

DIFFUSION TURBULENTE AU-DESSUS ET A L'INTÉRIEUR D'UN COUVERT VÉGÉTAL : APPLICATION A L'ÉTUDE DES FLUX DE CHALEUR ET DE MASSE

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 22 novembre 1968

PAR G. GUYOT

Introduction

La production de matière sèche d'un couvert végétal est étroitement liée à l'absorption de la lumière et au flux de chaleur et de masse (vapeur d'eau, gaz carbonique) qu'il échange avec l'atmosphère; aussi, au sein du Département de Bioclimatologie de l'I.N.R.A. des études sont poursuivies pour analyser les transferts turbulents au-dessus et à l'intérieur d'une culture afin de connaître *in situ* et à chaque instant la photosynthèse d'un couvert végétal, d'une tranche de végétation ou d'une feuille. Le but final de ces travaux sera d'établir des relations d'interdépendance entre la photosynthèse, les facteurs climatiques et les caractéristiques géométriques des plantes ou des cultures. A partir de ces relations il sera alors possible d'envisager une optimisation de la production.

Ce programme est certes très ambitieux, tous les problèmes sont loin d'être résolus et d'être même clairement posés. Mais, en particulier dans le domaine de la turbulence, un certain nombre de résultats ont déjà été obtenus soit sur le plan théorique, soit sur le plan expérimental. Aussi, dans cet exposé, nous allons rapidement les passer en revue et voir les perspectives d'utilisation qu'ils offrent. C'est pourquoi nous étudierons tout d'abord les lois de l'écoulement de l'air au-dessus et à l'intérieur d'une végétation, puis nous verrons quelques applications de ces résultats.

Écoulement de l'air au-dessus et à l'intérieur d'un couvert végétal

1. Les flux.

Les expressions de base fournissant les densités de flux, quel que soit le niveau où l'on se place, s'expriment en fonction des gradients de concentration ou de température et peuvent s'écrire de la façon suivante :

pour l'énergie mécanique :

$$\varphi_M(z) = -\rho K_M(z) \frac{\partial \bar{u}(z)}{\partial z} \quad (1)$$

pour la chaleur :

$$\varphi_T(z) = -\rho C_p K_T(z) \frac{\partial T(z)}{\partial z} \quad (2)$$

pour l'énergie de chaleur latente (correspondant au flux de vapeur d'eau) :

$$\varphi_L(z) = -\rho L K_e(z) \frac{\partial e(z)}{\partial z} \quad (3)$$

pour le gaz carbonique :

$$\varphi_c(z) = -\rho K_c(z) \frac{\partial c(z)}{\partial z} \quad (4)$$

avec :

- T température absolue;
- c, e concentrations massiques en gaz carbonique et vapeur d'eau;
- z hauteur au-dessus du plan de référence;
- ρ masse volumique de l'air;
- C_p chaleur massique de l'air à pression constante;
- L chaleur latente de vaporisation de l'eau;

* Chargé de Recherches, Station de Bioclimatologie, C.R.A.S.E. (I.N.R.A.), domaine Saint-Paul, 84 - Montfavet.

K_M coefficient de transfert d'énergie mécanique ou viscosité turbulente;
 K_T, K_e, K_c coefficients de transfert ou diffusivités turbulentes pour les grandeurs correspondantes.

Pour déterminer les flux échangés par une végétation, il suffit donc de mesurer les gradients correspondant aux différents facteurs climatiques, à condition de connaître les coefficients de transfert. Généralement il est admis que les différents coefficients de transfert K_T, K_e, K_c sont sensiblement égaux à K_M , ce qui revient à faire l'hypothèse que les couches limites relatives aux différentes grandeurs se déduisent les unes des autres par une simple similitude. Il faut donc déterminer K_M , ce qui est possible à partir de la mesure des profils verticaux de vitesse, à condition d'admettre les hypothèses de Prandtl.

2. Profils de vitesse au-dessus d'une culture.

Dans un écoulement turbulent, le flux de quantité de mouvement ou contrainte de Reynolds est donné par :

$$\tau = \psi_M = -\rho \bar{u}' w' \quad (5)$$

u' et w' sont les fluctuations de la vitesse telles que :

$$u = \bar{u} + u' \quad \text{avec } \bar{u}' = 0$$

$$w = \bar{w} + w' \quad \text{avec } \bar{w}' = 0$$

La mesure directe des fluctuations étant délicate, Prandtl a donné une expression du profil de vitesse en couche limite turbulente permettant de calculer K_M à partir des mesures de vitesse moyenne. Il a été amené pour cela à introduire trois hypothèses :

— tout d'abord, en remarquant qu'il existait une certaine analogie entre les mouvements turbulents et les mouvements moléculaires, il a introduit la longueur de mélange : l , analogue en partie au libre parcours moyen de la théorie cinétique des gaz, telle que :

$$u' = l \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6)$$

ce qui revient à dire que les fluctuations sont proportionnelles au gradient de vitesse, et entraîne pour une turbulence homogène :

$$\tau = -\rho l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (7)$$

— il suppose également que les fluctuations de vitesse sont proportionnelles à la distance à la paroi ce qui équivaut à :

