

température sèche et humide à partir de la hauteur de référence  $z_R$  et les valeurs absolues de ces températures à ce même niveau. Une seconde mesure de la concentration en vapeur d'eau était obtenue à l'aide d'un analyseur à point de rosée de l'air, mesure réalisée en même temps que celle du gaz carbonique. La précision d'un dixième de degré sur les écarts secs et humides n'était cependant pas toujours obtenue ; lorsqu'un capteur humide ne se trouvait pas bien alimenté en eau, il conduisait, en effet, à une valeur entièrement fautive de plusieurs dixièmes de degré.

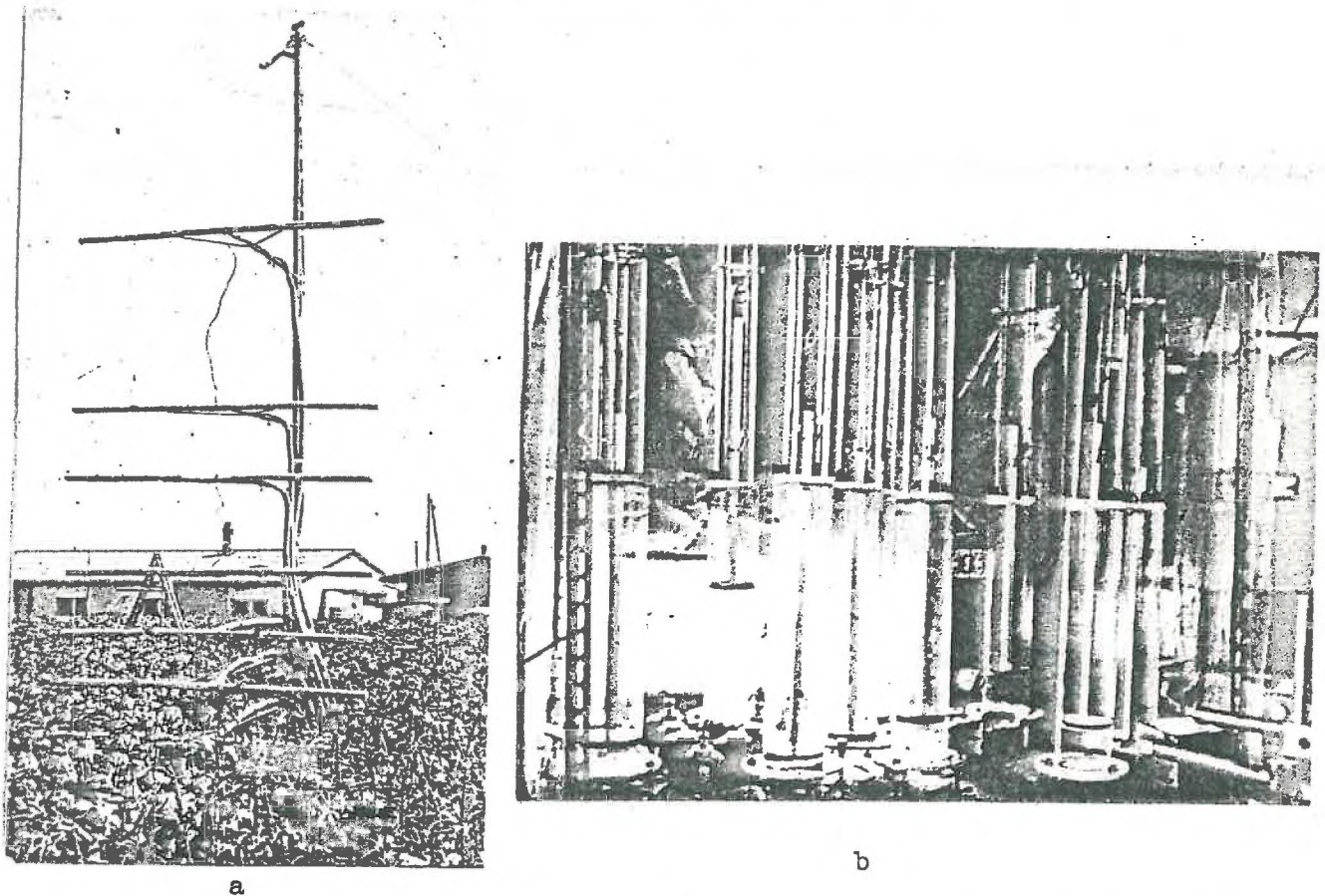


Fig.17. - a) Système linéaire de prélèvement de gaz pour l'analyse automatique des gradients de concentration en vapeur d'eau (analyseur à point de rosée) et de gaz carbonique (analyseur I.R 20 vpm pleine gamme).  
 b) Système de pistons pour emmagasiner le gaz pendant la période de mesure.

Mesure des concentrations de gaz carbonique (fig.17a, b)

L'impossibilité d'une mesure de  $CO_2$  en plein champ et à différents niveaux simultanément (LEMON 1960, DENMEAD 1968 et 1969) a fait concevoir un système linéaire horizontal de prélèvement du gaz (à chaque niveau est placé un tube horizontal percé de nombreux trous) ; chacun de ces tubes

est connecté au système unique d'analyse du gaz (80 m de distance) par tuyauterie chauffée, pour éviter toute condensation et dissolution du gaz le long des parois dans le film d'eau qui pourrait apparaître lors d'éventuelles condensations. Ce système comprend 5 pompes double-corps qui prélèvent en permanence l'air des dix niveaux et le conduisent au laboratoire où, à partir du début de la période de mesure (12 mn), une fraction de cet air est envoyée en compression dans les dix chambres cylindriques correspondantes munies d'un piston. A la fin du cycle de mesure de 12 mn de l'ensemble des grandeurs caractérisant les profils microclimatiques, des vannes se ferment et successivement chaque chambre se vide (cadence de 2 mn environ dont 1 mn à 1 mn 30 pour purger les canalisations et les analyseurs et 30 s pour la mesure). L'air de chaque niveau est alors envoyé à travers un analyseur de  $\text{CO}_2$  absolu, un analyseur de  $\text{CO}_2$  différentiel par rapport à l'air du niveau de référence et un analyseur à point de rosée pour la détermination conjointe de la concentration absolue du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, ainsi que celle du gradient de concentration en gaz carbonique avec le niveau de référence. Les analyseurs permettaient des précisions de  $\pm 0,5$  vppm pour une mesure différentielle qui ne dépasse pas 15-20 ppm et  $\pm 3$  à 5 vppm pour la mesure absolue du  $\text{CO}_2$ .

