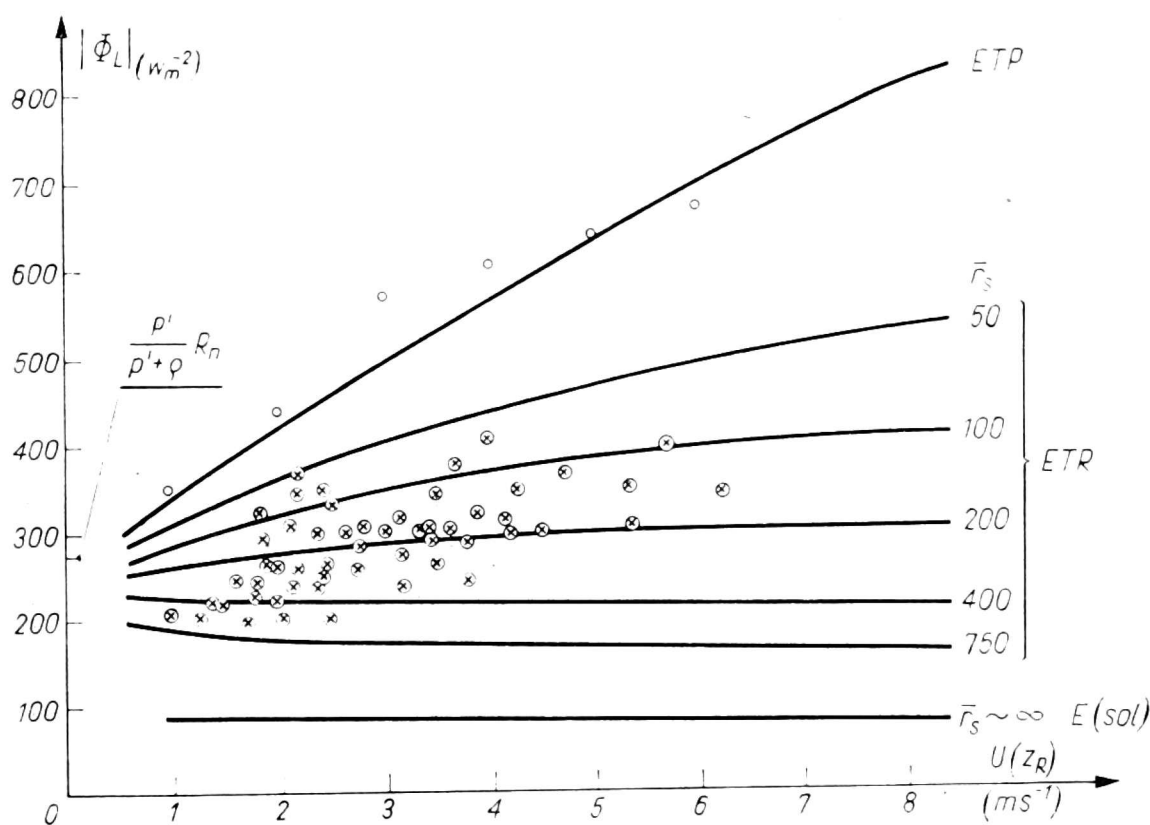


Fig. 2. Evolution de l'évapotranspiration d'un maïs en fonction de la vitesse du vent pour différents profils de résistances stomatiques constantes ($R_n = 400 \text{ Wm}^{-2}$, $T_a - T_r = 8^\circ\text{C}$) o valeurs expérimentales après pluie, x valeurs expérimentales sur culture irriguée (2 à 3 fois par semaine)

fonction de la vitesse du vent aux pertes en eau maximales. Lorsque la résistance croît de 50 à 700 sm^{-1} l'évapotranspiration décroît très rapidement surtout à forte vitesse de vent.

Les tableaux 1 et 2 soulignent sur la photosynthèse cette fois le rôle

assez faible du vent par rapport à celui de la résistance stomatique. Qu'il s'agisse de l'évapotranspiration ou de la photosynthèse une possibilité d'action beaucoup plus grande que dans le cas précédent est offerte dans la mesure où une modification de la résistance stomatique peut être induite. Cette modification peut intervenir à deux niveaux:

— soit au niveau morphologique, en considérant le nombre de stomates, leur position, leur structure compte tenu de celle de l'épiderme,

— soit au niveau biologique, par l'intermédiaire du processus d'ouverture et de fermeture du stomate qui est fonction du microclimat, mais aussi de l'histoire de feuille et bien entendu du génotype. Pour souligner les différences usuelles qu'il est possible de rencontrer dans des conditions naturelles, citons par exemple que pour une culture bien alimentée en eau la résistance moyenne du couvert est: de 20 à 50 sm^{-1} pour un blé, de 30 à 100 sm^{-1} pour un maïs et de 100 à 500 sm^{-1} pour un ananas.