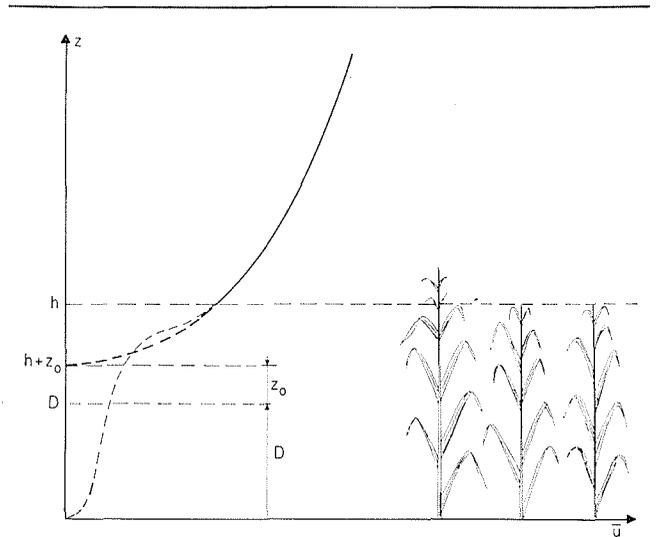
$$l = kz \quad (8)$$

($k = 0,41$ constante de Von Karman);

— enfin il suppose que le flux de quantité de mouvement est constant dans toute la couche limite, c'est-à-dire que :

$$\tau = \tau_p = \text{Cte} \quad (9)$$

(τ_p : contrainte pariétale);



1/ Représentation schématique du profil de vitesse au-dessus d'une culture.

Diagrammatic velocity profil above a crop.

et en posant $\sqrt{(\tau_p/\rho)} = u_*$ (vitesse de frottement) il aboutit à l'équation différentielle :

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{u_*}{kz} \quad (10)$$

qui après intégration donne l'expression du profil logarithmique :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \log \frac{z}{z_0} \quad (11)$$

(z_0 : paramètre de rugosité).

Lorsque le sol est recouvert d'une végétation de hauteur h , le plan de référence (plan zéro du profil logarithmique) est soulevé d'une hauteur D appelée hauteur de déplacement (fig. 1) et le profil de vitesse s'exprime alors par :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \log \frac{z - D}{z_0} \quad (12)$$

Cette expression conduit à celle de la viscosité turbulente $K_M(z)$ à partir des relations (1) (5) (7) (8) (10) :

$$K_M(z) = k(z - D)u_* \quad (13)$$

A partir des profils verticaux de vitesse il restera à déterminer D et u_* . Cette détermination peut se faire graphiquement par exemple en prenant un système d'axes [$\bar{u}, \log(z - D)$] dans lequel la fonction (12) se représente par une droite de pente k/u_* , la valeur de D étant trouvée par approximations successives.

3. Profils de vitesse au sein d'un couvert.

L'étude de la microturbulence au sein d'un couvert végétal a été abordée théoriquement et expérimentalement depuis quelques années [Ciongo (1965), Denmead (1964), Inoue (1963, 1965, 1968), Lemon (1963, 1964, 1966, 1968), Philips (1964), Saito (1963), Takeda (1964), Uchijima (1962)]. Mais

les solutions proposées ne permettent pas de représenter tout le profil de vitesse dans un couvert végétal. Par contre les travaux de Perrier (*) (1968) que nous allons présenter apportent une solution théorique à ce problème. Pour cela, il a été amené à reprendre une démarche semblable à celle qui a été suivie par Prandtl dans l'établissement du profil logarithmique mais en introduisant les hypothèses supplémentaires.

A - PREMIÈRE HYPOTHÈSE.

Si l'on considère un couvert végétal homogène suivant un plan horizontal, la seule variable d'espace étant alors la hauteur (z), il sera caractérisé par sa densité de surface foliaire, f(z) et par sa surface foliaire cumulée F(z) à partir de la hauteur moyenne h de la végétation :

$$F(z) = \int_z^h f(z) dz \tag{14}$$

La première hypothèse introduite par Perrier se rapporte à la longueur de mélange. Il pose que la longueur de mélange est proportionnelle à la distance moyenne entre un point et l'ensemble des feuilles qui sont vues directement de ce point. Cette hypothèse revient à poser :

$$l(z) = \frac{k'}{f(z)} \tag{15}$$

k' est une constante et elle prend la valeur k (π/2) (~ 0,6) si elle est calculée dans le cas d'une épaisseur de végétation e dans laquelle les feuilles sont réparties de façon aléatoire et sont de petite dimension devant e.

B - DEUXIÈME HYPOTHÈSE.

Dans l'air la contrainte turbulente avait été supposée constante (9). Dans la végétation les feuilles s'opposent à l'écoulement de l'air et exercent un effort de traînée. Cet effort τ_x(z), rapporté à l'unité de surface de feuille, peut s'écrire pour une hauteur z :

$$\tau_x(z) = \frac{1}{2} C_x \rho \bar{u}^2(z) \tag{16}$$

C_x est le coefficient moyen de traînée. Il peut être considéré comme indépendant du nombre de Reynolds dans la gamme des vitesses rencontrées dans les conditions naturelles. Les résultats expérimentaux montrent qu'il peut également être considéré comme constant sur toute la hauteur de végétation.