#### Mesure du profil de rayonnement net (fig. 18)

La mesure du bilan radiatif de toutes longueurs d'onde pour un niveau donné peut s'effectuer directement à l'aide de bilanmètres (cf. par. I.4.2.2b). Si cette mesure, quoique délicate, ne pose pas de difficultés majeures pour des mesures au-dessus du couvert, la grande hétérogénéité spatiale du rayonnement au sein du couvert ne permet plus aussi simplement d'en faire une mesure (ANDERSON 1966a et b, DENMEAD 1966, IMPENS et al. 1970). Pour palier cet inconvénient et profiter des 30 à 50 mesures réalisées pendant la période d'analyse de 12 mn, nous avons mis au point un système de chariot mobile supportant un bilanmètre linéaire qui, pour chaque niveau au sein du couvert, se déplace sur six mètres de longueur à une vitesse telle qu'il effectue un aller-retour pendant cette période de mesure. Ainsi nous obtenons une très bonne valeur moyenne du rayonnement net quelle que soit la variabilité horizontale de cette grandeur.

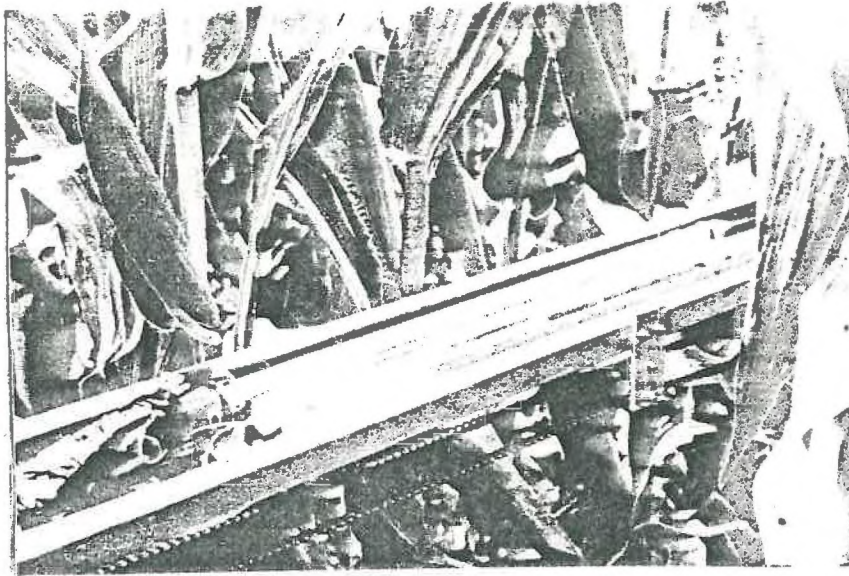


Fig. 18. - Système de chariot permettant l'analyse du rayonnement net (5 niveaux) à travers 6 m de végétation.

- Mesure du profil de température de surface des feuilles.

Ces mesures délicates, car jamais complètement automatiques, s'effectuaient de deux manières différentes : soit par fin thermocouple (chromel. constantan,  $\phi$  1 à 2/100 de mm) introduit dans la feuille (PERRIER 1966-1968) et qui nécessite une grande surveillance et une remise en place chaque matin avant le début des mesures, soit depuis ces dernières années, par radiomètre infrarouge (FUCH and TANNER 1966, PERRIER 1970a). Dans ce dernier cas, il n'est plus possible de faire des mesures simultanées à chaque niveau et le radiothermomètre, de manipulation délicate, nécessite un enregistrement propre et la présence continue d'un opérateur.

- Mesure des profils de Thoron

Il est important de souligner l'avantage, au moins théorique, de cette mesure (DRUILHET 1973) dont l'utilisation, en tant que méthode tout à fait indépendante des autres pour déterminer la diffusivité turbulente et par conséquent les flux, est séduisante. En effet, la détermination d'une diffusivité turbulente passe généralement par la mesure de deux grandeurs, un flux et un gradient. Ici, il est utilisé deux particularités importantes

du Thoron qui facilitent la mise en oeuvre de la méthode ; d'une part, celle d'être émis naturellement par tous les sols, donc de traverser tout le domaine que l'on cherche à explorer, et d'autre part, d'avoir une période de désintégration assez courte (50 s) pour être adapté aux problèmes de diffusion posés au sein des couverts (DRUILHET 1970).

A partir de la mesure du gradient de concentration en Thoron, il est possible de calculer :

- . le flux émis à partir d'une intégration en régime stationnaire de la quantité désintégrée dans l'ensemble de la masse d'air (cette masse peut être facilement réduite, compte tenu de la période de désintégration et des valeurs moyennes de diffusivités, à une zone de quelques mètres ou d'une dizaine de mètres au-dessus du sol),
- . et ainsi, par cette détermination secondaire du flux, le profil de diffusivité au sein et au-dessus du couvert (DRUILHET et PERRIER 1971).

Indépendamment des difficultés inhérentes à la technique de mesure, cette méthode supplémentaire confrontée aux méthodes plus classiques (DRUILHET et al. 1971) a donné des résultats satisfaisants et souligné le rôle parfois non négligeable d'une certaine convection thermique due à la non neutralité dans certaines zones du couvert.

De façon générale, les mesures de profils microclimatiques présentent toujours un certain nombre de recoupements : recoupement entre anémomètre Casella et fil chaud au sommet du couvert, recoupement entre psychromètre et température de point de rosée, recoupement entre mesure absolue de  $CO_2$  et mesure différentielle, et enfin recoupement entre mesures thermo-électriques et radiothermométriques. Tous ces recoupements permettent de préciser l'analyse de certaines données et par exemple de décider éventuellement d'en abandonner certaines pour cause de mauvais fonctionnement lorsqu'une différence trop grande apparaît entre deux mesures.

#### b) Mesure des densités de flux

Chaque fois qu'une technique ou qu'une méthode le permet, les mesures, les plus directes possibles, pour atteindre certaines densités de flux présentent un intérêt de vérification considérable. Ces mesures doivent aussi

avoir pour but d'être le plus complètement indépendantes des calculs que l'on peut envisager d'effectuer à partir de diverses méthodes (DENMEAD 1970, PERRIER et SEGUIN 1970) basées sur les mesures précédentes de profils micro-climatiques.