PROPRIÉTÉS RADIATIVES

Les propriétés d'absorption des feuilles et bien entendu de réflexion et transmission en fonction de l'architecture de la culture interviennent globalement au niveau de l'albédo d'un couvert, mais surtout au niveau de la répartition de cette énergie au sein d'un couvert.

— L'eau étant le facteur dominant, si ce facteur est limitant, il faut tendre à accroître l'albédo et, dans le cas d'une bonne alimentation hydrique, une diminution de l'albédo afin de permettre une meilleure photosynthèse est souhaitable. L'optimum est d'accroître l'absorption de l'énergie visible (photosynthèse) et de réduire au maximum l'énergie dans le proche infra-rouge (évapotranspiration). Rappelons que les essais sur la structure et sur les propriétés radiatives (moyens artificiels [3]) ne conduisent pas à des variations sensibles au niveau économique.

— Les effets de pénétration ou de répartition semblent plus marqués: une meilleure pénétration de l'énergie radiative étant toujours bénéfique vis-à-vis de la consommation en eau (réduction de l'évapotranspiration) et par rapport à la photosynthèse. Ainsi, toute architecture et toute propriété optique permettant cette meilleure pénétration sera favorable, mais le rôle de l'architecture est toujours dominant devant les caractéristiques optiques des feuilles c'est-à-dire une meilleure transmission, une réflexion moindre et une absorption moyenne.

RÔLE DE LA STRUCTURE DU COUVERT

Un couvert végétal intervient par sa structure, selon deux directions dominantes:

— d'une part en fonction de la densité de peuplement, c'est-à-dire en fonction de la surface foliaire totale croissante (Leaf Area Index ou L.A.I.),

— d'autre part, en fonction de la répartition verticale de la densité des surfaces foliaires (m^2 de feuille par m^3) en gardant par exemple le même L.A.I.

RÔLE DE LA DENSITÉ DE PEUPLEMENT

Pour une culture donnée, plus la densité de peuplement croît, plus les densités de surfaces foliaires sont élevées et plus la surface foliaire totale est grande, mais l'on peut admettre en première approximation que la répartition verticale de ces densités reste sensiblement la même.

Sous l'angle aérodynamique la résistance du transfert dans l'air au-dessus de la culture est fonction de la hauteur des plantes et de leur densité par l'intermédiaire de la rugosité. De façon générale plus la rugosité est grande plus cette résistance est faible et plus les transferts, donc les échanges de masse, sont importants. Ainsi plus la hauteur de la culture est grande, plus la rugosité est forte, et plus la densité est élevée plus la rugosité domine [4]; dans la région des faibles densités ($L.A.I. < 1$) apparaît cependant une relation inverse, la rugosité commençant par croître avec la densité ($L.A.I. > 0$) [9]. Quant aux profils de vent ils seront d'autant plus atténués (faibles vitesses) que la surface foliaire totale (L.A.I.) sera plus grande (fig. 3a), atténuation qui correspond aussi à des échanges moindres au sein du couvert.

Il en résulte sous l'angle de l'évapotranspiration (fig. 4) une croissance des échanges puis une légère diminution malgré l'accroissement des surfaces foliaires. Le maximum est atteint pour des valeurs d'autant plus faibles du L.A.I. que la résistance moyenne des stomates est plus faible.

Sous l'angle de la photosynthèse, il y a bien croissance continue en fonction du L.A.I., car l'effet de puit est fonction de la surface foliaire, mais cette croissance tend vite vers un maximum pour des raisons identiques: diminution des échanges au sein du couvert, accroissement de la résistance aérodynamique (fig. 5).

Ces deux évolutions montrent que l'efficacité de l'eau (perte minimum pour une production maximum) est meilleure pour une densité de population maximum.