Le freinage exercé par les feuilles sur l'écoulement de l'air se traduit par une augmentation de la contrainte tangentielle τ(z) égale à [∂τ(z)/∂z] dz. Cette force de freinage exercée par la tranche d'épaisseur dz est égale à :

$$\tau_x f(z) dz$$

d'où :

$$\tau_x(z) f(z) = \frac{\partial \tau(z)}{\partial z} \tag{17}$$

(*) PERRIER (A.) : Chargé de Recherches, Station Centrale de Bioclimatologie, C.N.R.A. (I.N.R.A.), route de Saint-Cyr, 78 - Versailles.

C - EXPRESSION DU PROFIL DE VITESSE.

L'expression (7) est valable également dans le cas d'une végétation. Aussi en la combinant aux expressions (15) (16) et (17), on obtient l'équation différentielle homogène du second ordre :

$$\frac{\partial^2 \bar{u}(z)}{\partial z^2} \cdot \frac{\partial \bar{u}(z)}{\partial z} - \frac{f'(z)}{f(z)} \left(\frac{\partial \bar{u}(z)}{\partial z} \right)^2 - \frac{C_x}{4 k'^2} f^3(z) \bar{u}^2(z) = 0 \tag{18}$$

(f'(z) dérivée de f(z) par rapport à z), qui fournit une solution particulière du type :

$$\bar{u}(z) = \alpha e^{-\gamma F(z)} \tag{19}$$

avec :

$$\gamma = \sqrt[3]{\frac{C_x}{4 k'^2}} \tag{20}$$

Elle répond aux conditions aux limites $\bar{u}(z)$ égal à $\bar{u}(h)$ pour z égal à h (hauteur moyenne de la végétation) [si α = $\bar{u}(h)$] et $\bar{u}(z)$ voisin de zéro pour z nul puisque la surface foliaire cumulée, F(z) est généralement grande (4 à 6); par ailleurs elle semble être en assez bon accord avec les quelques résultats expérimentaux dont on puisse disposer.

L'expression donnant le profil de vitesse au sein du couvert végétal s'écrira donc :

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(h) e^{-\gamma F(z)} \tag{21}$$

Les relations (1) (7) (15) et (21) permettent alors d'exprimer la viscosité turbulente :

$$K_M(z) = \bar{u}(h) k'^2 \gamma \frac{e^{-\gamma F(z)}}{F(z)^2} \tag{22}$$

A partir de l'expression (20) il est possible d'exprimer également le coefficient moyen de traînée :

$$C_x = 4 k'^2 \gamma^3 \tag{23}$$

D - CONDITIONS AUX LIMITES.

Mais ces expressions sont valables uniquement au sein du couvert végétal. En effet l'hypothèse (15) relative à la longueur de mélange n'est plus valable aux deux bornes (z = h et z = 0); elle supposait en effet une densité de surface foliaire relativement homogène sur une épaisseur d'autant plus grande que f(z) est plus petit, car le point considéré doit se trouver au centre d'une épaisseur de feuilles e telle que la demi-épaisseur e/2 soit au moins égale à l(z) ce qui pour k' = 0,6 donne le tableau de correspondance suivant entre f(z) et e/2.

Tableau 1	
f(z)	e/2
0,2	3,0
0,5	1,2
1,0	0,6
2,0	0,3
3,0	0,2
m ⁻¹	m

a) Au voisinage du sommet de la culture le tableau 1 laisse penser que le profil logarithmique sera encore valable pour les faibles densités de surfaces foliaires ce qui est d'ailleurs confirmé par l'expérience.

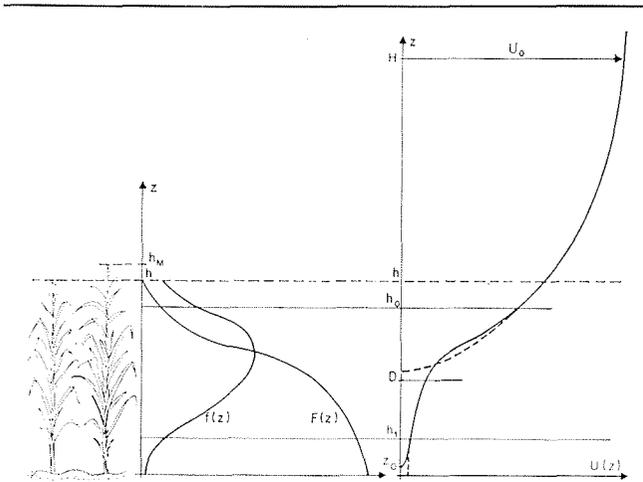
On suppose le profil logarithmique exploitable jusqu'à la profondeur h_0 , hauteur pour laquelle le profil exponentiel (21) devient valable (fig. 2). h_0 est donc défini par la relation qui à $F(h_0)$ fait correspondre une demi-épaisseur $e/2$ égale à $(h - h_0)$ (tableau 1). Au niveau h_0 le raccordement des deux profils entraîne l'égalité des longueurs de mélange et des viscosités turbulentes. Ce qui permet d'écrire les relations suivantes :

d'après (21) :

$$\alpha = \bar{u}(h_0) e^{\gamma F(h_0)} \quad (24)$$

d'après (8) et (15) :

$$k' = k(h_0 - D) f(h_0) \quad (25)$$



2/ Représentation schématique du profil de vitesse au-dessus et à l'intérieur d'une végétation et représentation de la surface foliaire cumulée $F(z)$ et de la densité de surface foliaire $f(z)$.