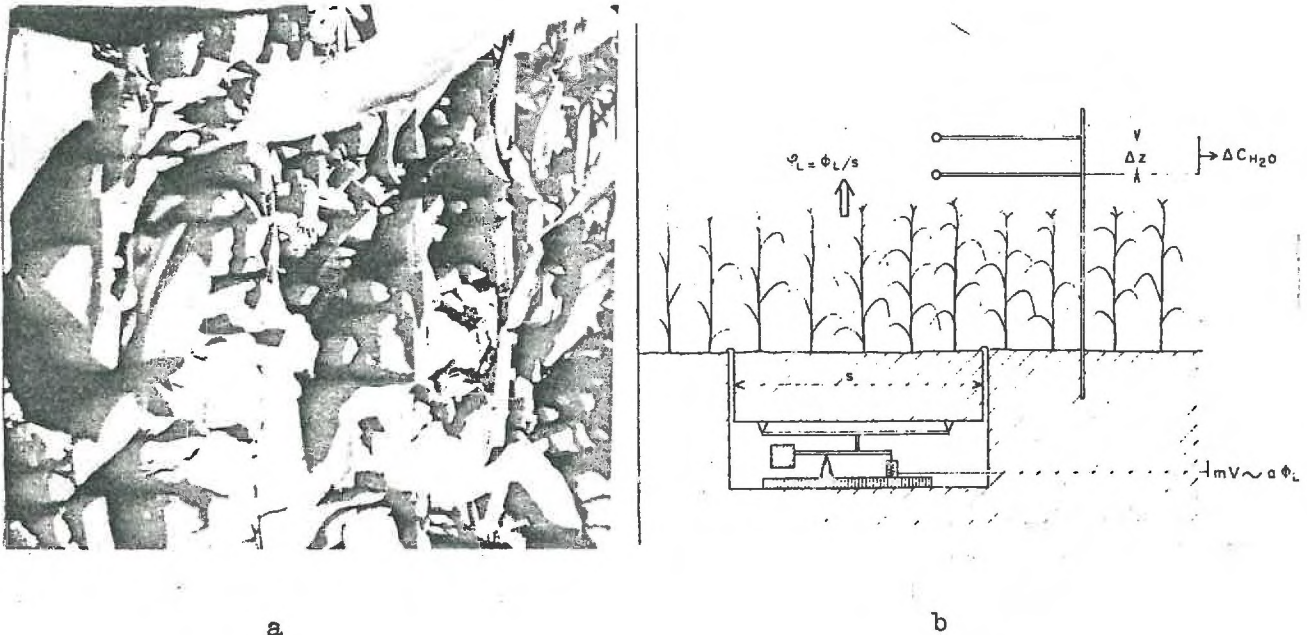


Fig. 19 - a) Evapotranspiromètre pesable de précision permettant la mesure directe du flux de vapeur d'eau (5 m<sup>2</sup> de surface, précision de 150 g, soit environ 40 Wm<sup>-2</sup> pour une demi-heure).  
 b) Schéma descriptif du principe de mesure.

- Mesure directe de l'évapotranspiration par évapotranspiromètre pesable (fig. 19)

Ce sont les premières mesures installées sur le dispositif car elles demandent une infra-structure de mise en place assez lourde. En effet, il s'agit d'isoler une vaste partie du sol et de peser en permanence (système de jauge de contrainte - GREBET 1965) ce sol et le couvert qui le recouvre tout en préservant une continuité, la plus parfaite possible, entre le système isolé et mesuré, et le milieu environnant. Ces mesures qui ont fait l'objet d'une publication (PERRIER et al. 1974) ont permis des mesures continues en de nombreux points (9 points de mesure) et dans des conditions variées, de l'évapotranspiration du sol et des couverts sur des intervalles de temps

allant de la journée à quelques heures ou même à la demi-heure. L'ensemble des mesures microclimatiques était précisément centré autour de l'évapotranspiromètre le plus précis (0,03 mm d'évaporation, soit une précision sur des flux de chaleur latente d'environ  $40 \text{ Wm}^{-2}$  en travaillant à l'échelle de la demi-heure), afin de pouvoir comparer au mieux les différents résultats (fig. 20).

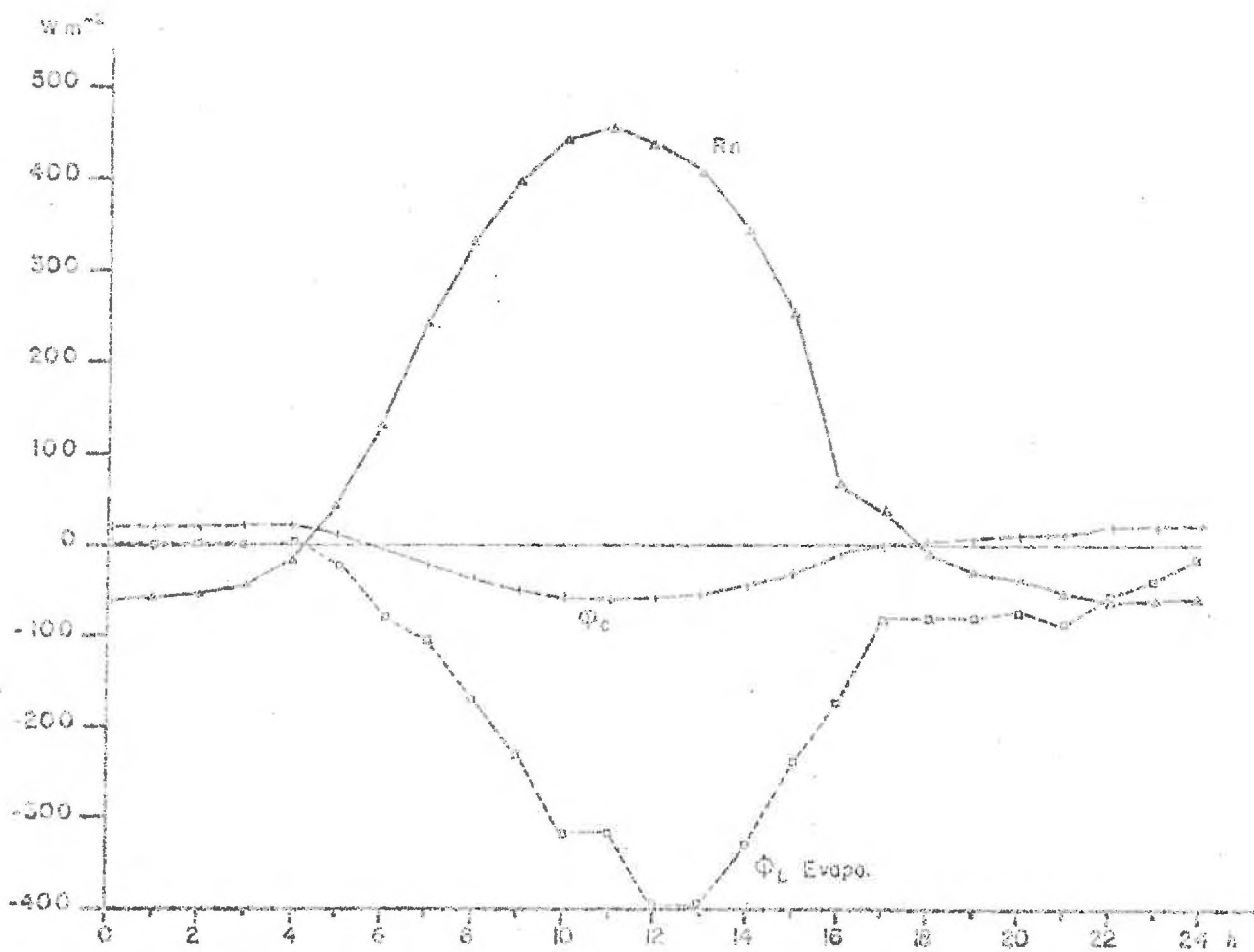


Fig. 20 - Exemple typique de l'évolution diurne du rayonnement net  $R_n$ , de l'évapotranspiration ou flux de chaleur latente  $\phi_L$  et du flux conductif  $\phi_c$  à la surface du sol pour une culture de maïs pleinement développée.