RÔLE DE LA RÉPARTITION DES DENSITÉS DE SURFACE FOLIAIRE

A même surface foliaire totale, les organes peuvent se répartir de façon très variée suivant la verticale et à titre d'exemple, nous avons choisi un profil de densité de surface foliaire normal (culture de maïs,

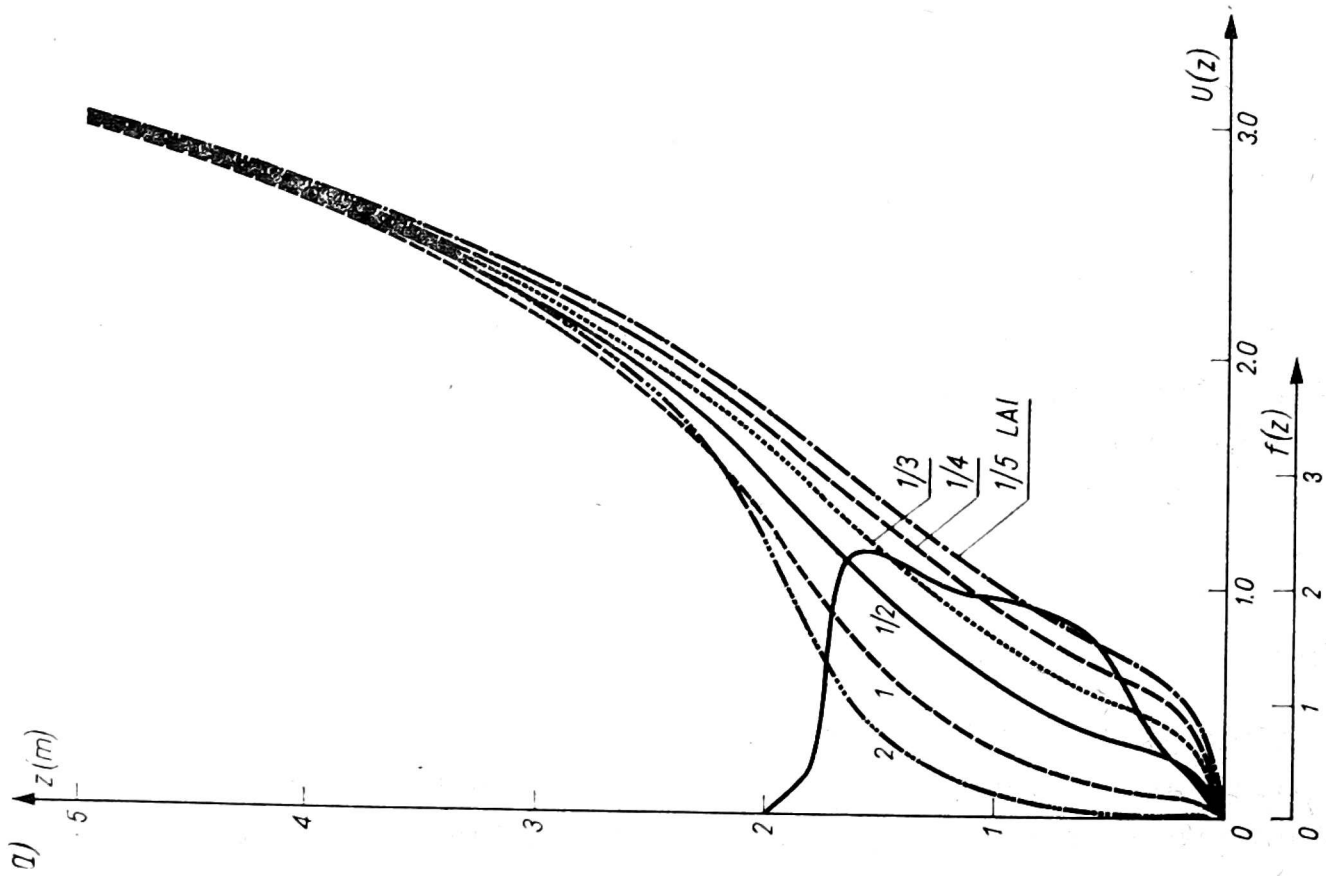


Fig. 3a. Evolution du profil de vent en fonction de divers LAI

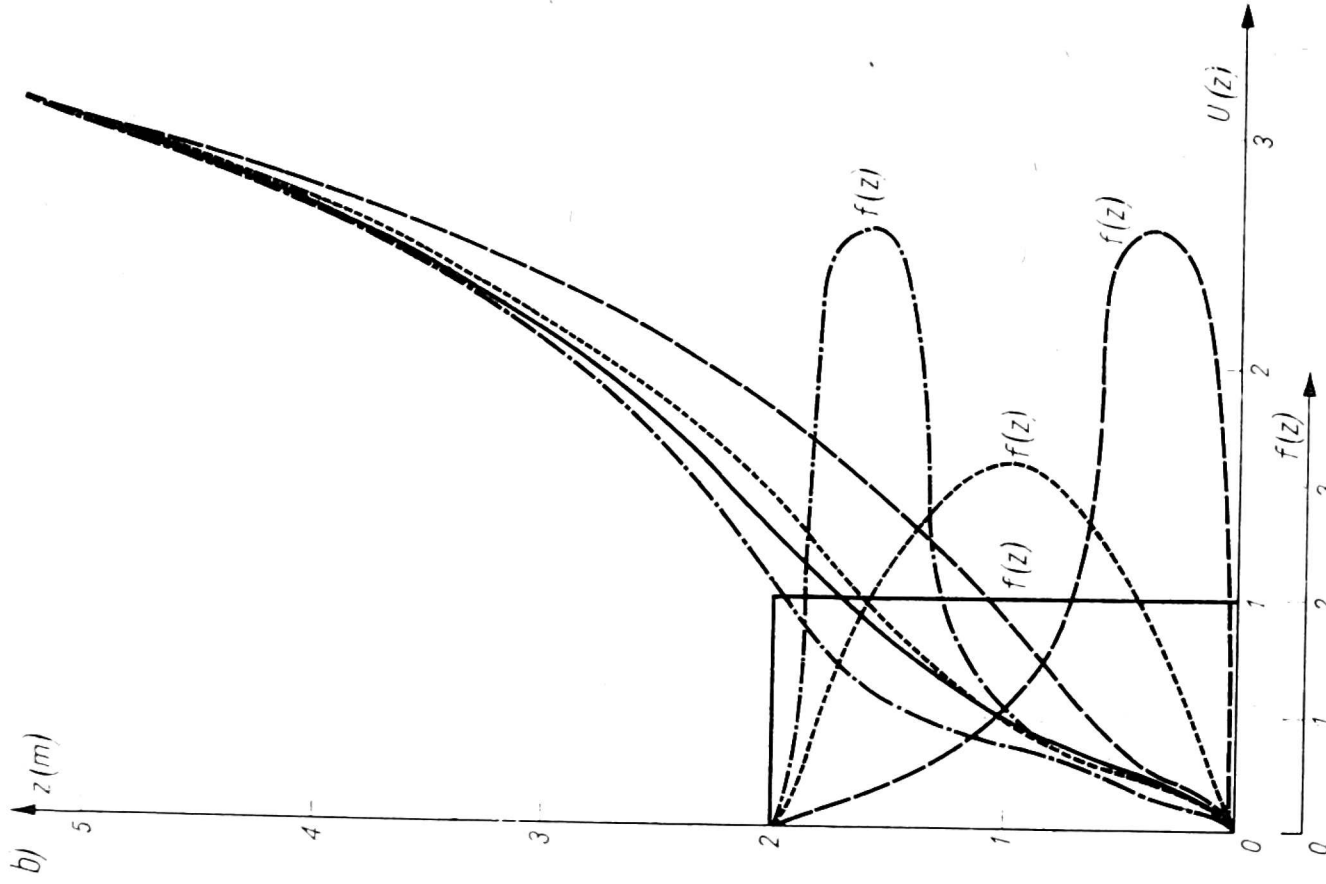


Fig. 3b. Evolution du profil de vent en fonction des divers profils de densité de surface foliaire