Schematic velocity curves above and in vegetation, showing cumulative foliage area $F(z)$ and foliage surface density $f(z)$.

et d'après (13) et (22) en remarquant que $e^{-\gamma F(h_0)} \approx 1$:

$$\gamma \approx \frac{u_*}{k(h_0 - D) f(h_0) \bar{u}(h_0)} \quad (26)$$

Ces égalités permettent d'obtenir la viscosité turbulente et le coefficient moyen de traînée :

$$K_M(z) = k(h_0 - D) u_* \frac{F(h_0)}{F(z)} e^{-\gamma[F(z) - F(h_0)]} \quad (27)$$

$$C_x = \frac{4 u_*^3}{k(h_0 - D) \bar{u}^3(h_0) F(h_0)} \quad (28)$$

b) Au voisinage du sol, $F(z)$ est faible et pratiquement constant, car il n'y a que des tiges qui n'occupent que quelques pour cent du volume. Dans ces conditions on peut s'attendre à retrouver un profil logarithmique, comme l'a souligné et vérifié Takeda (1964). Aussi on peut poser :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*'}{k} \log \frac{z}{z_0} \quad (29)$$

z_0 est le paramètre de rugosité du sol et u_*' la vitesse de frottement de ce nouveau profil.

Ce profil logarithmique se raccorde au profil exponentiel à la hauteur h_1 . Les conditions limites entraînent :

$$h_1 F(h_1) = (h_0 - D) F(h_0) \quad (30)$$

$$u_*' = u_* e^{-\gamma[F(h_1) - F(h_0)]} \quad (31)$$

$$z_0 = h_1 e^{-[ku(h_0)/u_*]} \quad (32)$$

La viscosité turbulente au voisinage du sol est donc :

$$K_M(z) = k u_* e^{-\gamma[F(h_1) - F(h_0)]} \quad (33)$$

pour $z_0 < z < h_1$

Ainsi l'ensemble du profil de vitesse et du coefficient de transfert dynamique peut être déterminé pour un couvert végétal en fonction de ses caractéristiques géométriques ($F(z)$, h , D , u_*).

La loi proposée a été vérifiée à partir des données expérimentales obtenues par Ellis Hollow (*) (1963) sur maïs et la figure 3 montre un assez bon accord entre le profil théorique de vitesse et le profil expérimental. La figure 4 représente pour cette même culture le profil théorique du coefficient de transfert dynamique.

Applications

1. Limite de validité des hypothèses émises.

Pour pouvoir représenter le profil de vitesse au-dessus et à l'intérieur d'un couvert végétal, nous avons été amené à admettre un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui ne se justifient pas toujours dans les conditions naturelles.

A - INFLUENCE DU PROFIL THERMIQUE SUR LE PROFIL DE VITESSE.

L'équation représentant le profil vertical de vitesse au-dessus de la végétation n'est valable qu'en condition de neutralité thermique. En effet, le profil thermique influe sur la stabilité de l'air et donc sur la turbulence. Aussi, de nombreuses études théoriques ont été entreprises récemment à partir notamment des travaux de Monin et Oboukhov, pour représenter le profil de vitesse dans une couche limite turbulente dans laquelle existe un gradient de température. Plusieurs expressions ont été données pour le profil de vitesse et la plus utilisée est celle du profil log-linéaire :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \left[\log \frac{z - D}{z_0} + \alpha \frac{z - D}{L} \right] \quad (34)$$

dans laquelle α est une constante et L une longueur qui intègre les caractéristiques du profil de vitesse et du profil thermique (L : longueur de Monin-Oboukhov) :

$$L = - \frac{u_*^3 C_x \rho T}{k g \phi T} \quad (35)$$

g accélération des forces due à la pesanteur;
 ϕT flux vertical de chaleur.

(*) Lemon (1963).

Cependant il faut remarquer que lorsque les phénomènes dynamiques l'emportent sur les phénomènes thermiques (c'est-à-dire lorsque ϕ_T est petit), L est grand et le terme correctif $\alpha(z - D/L)$, devient négligeable. La loi logarithmique peut encore s'appliquer.

Lorsque l'on s'écarte des conditions de la neutralité, le terme correctif ne peut être négligé que si $z - D$ est petit. Ainsi, lorsque les gradients thermiques seront importants, la loi logarithmique ne pourra s'appliquer que dans le voisinage immédiat de la surface du sol.

B - EGALITÉ DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT.

Nous avons supposé l'égalité des coefficients de transfert; cela n'est qu'une approximation qui se justifie dans notre premier travail d'approche. Mais il est bien évident qu'il faudra tenir compte de la variation du rapport des coefficients de transfert K_v/K_M et K_T/K_M .

C - LA STRUCTURE DU COUVERT VÉGÉTAL.