- Mesure du rayonnement net (densité de flux d'énergie radiative)

La mesure directe de ce flux par bilanmètre est devenue une mesure classique en micrométéorologie (cf. par. précédent sur le profil de rayonnement net). La fiabilité de l'instrument et sa précision (< 5%) offrent une base expérimentale sûre concernant ce terme énergétique de première importance puisqu'il traduit la source essentielle d'énergie (rel. II.1). C'est aussi pour cette raison que l'on utilisera ce terme comme grandeur climatique à la borne supérieure bien que, comme nous l'avons vu (cf. par. I.3.2.2), ce ne soit pas tout à fait exact.

- Mesure de la densité de flux de chaleur conductif à la surface du sol

La mesure directe de ce flux est un des termes nécessaires à l'étude entreprise, puisque c'est une des conditions limites choisie (cf. par. I.3.2.2) pour la borne inférieure. Sa mesure directe, à l'aide de fluxmètres placés près de la surface du sol est aisée, bien que d'un point de vue thermique l'interprétation de la valeur obtenue ne soit pas simple et que finalement la précision de la mesure reste assez faible (environ 25 %). Cependant, cette mesure directe s'avère le plus souvent suffisante, car cette densité de flux est plus petite devant les autres (fig. 20), et d'autant plus petite que le couvert végétal est plus dense. Cette densité de flux de chaleur peut être considérée comme un terme correctif et par conséquent sa mesure à 25 % est généralement suffisante ; elle peut aussi être estimée de diverses manières (VAN WICK 1963, de VRIES 1963a) et même pour sol nu, un calcul à partir de l'hypothèse d'une attaque diurne sinusoidale conduit à des résultats satisfaisants (PERRIER 1975a).

- Mesure directe des densités de flux de chaleur latente (évapotranspiration) et de chaleur sensible par B.E.A.R.N. (fig. 21)

Le bilan d'énergie est une méthode ancienne et largement utilisée pour les mesures de flux de chaleur sensible et latente pour l'ensemble d'un couvert (de VRIES 1963b) ou pour analyser les échanges, tranche par tranche, au sein du couvert (LEMON 1963, LEMON et al. 1963, DEMICAD 1970, IMPENS 1973).





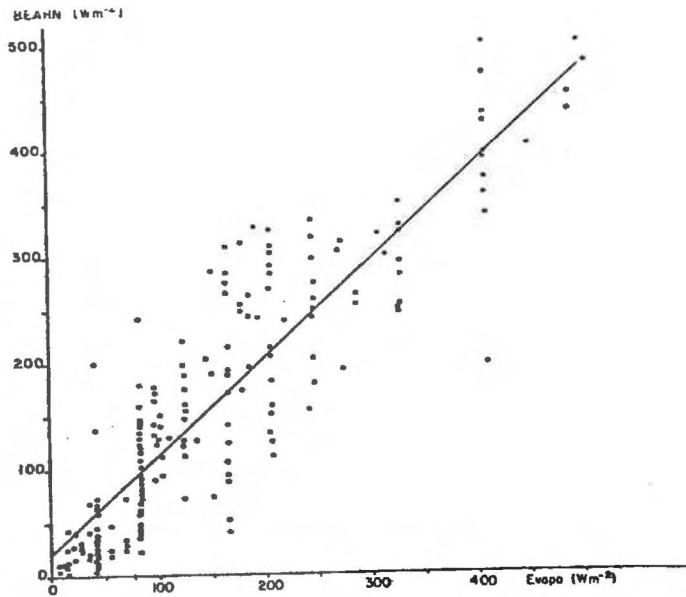
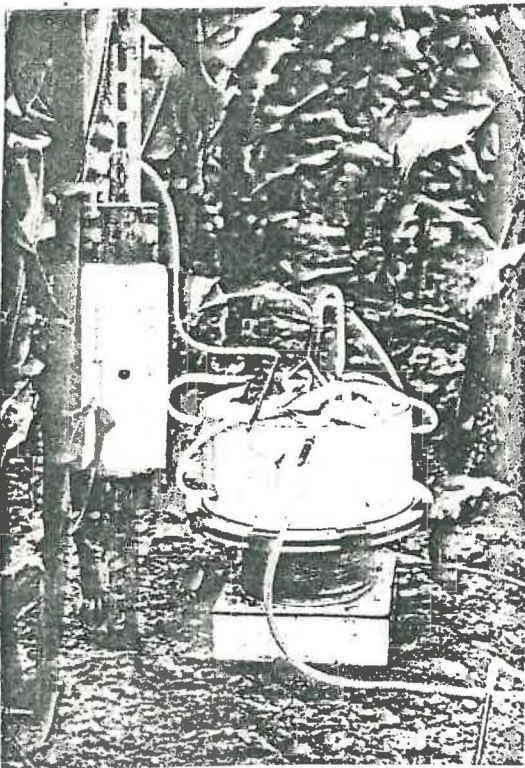
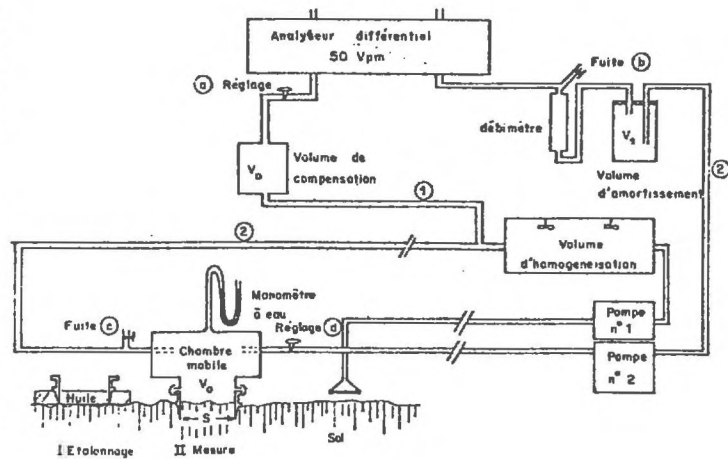