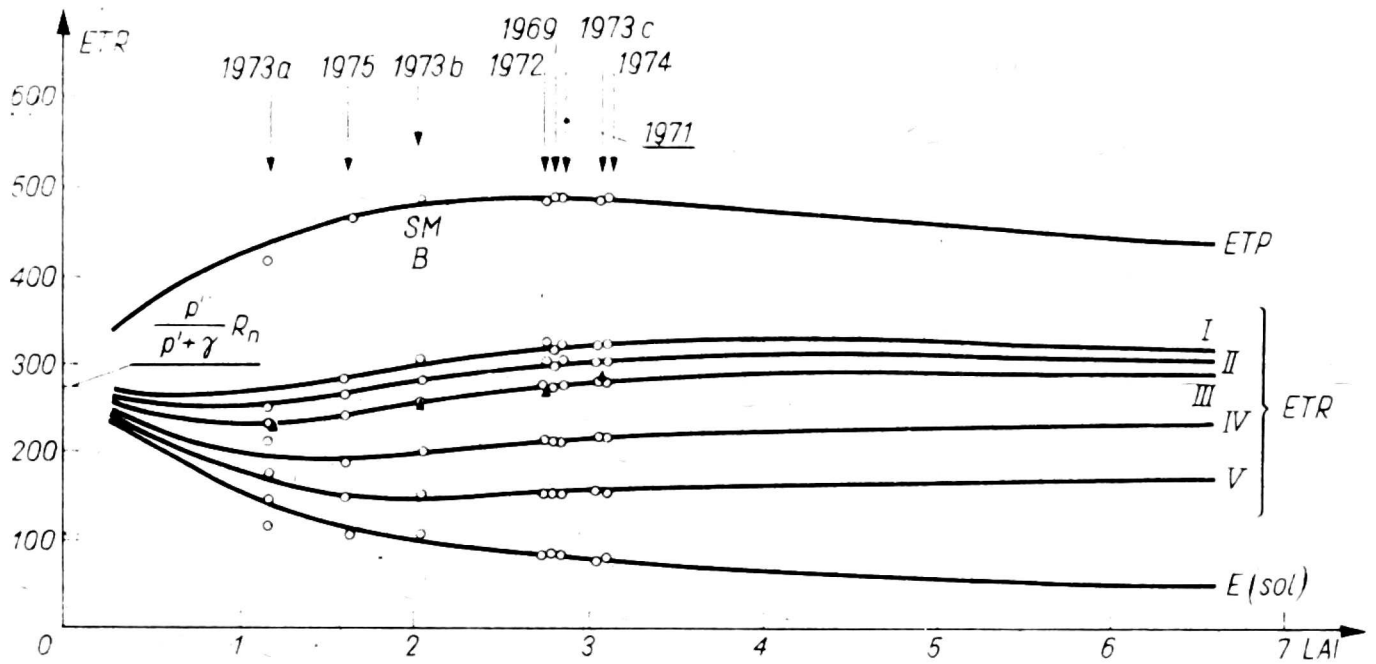


Fig. 4. Evolution de l'évapotranspiration réelle ETR d'un couvert de maïs en fonction du LAI pour différentes valeurs de résistances. ($r = 0 \rightarrow$ ETP, $r = 100, 150, 200, 400, 700, r = \infty$ — ETR sol) ($R_n = 400 \text{ W m}^{-2}$, $T_a - T_r = 8^\circ\text{C}$)