L'équation donnant le profil de vitesse dans une culture a été établie pour une végétation homogène sur un plan horizontal dont les feuilles sont de petite dimension devant l et sont orientées de façon aléatoire. Ce modèle est une schématisation extrême d'un couvert végétal. Les feuilles ont généralement une orientation préférentielle et elles ne sont pas toujours de petite dimension. Des termes correctifs devront donc être introduits par la suite.

2. La diffusion à l'intérieur d'un couvert végétal.

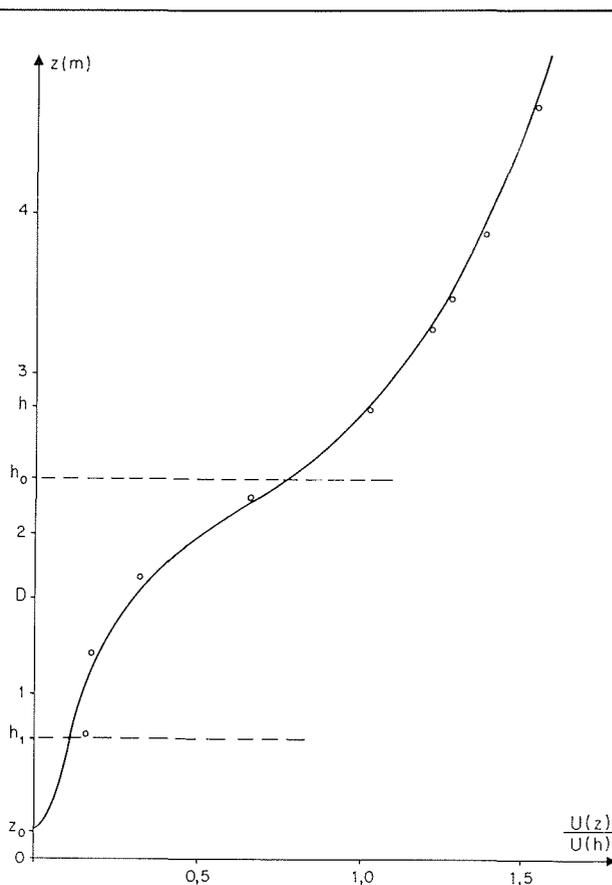
Nous avons vu que l'ensemble du profil de vitesse et du coefficient de transfert dynamique peut être déterminé pour un couvert végétal en fonction de ses caractéristiques géométriques [$f(z), h, D, u_s$]. La connaissance de K_M permettra de déterminer expérimentalement la photosynthèse nette pour chaque tranche de végétation considérée. Il sera alors possible de localiser les zones de meilleure production à un instant donné et de suivre en fonction de la croissance et du développement des végétaux (variation des caractéristiques géométriques) l'évolution et le poids respectifs de ces différentes zones, vis-à-vis de la production globale.

Ces études de la photosynthèse devraient conduire à la définition de valeurs optimales des différents paramètres caractérisant une végétation à chaque niveau, pour obtenir une production maximale. Cela permettrait d'envisager la création de couverts végétaux ayant une meilleure productivité en jouant sur les associations d'espèces, les densités de semis, le choix des variétés...

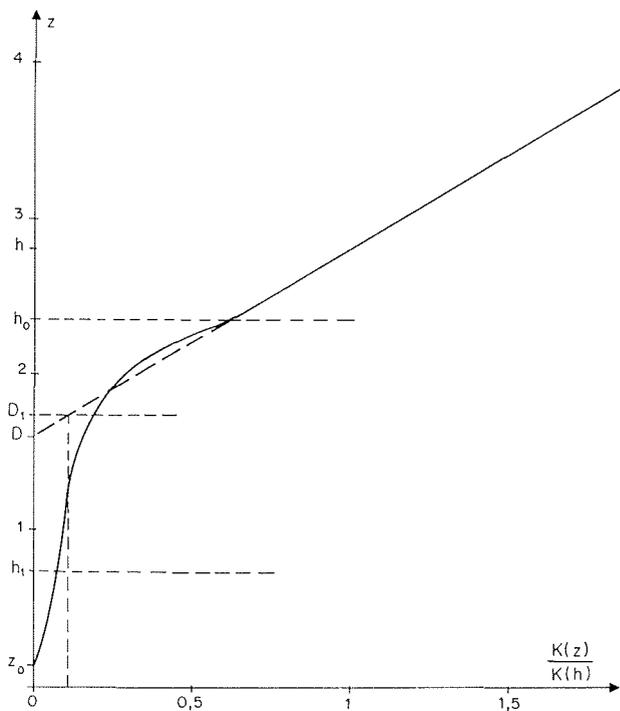
3. Les échanges au-dessus d'un couvert végétal.

A - INTÉRÊT BIOLOGIQUE DES MODIFICATIONS DES ÉCHANGES D'UN COUVERT VÉGÉTAL.