Fig. 22 - Comparaison des mesures horaires de flux de chaleur latente obtenues par évapotranspiromètre pesable (fig.19) et par B.E.A.R.N.(fig.21).



a

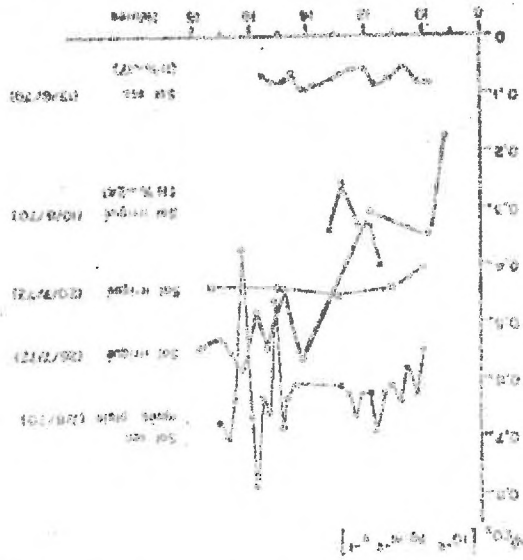


b

Fig.23 - a) Dispositif de mesure du flux de  $CO_2$  à la surface du sol (PERRIER et al. 1976).

b) Schéma de principe du système de mesure.

Fig. 24 - Quelques résultats concernant les valeurs de flux de CO<sub>2</sub> à la surface du sol.



détermination d'une des formes de notre modèle (Fig. 24).  
 Cependant, des valeurs ont ainsi pu être obtenues et servir de base à la  
 d'échange que à la présence de la poche sur une variation du flux.  
 une turbulence voisine de celle extérieure, la modification du coefficient  
 court intervalle de temps car, malgré le choix d'un débit tel qu'il assure  
 chambre est toujours modifiée par rapport au flux réel, surtout sur un  
 dégagé par le sol. Il faut aussi rappeler que le flux dégagé dans la  
 dépressions qui résultent de façon considérable sur le flux instantané  
 l'air sortant (1 à 3 cm d'eau seulement) provoque des surpressions ou  
 car toute variation de pression entre l'air entrant dans la chambre et  
 de sol explorée donnée. Et encore, la fiabilité de la mesure est faible,  
 de la densité de flux de gaz carbonique pour un débit donné et une surface  
 entre le gaz entrant et sortant de cette chambre est une mesure directe  
 (3 à 5 m) (FERNIER et al. 1976). La variation de concentration en CO<sub>2</sub>  
 de chambre disposé à la surface du sol, juste pendant la période de mesure  
 nique simple de détermination instantanée de ce flux à l'aide d'un système  
 (MONTAUDO et al. 1964). Aussi, nous a-t-il fallu mettre au point une tech-  
 rieurs jours) par rapport à notre intervalle de temps (12 mn) sont connues  
 étude. Enfin, quelques mesures sur de longues périodes (1 jour à plus  
 de l'estimation nette du couvert. C'est de beaucoup le moins  
 des conditions limites choisies de la borne sol pour l'étude du problème  
 Cette grandeur est aussi une donnée nécessaire, puisqu'elle est une

(Fig. 23)

## II - MODELISATION DES TRANSFERTS MECANIQUES :

### APPLICATION A LA DETERMINATION DES PROFILS DE DIFFUSIVITE TURBULENTE ET DE VENT

En milieu aérien l'ensemble des phénomènes de transferts convectifs, qu'ils soient d'énergie ou de masse, sont sous la dépendance directe des mouvements de l'air. L'analyse et la connaissance des mécanismes de ces mouvements sont donc les étapes indispensables qui doivent permettre d'aborder les échanges entre végétation et milieu aérien. Cependant, pour aborder le milieu étudié, d'une grande complexité par rapport aux systèmes classiquement décrits en mécanique des fluides, même ceux à des fins industrielles, nous avons choisi une base d'étude reposant sur des relations de formulation simple (rel. I.1), bien que l'étude entreprise et la mesure de certains paramètres nécessaires soient sous la dépendance de mécanismes plus profonds concernant les transferts en milieu turbulent.

On introduira donc, tout d'abord, les données classiques de base qui, compte tenu des hypothèses de départ (cf. par. I.2 et I.3), s'appliquent bien à l'analyse des transferts mécaniques au-dessus et au sein d'un couvert végétal. Puis, à partir de ces données, on proposera une solution générale qui permet une modélisation complète découlant de l'étude de deux paramètres essentiels : le coefficient de trainée moyen d'une couche de végétation et une généralisation du concept de longueur de mélange de Prandtl pour des systèmes très fortement poreux tels que des couverts.

#### II.1. RAPPEL DES RELATIONS FONDAMENTALES SUR LES TRANSFERTS MECANIQUES

Il a été rappelé que le régime convectif du milieu naturel est un régime fortement turbulent au sein duquel on définit donc une vitesse instantanée  $u(t)$ , sa valeur moyenne  $\bar{u} = U$  et sa fluctuation  $u'(t)$ .

$$u(t) = U + u'(t) \quad (II.1)$$

En milieu turbulent libre (au-dessus du couvert), le déplacement de

la masse d'air provoque au niveau de la surface une contrainte pariétale  $\tau_p$ , contrainte ou flux de quantité de mouvement qui se transmet à tous les niveaux au sein de la masse fluide.

Si l'on admet les conditions restrictives suivantes :

- régime établi pleinement développé
- problème unidirectionnel, tel qu'il a été défini précédemment
- effet négligeable des forces dues à la rotation de la terre
- faibles gradients horizontaux et verticaux de pressions
- faibles énergies de dissipation
- forces newtoniennes négligeables (gradient de densité dû aux gradients thermiques et de concentration),

les équations de Navier Stokes conduisent à l'équation de Reynolds dont le terme qui traduit le flux vertical d'échange de quantité de mouvement s'écrit :

$$\tau(z) = \rho \cdot \bar{u}'(z) \cdot \bar{w}'(z) \quad (\text{II } 2)$$

où  $w'(z)$  est la fluctuation de la composante verticale dont la valeur moyenne  $\bar{w}$  est nulle selon les hypothèses précédentes.

C'est l'hypothèse de la non action des gradients thermiques (cas de la stricte neutralité thermique) qui est très certainement la plus remise en cause dans un certain nombre de conditions naturelles (faible vent, gradient de plusieurs degrés), pour lesquelles une certaine convection libre apparaît et nécessite l'introduction d'un terme correctif. Cet aspect sera donc repris par la suite en divers points cruciaux de notre analyse.