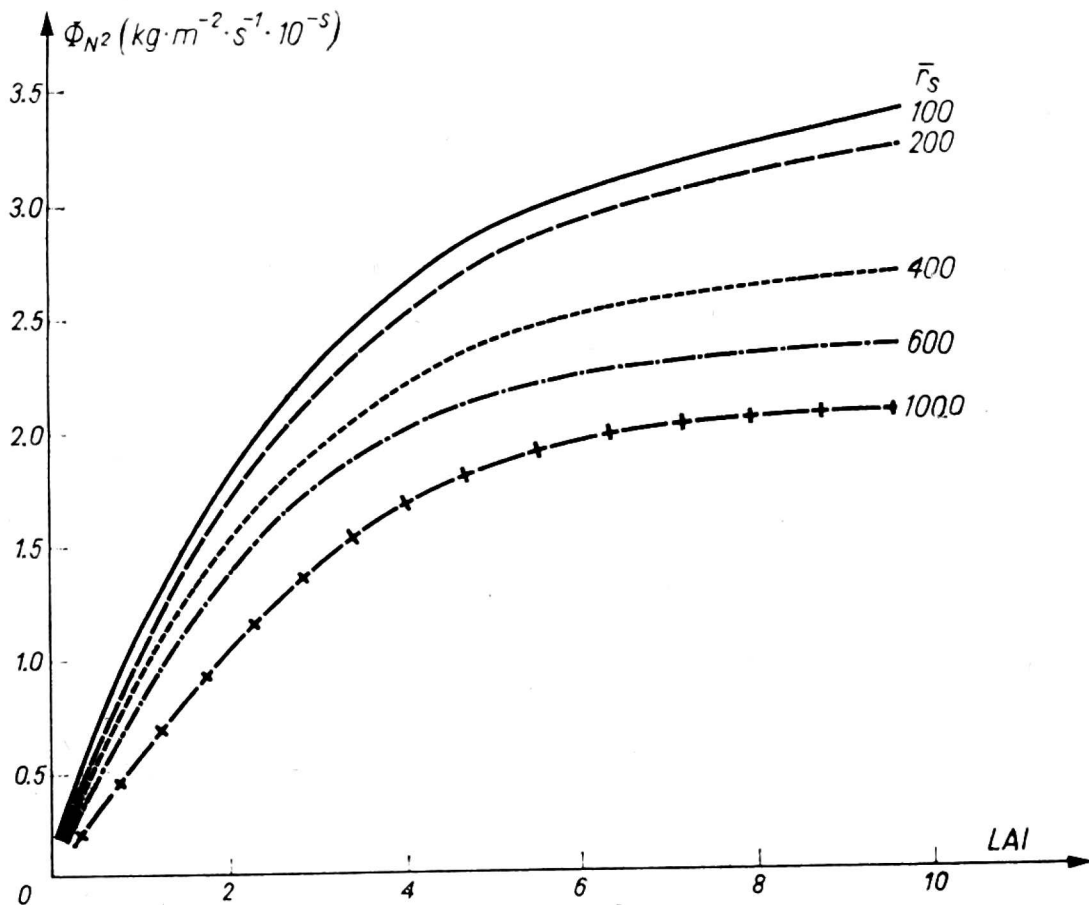


Fig. 5. Evolution de la photosynthèse nette d'un couvert de maïs en fonction du LAI pour différentes valeurs de la résistance r_s ($R_n = 400 \text{ W m}^{-2}$, $T_a - T_r = 8^\circ\text{C}$)

Tableau 3

r_s	0	100	200	400	600	1000	∞
Profil constant	$E = 596$	$E = 353$	275	211	182	155	105
		$\varnothing_w = 1.73$	1.72	1.64	1.42	0.94	0
		$e = 4.9$	6.25	7.77	7.80	6.06	0
Profil symétrique	$E = 582$	$E = 360$	281	215	185	157	104
		$\varnothing_w = 1.74$	1.69	1.53	1.32	0.98	0
		$e = 4.83$	6.01	7.12	7.14	6.24	0
Profil normal	$E = 540$	$E = 336$	267	207	173	150	100
		$\varnothing_w = 1.74$	1.65	1.46	1.33	1.04	0
		$e = 5.18$	6.18	7.05	7.69	6.93	0
Profil à maximum haut	$E = 569$	$E = 354$	276	208	177	149	96
		$\varnothing_w = 1.82$	1.63	1.45	1.24	0.92	0
		$e = 5.14$	5.91	6.97	7.01	6.17	0
Profil à maximum bas	$E = 481$	$E = 311$	252	198	173	150	102
		$\varnothing_w = 1.60$	1.59	1.47	1.26	0.97	0
		$e = 5.14$	6.31	7.42	7.28	6.47	0

fig. 3a), puis une série de profils arbitraires (fig. 3b) comprenant une répartition constante suivant la hauteur, une répartition symétrique avec un maximum à mi-hauteur et enfin deux profils inverses avec, soit le maximum dans la partie haute, soit le maximum dans la partie basse.

— Sous l'angle aérodynamique, plus la densité de surface foliaire est élevée dans la partie haute du couvert plus la rugosité diminue et par conséquent plus les transferts au-dessus du couvert sont faibles; à cette réduction globale au-dessus du couvert, il faut ajouter la réduction importante des transferts au sein du couvert, la partie supérieure formant un écran d'autant plus imperméable qu'elle est plus dense.

— Sous l'angle de l'évapotranspiration et de la photosynthèse nette, il en résulte aussi des variations importantes (tableau 3) suivant le type de profil en particulier pour les faibles résistances stomatiques des organes. On constate systématiquement une évapotranspiration minimale pour un profil à maximum bas. Ces résultats permettent aussi d'apprécier l'efficacité de l'eau (maximum de photosynthèse pour un minimum de consommation en eau) par le simple rapport des deux flux (photosynthèse nette sur évapotranspiration) rapport présenté en unité arbitraire dans ce même tableau. Cette efficacité est largement dépendante de la résistance stomatique et passe par un maximum pour l'ensemble des profils pour une valeur de résistance d'environ 400 à 500 sm^{-1} et montre des différences plus ou moins systématiques, différences nettes entre les profils à maximum haut et bas qui soulignent l'avantage de ce dernier.