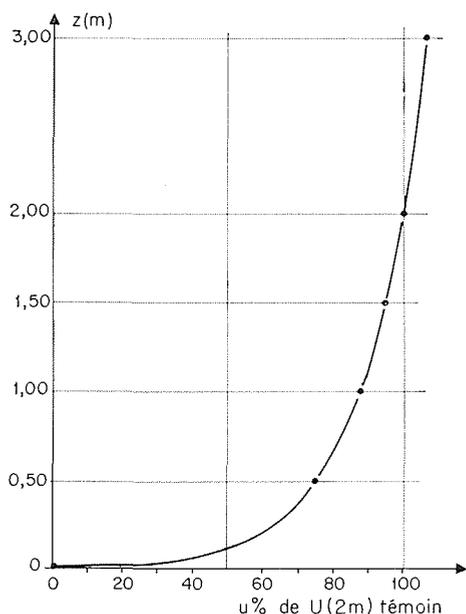
Il peut être parfois intéressant de réduire les échanges d'un couvert végétal avec le milieu extérieur. En effet la vapeur d'eau et le gaz carbonique (nécessaire à la photosynthèse) transitent par les pores microscopiques de l'épiderme foliaire : les stomates. Lorsque les facteurs climatiques demandent à la plante de fournir une quantité d'eau supé-



3/ Profil théorique de vitesse et points expérimentaux pour une culture de maïs.
Theoretical velocity curve and test points for a maize crop.



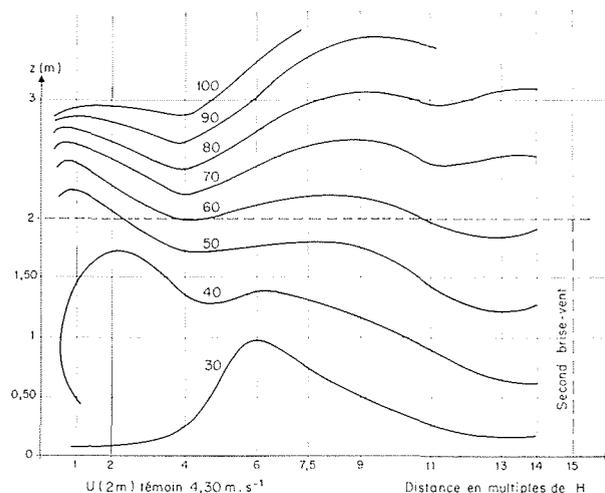
4/ Profil théorique du coefficient de transfert pour une culture de maïs.
Theoretical transfer coefficient curve for a maize crop.



5/ Profil expérimental de vitesse sur sol nu en zone témoin.
Experimental bare ground velocity curve for the reference area.

Profil de vitesse témoin $Z_0 = 6,5$ mm. $U(2\text{ m}) = 4,30$ m/s, $U_* = 0,306$ m/s.

Reference velocity curve $Z_0 = 6.5$ mm. $U(2\text{ m}) = 4.30$ m/s, $U_* = 0.306$ m/s.



6/ La Minière, 21 décembre 1967. — Courbes iso-vitesse horizontale entre deux brise-vent perméables de 2 m de haut espacés de 15 fois leur hauteur. La valeur 100 a été donnée à la vitesse à 2 m en témoin et toutes les autres vitesses ont été exprimées en fonction de celle-ci.

La Minière, 21st December, 1967. — Constant horizontal velocity curves between two 2 m high permeable wind-breaks spaced 15 times their height apart. The velocity for 2 m is taken as 100 and all others are stated in terms of it.

rieure à celle qu'elle est susceptible de débiter, elle réagit contre le dessèchement en fermant partiellement ou totalement ses stomates. Mais ce ralentissement des échanges de vapeur d'eau s'accompagne aussi d'une réduction des échanges de gaz carbonique et donc de la photosynthèse (*).

Un moyen d'accroître la production d'une culture sera donc de diminuer la quantité d'eau demandée par unité de surface foliaire en accroissant $F(z)$ (associations culturales, densités de semis) ou encore en diminuant le coefficient de transfert de vapeur d'eau.

B - MODIFICATIONS DES ÉCHANGES D'UN COUVERT VÉGÉTAL PAR L'EMPLOI DE BRISE-VENT.

Dans une couche limite turbulente le coefficient de transfert est donné par (13) :

$$K_M(z) = k(z - D) u_*$$

ce qui d'après (10) peut s'écrire :

$$K_M(z) = k^2(z - D) \frac{d\bar{u}(z)}{dz} \quad (36)$$

Par conséquent, pour diminuer les échanges au niveau de la surface supérieure d'une culture, il faudra diminuer le gradient de vitesse, ce qui revient, la surface ayant une rugosité constante, à réduire la vitesse.

Les brise-vent permettent cette réduction de la vitesse au voisinage de la surface du sol. Mais l'écoulement dans la zone qu'ils protègent ne cor-

respond plus à celui d'une couche limite turbulente et les méthodes qui viennent d'être envisagées pour mesurer les flux échangés ne peuvent plus s'appliquer.

La figure 5 représente les courbes iso-vitesses observées entre deux brise-vent perméables (coefficient de perte de charge 2,6, porosité géométrique 50 %) espacés de quinze fois leur hauteur. Le profil vertical de vitesses correspondant, en zone témoin, est représenté sur la figure 6. Toutes les vitesses sont exprimées en valeur relative; la valeur 100 a été donnée à la vitesse mesurée en témoin à la hauteur de la crête du brise-vent (2 m).