Cependant l'évaluation de cette contrainte (rel.II.3) peut être aussi établie par analogie avec le transfert de quantité de mouvement en viscosité pure. Il s'agit là d'une approximation d'autant plus valable que le transfert ne perturbe pas le mouvement :

$$\tau(z) = \rho \cdot K(z) \cdot \frac{dU(z)}{dz} \quad (\text{II } 3)$$

En effet, cette relation fait appel à la vitesse horizontale moyenne dont la détermination expérimentale, dans les conditions naturelles, s'effectue plus aisément que des mesures de fluctuations.

Une hypothèse de base conduit à utiliser plus fructueusement cette dernière relation, aussi bien dans le milieu aérien au-dessus du couvert (zone libre) que dans le milieu aérien au sein du couvert. Elle consiste à définir le mode de variation de la contrainte en fonction de la hauteur :

- si le milieu fluide ne développe des contraintes qu'entre filets fluides, on admet (hypothèse de Prandtl) que la contrainte est constante et égale à la contrainte développée à la surface du couvert ou du sol :

$$\tau(z) = \tau_p = \text{cte} \quad (\text{II } 4)$$

- par contre, si le milieu fluide développe des contraintes au niveau des diverses surfaces disséminées dans l'espace, telles que les tiges, les feuilles ou autres organes, la dissipation d'énergie ou puits de quantité de mouvement au niveau de ces surfaces provoque une variation verticale de la contrainte. Cette variation est égale à la somme des efforts de traînées  $F_i$  au sein du volume considéré ( $S \cdot dz$ ) (INOUE 1963, FERRIER 1967) :

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = \frac{\sum F_i}{S \cdot dz} \quad (\text{II } 5)$$

où par exemple, si  $\tau_p$  est la contrainte pariétale par unité de surface de feuille et  $f(z)$  la densité de surface foliaire :

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = \tau_p \cdot f(z) \quad (\text{II } 5 \text{ bis})$$

C'est à partir de ces trois équations fondamentales (II.3, 4 et 5) qu'un certain nombre d'études concernant les profils  $U(z)$  et  $K(z)$  sont élaborées afin de conduire, dans la mesure du possible, à une détermination de ces deux profils ou tout au moins, à partir de la mesure du profil moyen de vitesse, à la détermination de la diffusivité turbulente indispensable pour les analyses d'échange de masse et d'énergie.

#### II.1.1. Rappel des équations du milieu aérien au-dessus des couverts :

Flux de quantité de mouvement et profils de vitesse de vent et de diffusivité.

En adoptant la théorie de Prandtl qui introduit une longueur de

mélange  $l(z)$  telle que :

$$u'(z) \sim l(z) \cdot \frac{dU(z)}{dz} \text{ et } w'(z) \sim l(z) \cdot \frac{dU(z)}{dz}$$

l'équation générale (II.1) s'écrit sous la forme :

$$\tau(z) = \rho \cdot l(z)^2 \cdot \left( \frac{dU}{dz} \right)^2 \quad (\text{II } 6)$$

qui conduit par identité avec la relation (II.3) à :

$$K(z) = l(z)^2 \cdot \frac{dU(z)}{dz} \quad (\text{II } 7)$$

L'hypothèse de Prandtl (SCHLICHTING 1955) définissant une longueur de mélange proportionnelle à la distance à la surface,  $z$  :

$$l(z) = k(z + z_0) \quad (\text{II } 8)$$

conduit, comme l'hypothèse de Von Karman (SCHLICHTING 1955), à la relation logarithmique classique :

$$\frac{U(z)}{U_*} = \frac{1}{k} \text{Log} \frac{z + z_0}{z_0} \quad (\text{II } 9)$$

$$K(z) = k \cdot U_* (z + z_0) \quad (\text{II } 9 \text{ bis})$$

pour laquelle  $U_*$  est la vitesse de frottement du couvert qui se définit par  $U_* = \sqrt{\tau_p / \rho}$ ,  $z_0$  la rugosité et  $k$  la constante de Karman (0.38).

Le plus souvent, pour des couverts végétaux à développement vertical, cette expression est modifiée par une longueur  $D$  ou hauteur de déplacement du plan de référence qui est fonction de la hauteur  $z_h$  du couvert. Tout se passe comme si le niveau de référence, en l'occurrence la surface du sol, s'était relevé de  $D$ , les hauteurs  $z$  (rel. II.8 et 9) devenant les nouvelles hauteurs  $(z - D)$  (THORNTONWAITE et HOLTZMAN 1942).

Ces relations basées sur la constance de la contrainte ( $\tau(z) = \tau_p$ ) ne sont naturellement valables qu'au-dessus du couvert soit  $z > z_h$  ou pour une surface de sol nu et dans les conditions définies au paragraphe I.2.4- c ; elles sont couramment employées en micrométéorologie depuis longtemps (SUTTON 1953, THORNTHWAITTE et KASER 1943, etc ...).

### II.1.2. Equation de base au sein du couvert : flux de quantité de MVT

L'équation de base, complémentaire de l'équation II,3 ou II,6 pour l'intérieur du couvert avec puits de quantité de mouvement, est le développement de la relation II 5. En effet, si  $U(z)$  est la vitesse horizontale moyenne,  $f(z)$  la densité de surface foliaire et  $C_M(z)$  le coefficient de frottement moyen (sans dimension) des obstacles considérés comprenant pour une feuille ses deux faces (cf. par. I.3.1.), il est possible d'écrire pour le niveau  $z$  étudié (avec  $C_M(z) = \tau_p(z)/\rho U^2(z)$ , cf. II 3) :

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_M(z) \cdot f(z) \cdot U(z)^2 \quad (\text{II } 10)$$

et par conséquent :

$$\tau(z) = \tau_p - \frac{\rho}{2} \int_z^{z_h} C_M(z) \cdot f(z) \cdot U(z)^2 dz \quad (\text{II } 10 \text{ bis})$$

Cette relation peut aussi faire intervenir la contrainte pariétale  $\tau_0$  à la surface du sol et l'intégration entre les niveaux 0 et  $z$ , plutôt que  $\tau_p$  la contrainte au sommet du couvert qui a été définie au paragraphe précédent. INOUE (1963) et LEMON et al. (1963) ont développé pour la première fois et utilisé ce type de relations, en particulier pour déduire, à partir de la mesure du profil de vitesse (LEMON 1968), la valeur de la diffusivité turbulente  $K(z)$  :

$$K(z) = \frac{U_*^2 - \frac{1}{2} \int_z^{z_h} C_M(z) \cdot f(z) \cdot U(z)^2 dz}{dU(z) dz} \quad (\text{II } 11)$$

Il est aussi possible de combiner les équations II,5 et II,10, afin d'obtenir la relation du bilan mécanique ou du bilan de quantité de

mouvement pour toute hauteur  $z$  au sein et au-dessus du couvert :

$$\frac{d}{dz} \left( K(z) \cdot \frac{dU(z)}{dz} \right) = \frac{1}{2} C_M(z) \cdot F(z) \cdot U(z)^2 \quad (\text{II } 12)$$

relation de base que nous utiliserons par la suite pour résoudre de façon générale les profils de vent et de diffusivité entre la surface du sol et la hauteur de référence  $z_R$ .