RÔLE DE LA MOBILITÉ DU FEUILLAGE

La mobilité du feuillage comme celle de la plante entière dépend des formes, dimensions et structure interne des feuilles, des pétioles et des tiges. Les conséquences de ces mouvements ne sont pas toujours négligeables et peuvent accroître les échanges.

MOBILITÉ DES FEUILLES

Cette mobilité qui croît généralement avec la vitesse du vent conduit à des échanges qui peuvent être supérieurs de 20%. Cet accroissement des échanges d'eau et de gaz carbonique en fonction de la flexibilité et de la mobilité n'est, par ailleurs, pas toujours souhaitable. Par contre, pour des raisons de température maximum d'équilibre à ne pas dépasser, il serait souvent souhaitable, en particulier dans les zones à fort déficit hydrique, d'accroître la mobilité d'un feuillage à faible vitesse de vent afin d'augmenter dans ces conditions les échanges. A faible vitesse, cet accroissement est plus important, que pour les fortes vitesses où le coefficient d'échange est déjà naturellement élevé.

MOBILITÉ ET EFFET D'ONDULATION

La mobilité de l'ensemble de la culture conduit à accroître les ondulations à la surface de la culture lorsque la vitesse du vent s'accroît [2]. Cet effet, indépendamment de celui au niveau du feuillage, accroît, par l'apparition de surpression et de dépressions à la surface du couvert, des échanges au sein du couvert et entre le couvert et l'air extérieur.

MOBILITÉ ET PHOTOSYNTHÈSE

Le tableau 1 souligne que si le mouvement du feuillage n'est pas pris en compte, le rôle de la vitesse du vent sur les échanges et en particulier la photosynthèse est assez faible (10% au maximum). Par contre, les mesures de plein champ (fig. 6) soulignent le double rôle d'une part, du rayonnement (action évidente sur la photosynthèse), mais aussi de la vitesse du vent dont l'effet dépasse largement les dix pour cent. Cette constatation permet de supposer, puisque le vent ne semble pas intervenir par le biais des résistances pour plus de 10% à cause du rôle dominant des stomates sur la série des résistances aux transferts, que l'action du vent se fait sentir d'une autre façon, en particulier par le mouvement des feuilles. En effet, la mobilité permet de répartir le rayonnement lumineux incident non plus, par exemple, sur une première feuille mais en partie sur cette feuille et sur la feuille sous-jacente qui était ombrée et peut être aussi sur une troisième feuille; or la réponse photosynthèse-éclairage étant parabolique, une telle répartition énergétique peut conduire à une meilleure production [1].

RÔLE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES

Les propriétés thermiques des organes végétaux (capacité calorifique-conductibilité) interviennent d'une part, au niveau des températures d'équilibre et de leur répartition, mais aussi au niveau des fluctuations diurnes telles que le refroidissement nocturne avec les possibilités de températures minimales pouvant provoquer des dommages.

En effet, le terme de capacité calorifique globale pour une culture est suffisamment faible pour qu'en cours de journée en présence de forts flux d'échanges (rayonnement net ou évapotranspiration) ce terme soit assez négligeable. Par contre, lors de flux faibles (cas de la nuit et du refroidissement dû au bilan radiatif négatif) ce terme n'est pas entièrement négligeable et peut jouer un rôle plus ou moins important. Son rôle peut aussi être non négligeable lorsqu'il y a une brusque variation d'énergie (cas des passages nuageux) conduisant à des erreurs systématiques au niveau du bilan d'énergie, s'il n'est pas pris en considération.

Rappelons enfin que les cinétiques de température en tant qu'analyse du bilan d'énergie et de certaines de ses composantes, en particulier au niveau d'un organe tel une feuille, est une technique permettant, soit la mesure des résistances stomatiques [5], soit celle du rayonnement absorbée ou de la capacité calorifique de l'organe [6]. Cette capacité calorifique permet de suivre, par exemple, le contenu en eau de la feuille donc le déficit hydrique de la plante.

CONCLUSION

Cette analyse successive de divers aspects des propriétés physiques des plantes en liaison avec leur structure et leur anatomie, souligne que nombreux sont les points d'impact sur la consommation en eau, la production et finalement l'efficacité. A partir de la connaissance du fonctionnement d'une culture de nombreux efforts peuvent-être faits dans la recherche des critères et des paramètres physiques exactes qui permettraient d'intervenir dans le sens d'une amélioration de la production et de l'efficacité de l'eau.