La comparaison de ces deux figures permet de constater que le brise-vent a eu pour effet de réduire le gradient de vitesse au voisinage du sol et par contre de l'accroître à partir d'une altitude voisine de sa hauteur. Il y aurait donc à ce niveau une discontinuité du coefficient de transfert d'énergie mécanique dont l'incidence sur les flux de chaleur et de masse (vapeur d'eau, gaz carbonique) ne peut être déterminée à partir des lois classiques de la diffusion turbulente.

Les études actuellement poursuivies en soufflerie et dans les conditions naturelles visent précisément à déterminer les profils verticaux des différents coefficients de transfert dans la zone perturbée par un brise-vent.

Actuellement les études ont surtout porté sur la détermination des effets aérodynamiques des brise-vent sans épaisseur. Elles ont permis de constater qu'il existait une porosité ou un coefficient de perte de charge optimal pour un brise-vent. En particulier pour un brise-vent sans épaisseur, la porosité optimale est voisine de 50 %. Un tel brise-

(*) *L'Eau et la Production végétale*, I.N.R.A. Paris (1964).

vent protège une zone dont la longueur est comprise entre 15 et 25 fois sa hauteur selon les conditions de turbulence du flux d'air incident.

Lorsque les études à l'échelle d'un brise-vent isolé auront abouti, il est envisagé de voir l'influence de la rugosité d'une petite région sur les transferts dans la base atmosphère et ses répercussions sur le climat local.

Conclusion

Dans cet exposé nous avons essayé de montrer tout l'intérêt que pouvait présenter l'étude des transferts turbulents au-dessus et à l'intérieur d'un couvert végétal pour les agronomes. Ces recherches poursuivies parallèlement, à des échelles d'espace et de temps différentes, permettent d'avoir une connaissance d'ensemble des problèmes; elles devraient conduire rapidement à des applications pratiques importantes allant de la modification des paramètres géométriques de la végétation : port et surface foliaire, densité de semis, association culturale, ..., jusqu'à l'aménagement du territoire par un quadrillage de brise-vent.

Bibliographie

CIONCO (R.M.). — A mathematical model for air flow in a vegetative canopy. *J. App. Meteor.*, 4, 4 (1965) 517-522.

DENMEAD (O.T.). — Evaporation sources and apparent diffusivities in a forest canopy. *J. App. Meteor.*, 3 (1964), 383-389.

GUYOT (G.). — Les brise-vent. Modification des microclimats et amélioration de la production agricole. *L'eau et la production végétale*, I.N.R.A. (1964), 243-303.

INOUE (E.). — The environment of plant surface. In *Environmental Control of Plant Growth*. New York and London, *Academic Press* (1963), 23-32.

INOUE (E.). — On the turbulent structure of air flow within crop canopies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 41 (1963), 317-326.

INOUE (E.). — On the CO₂ concentration profiles within crop canopies. *J. Agric. Meteor. Japan*, 20, 4 (1965), 141-146.

LEMON (E.R.). — Energy and water balance of plant communities. In *Environmental Control of Plant Growth*. New York and London, *Academic Press* (1963), 58-78.

LEMON (E.R.). — In aerodynamics studies of CO₂ exchange between the atmosphere and the plant (Ellis Hollow). (1963). Symposium "Photosynthesis", Chicago, Illinois (7-10-1966).

LEMON (E.R.) and al. — The energy budget at the earth's surface. Part II. Production Research Report, *U.S.D.A.*, n° 72 (1964).

LEMON (E.R.) and WRIGHT (J.L.). — Photosynthesis under field conditions. VIII. Analysis of windspeed fluctuation data to evaluate turbulent exchange within a corn crop. *Agron. J.*, 3 (1966), 255-261.

LEMON (E.R.). — The measurement of height distribution of plant community activity using the energy and momentum balance approaches. Copenhagen Symposium 1965, UNESCO. *Natural Resources Research*, V (1968), 381-389.

PERRIER (A.). — Approche théorique de la microturbulence et des transferts dans les couverts végétaux en vue de l'analyse de la production végétale (1968). *La Météorologie* (sous presse).

PHILIPS (J.R.). — Sources and transfer processes in the air layers occupied by vegetation. *J. Appl. Meteor.*, 3 (1964), 390-395.

SAITO (T.). — Wind velocity profil within plant communities. *J. Agric. Meteor. Japan*, 19, 2, 53-58 (1963).

TAKEDA (K.). — Turbulence in plant canopies. *J. Agric. Meteor. Japan*, 20, 1 (1964), 1-6.

UCHIJIMA (Z.). — Studies on the microclimate within the plant communities (I et II). *J. Agric. Meteor. Japan*, 18, 1 and 2, 1-10 (1962), 58-65.

Discussion

Président : M. A. CRAVA

M. le Président donne la parole à M. GUYOT et souligne que le travail présenté couvre plus spécialement la structure de l'écoulement à l'intérieur d'un couvert végétal.

M. GUYOT présente sa communication.

M. le Président remercie M. GUYOT en soulignant l'importance de différents problèmes d'échange dans le domaine agronomique; il est réconfortant de voir ce problème étudié en France car de nombreuses équipes s'y intéressent à l'étranger.