### II.1.3. Vérfications et utilisations de ces relations fondamentales

#### a) Profil de vent et de diffusivité au-dessus du couvert

La relation principale, et de beaucoup la plus couramment utilisée pour l'étude des transferts, est celle du profil logarithmique de vitesse du vent (rel. II,9) en fonction de la hauteur  $z$  ou de la hauteur  $(z - D)$  dans le cas d'un couvert végétal.

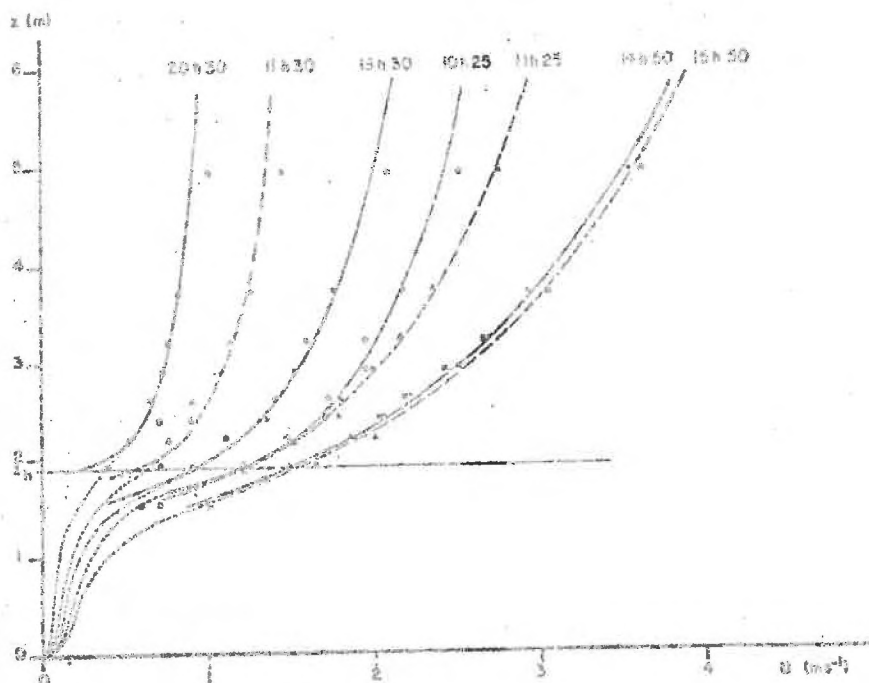


Fig.25 - Exemple d'évolution du profil de vent au-dessus d'un couvert de maïs (La Minière : 9.8.71) au cours de la journée.



Le figure 25 illustre l'évolution très courante de ces profils de vent par journée de beau temps stable, profils mesurés au-dessus d'un couvert de maïs. L'analyse de ces profils mesurés permet, de façon très classique, (LEMON 1960, TANNER 1963) la détermination des paramètres aérodynamiques de la culture qui sont la vitesse de frottement  $U_*$ , la hauteur de déplacement du plan de référence D et le paramètre de rugosité  $z_0$ .

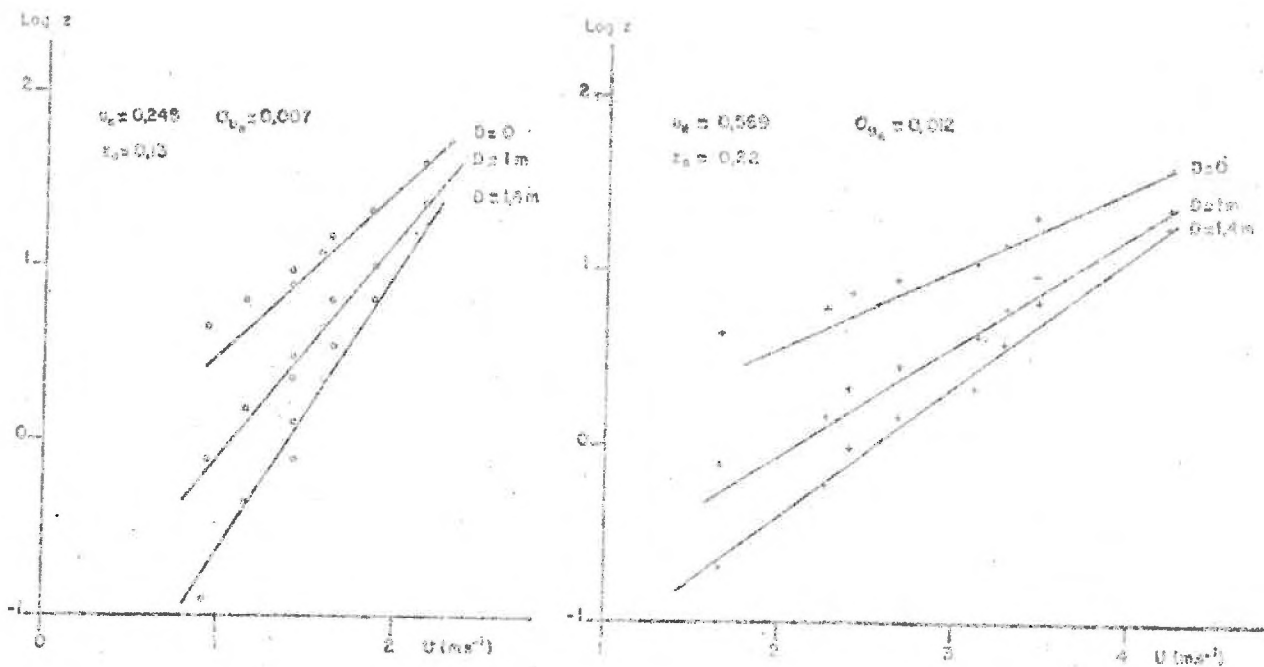


Fig.26 - Exemple de calcul des paramètres  $U_*$ , D et  $z_0$  pour deux profils de vent à 14h10 et 16h55 (La Minière  $\ddagger$  10.8.71<sup>0</sup>).

La figure 26 indique (pour deux exemples de profil mesuré sur maïs) le procédé graphique de détermination de ces paramètres, qui consiste au choix de la hauteur D qui conduit, sur un diagramme Log z en fonction de U(z), au meilleur alignement (toute valeur de D choisie inférieure à sa vraie valeur conduisant à une concavité vers les z positifs de la courbe passant par les points expérimentaux et, pour une valeur de D choisie supérieure à sa vraie valeur, à une concavité inverse).