REFERENCES

1. Chartier P.: Lumière, eau et production de matière sèche du couvert végétal. *Ann. Agron.*, 18, (3), 301—331, 1967.
2. Inoue E.: Studies of the phenomena of waving plants caused by wind. Part. 1: Mechanism and characteristics of waving plants phenomena. *J. Agric. Met.*, 11, 18—22, 1955.

3. Lemeur R., Rosenberg N. J.: Reflectant induced modification of the radiation balance for increased crop water use efficiency. In "Heat and mass transfer in the biosphere. Part. 1. Transfer processes in the plant environment", De Vries D.A. and Afgan N.H. Ed., Scripta Book. Co. Washington, 479—488, 1975.
4. Maki T., Takami S., Shinjo A.: On zero-plane displacement and roughness length in the wind profile over a sorgho canopy. *J. Agric. Meteor.*, 24, (3), 127—132, 1968.
5. Parcevaux S. de Perrier A.: Bilan énergétique de la feuille. Application de l'étude des cinétiques de température à la détermination des résistances aux flux gazeux. In: „Réponse des plantes aux facteurs climatiques”, Actes du Colloque UNESCO, Uppsala, Sept. 1970, UNESCO, Ecologie et Conservation, 5, 127—135, Paris 1973.
6. Perrier A.: Contribution à l'étude des échanges thermiques en biologie végétale. Emploi du photothermomètre de surface pour la détermination du bilan énergétique des feuilles. *Rev. Génér. Thermique*, (79/80), 721—740, 1968.
7. Perrier A.: Methods of observation of heat and mass transfer in the lower atmosphere and in plant canopies. In: „Heat and mass transfer in the biosphere. Part 1. Transfer processes in the plant environment”, Seminar, Dubrovnik, Aug. 1974, Intern. Cent. Heat Mass Transfer, De Vries D.A. and Afgan N.H. ed., Scripta Book Co, John Wiley and sons, Washington D.C., 229—249, 1975.
8. Perrier A.: Etude et essai de modélisation des échanges de mass et d'énergie au niveau des couverts végétaux. Profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette. Thèse, Dr ès Sciences Physiques, Université Pierre et Marie Curie, Paris-6, 29 Avril 1976.
9. Seguin B.: Rugosité du paysage et évapotranspiration potentielle à l'échelle régionale. *Agric. Meteor.*, 11(1), 79—98, 1973.

A. Perrier

EWAPORACJA I FOTOSYNTENZA JAKO FUNKCJE CECH STRUKTURALNYCH ROŚLIN

Streszczenie

Właściwości fizyczne odgrywają ważną rolę w procesach życiowych roślin. Szczególne znaczenie mają cechy geometryczne, mechaniczne (sprężystość, sztywność, twardość), radiacyjne (absorpcja, przepuszczalność, odbicie) i dyfuzyjne, związane ze strukturą tkanek (dyfuzja wody i gazu).

Moment absorpcji i ogólna charakterystyka wymiany są znacznie modyfikowane przez wiele z tych cech. Absorpcja radiacyjna (energia i PHAR) zmienia się również w ich funkcji.

Modyfikacje te są ściśle związane z procesami zużycia wody i fotosyntezy. W rezultacie wydajność wody jest bardzo szeroko modyfikowana i uzależniona od wielu czynników, stąd też uzasadnionym wydaje się elementarny wybór niektórych właściwości roślin do tego typu badań.

А. Перьер

ЭВАПОРАЦИЯ И ФОТОСИНТЕЗ КАК ФУНКЦИИ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ РАСТЕНИЙ

Резюме

Физические свойства играют важную роль в жизненных процессах растений. Особенное значение имеют свойства: геометрические, механические (упругость, жесткость, твердость), радиационные (абсорбция, проницаемость, отражение) и диффузионные, связанные со структурой тканей (диффузия воды и газа).

Момент абсорбции и общая характеристика обменов в значительной степени модифицируются многими из этих свойств. Радиационная абсорбция (энергия и PHAR) изменяется также в их функции.

Эти модификации тесно связаны с процессами расхода воды и фотосинтеза. В результате водопродуктивность модифицируется очень широко и зависит от многих факторов, в связи с чем правильным кажется альтернативный выбор некоторых свойств растений для этого типа исследований.

Address of the author

Dr Alain Perrier,
Institut National de la Recherche Agronomique, Route de Saint-Cyr,
78000 Versailles, France