Après avoir rappelé la difficulté des vérifications expérimentales des théories exposées par M. GUYOT, M. RAVUSSIN (Lausanne) intervient en ces termes :

« La section « Protection de l'Air » de l'Institut de Météorologie a réalisé, pour ses études de pollution, un dispositif anémométrique nouveau qui mesure directement les composantes cartésiennes rectangulaires du vecteur vent (Système Nord-Est Zénith) au moyen de trois hélices à réponse cosinusoidale montées sur trois bras perpendiculaires. Ce système « N.E.Z. » assure la quantification de la mesure au niveau du capteur. Il permet le traitement automatique des données sous forme digitale. Un enregistreur magnétique lent et un lecteur de bande rapide autorisent le traitement en trois heures des résultats de 72 h de mesure. Ce système « N.E.Z. » est particulièrement utile lorsqu'on doit effectuer simultanément plusieurs mesures *in situ* ».

Les résultats passionnants que vient d'exposer le conférencier, dit M. THURRIOT, font penser à d'autres problèmes que l'on rencontre en hydrologie, en particulier, celui des pertes de charge d'une rivière qui déborde de son lit et inonde des zones de son lit majeur fortement boisées ou couvertes de végétation.

« Avez-vous songé à l'analogie entre écoulement d'air et écoulement d'eau ou avez-vous trouvé dans la littérature technique des renseignements qui aient pu orienter en ce sens ? »

« Le problème des brise-vent, répond M. GUYOT, a été traité assez peu en modèle hydraulique (il existe quelques mesures en canal); les mesures ont généralement été faites sur maquette aérodynamique. »

« Est-ce que la distribution des vitesses que vous avez montrée ne dépend pas de la grandeur de la vitesse prise comme référence demande M. HOUBEURT ? »

« Il semble, répond M. GUYOT, qu'il y ait assez peu de variations en fonction de la vitesse prise comme référence. Toutefois, nous avons travaillé dans des gammes de vitesses assez restreintes (entre 2 m/s et 12 m/s seulement); dans les conditions naturelles où nous nous trouvons, nous ne pouvons pas avoir des vents beaucoup plus forts. Nous avons obtenu des variations du profil des vitesses de l'ordre

de quelques pour-cent, c'est-à-dire comparables aux erreurs expérimentales. Il semble que le phénomène soit ici assez peu dépendant du nombre de Reynolds ».

M. le Président observe que l'intéressante analyse théorique de M. Guyot comporte des aspects sûrs (lien de la répartition du frottement tangentiel à la traînée) et des aspects pour lesquels on peut envisager des variantes, de sorte qu'il est préférable de ne retenir que les conclusions qui ne dépendent pas trop étroitement des hypothèses particulières utilisées.

Pour ces raisons, il est également toujours nécessaire pour ces types de problèmes, que l'analyse théorique soit assortie de comparaisons avec l'expérience. On pourrait ici s'intéresser non seulement au couvert végétal, mais à des modèles expérimentaux plus simples.

« Je suis tout à fait de votre avis, répond M. FORTIER; en

particulier, on aimerait avoir des résultats statistiques de mesures dans le couvert végétal en le schématisant peut-être. »

M. Guyot répond que, dans ce domaine, il existe dans la littérature de nombreux résultats expérimentaux mais fort peu d'interprétations théoriques; le but des travaux qu'il a présentés est en quelque sorte de modifier cet état de choses. Les calculs théoriques sont destinés à pousser plus loin l'interprétation des résultats d'observations disponibles.

Mais en ce qui concerne la remarque de M. le Président, M. Guyot signale qu'un dispositif expérimental est actuellement en cours d'installation afin de vérifier la validité de la théorie exposée.

M. le Président remercie encore M. Guyot de son intéressant exposé.

Abstract

Turbulent diffusion in and above vegetation and its application to heat and mass transfer research

by G. Guyot

Research is currently in progress at the Department of Bioclimatology of I.N.R.A. with a view to the analysis of turbulent transfer phenomena in and above growing crops in order to establish the photosynthesis of a full vegetation cover or a section of vegetation *in situ* and at any moment. A certain number of theoretical and experimental results which have been obtained are rapidly analysed. A theoretical internal velocity distribution for vegetation is established by exactly the same method as Prandtl used to find his expression for the logarithmic profile above a growth of vegetation. The two following new assumptions are made :

- (i) That the mixing length l is proportional to the reciprocal of leaf area per unit volume;
- (ii) A tangential stress varying with height and depending on leaf area density.

An exponential velocity profile relationship (19) followed from these assumptions. Solutions are put forward for the transition to the lower and upper parts of the considered vegetation. The boundary conditions enable both the velocity profile and the momentum transfer coefficient to be expressed solely in terms of the crop's geometrical characteristics (26) (27) (28).

Checks made against experimental data from other sources seem to confirm the various assumptions.

A different research category is concerned with transfers taking place above vegetation. Windbreaks enable the transfer coefficients of the areas they protect to be modified.

Possible applications of this research range from cropping techniques (crop associations, seeding densities, etc.) to the development of a whole area with a systematically laid out windbreak system.

* Chargé de Recherches, Station de Bioclimatologie, C.R.A.S.E. (I.N.R.A.), domaine Saint-Paul, 84 - Montfavet.