De cette manière, chaque profil expérimental se traduit par une valeur de vitesse de frottement  $U_*$  (pente de la droite de meilleur ajustement), une hauteur de déplacement du plan de référence D et un paramètre de rugosité  $z_0$  (valeur de l'ordonnée à l'origine).

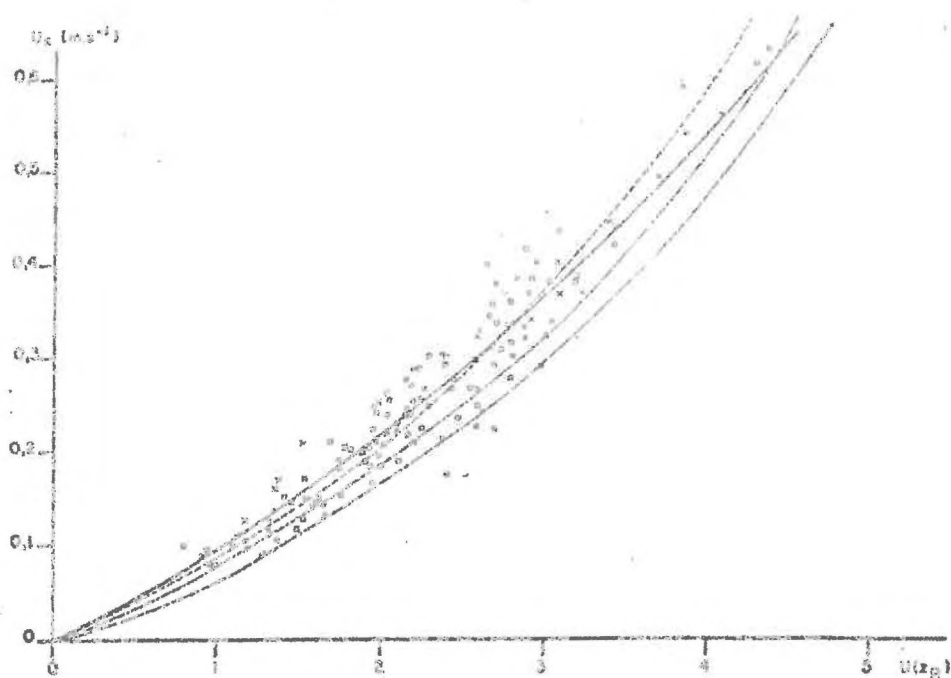
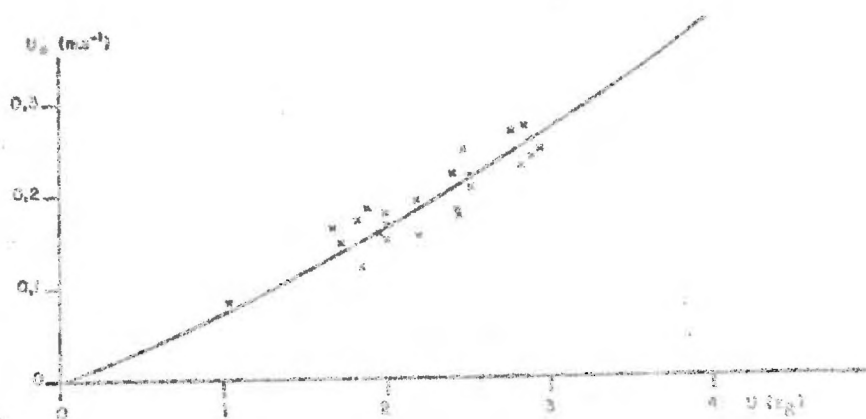
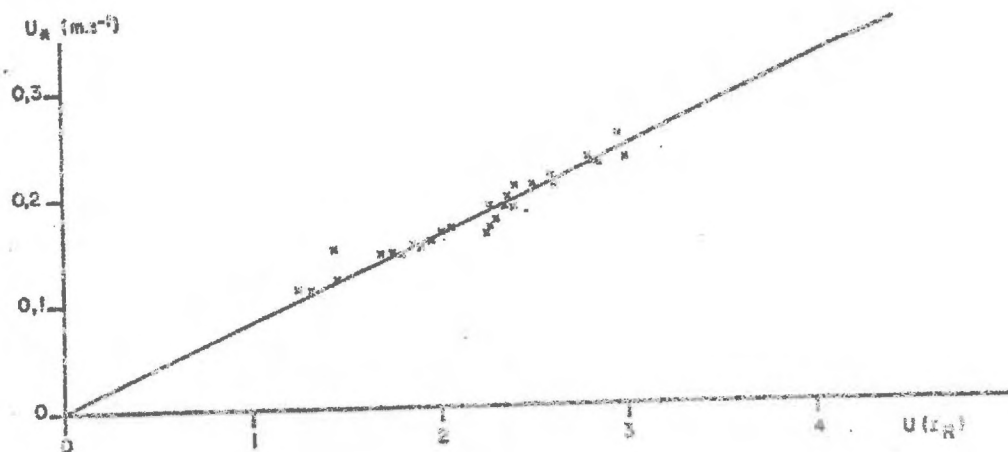


Fig. 27 : Evolution de la vitesse de frottement  $U_*$  en fonction de la vitesse de référence  $U(z_R)$  (3 m au-dessus du couvert) :

- a)  $U_*$  pour un gazon
- b)  $U_*$  pour un maïs (0,6 à 1 m de hauteur)
- c)  $U_*$  pour un maïs ( $\times$  1,2 à 1,6 m de hauteur et  $\square$  1,6 à 2 m de hauteur)
- courbe moyenne 1969-1970
- courbe moyenne 1971
- courbe moyenne 1972
- courbe moyenne 1973

Ce type d'analyse réalisé graphiquement (données de 69-70) puis par programme (STEARNS 1970) permet de caractériser un couvert sous l'angle aérodynamique. Les figures 27, 28 et 29 illustrent la variabilité de ces paramètres et le type d'évolution moyenne qu'ils subissent en fonction de la vitesse du vent de type climatique (non influencé par le couvert). c'est à dire mesurée au niveau de référence  $z_R$  (cf. par. I.2.4.c) considéré à ( $z_h + 3$  m).

- En ce qui concerne la vitesse de frottement, il est remarquable de noter (fig. 27a, b, c) :

. d'une part, l'accentuation de l'évolution de la vitesse de frottement lorsqu'on passe d'un gazon de faible rugosité (qq.mm) à un maïs couvrant de faible hauteur (0,6 à 1,2 m) et de rugosité faible (qq.cm), puis à un maïs plus développé (hauteur de 1,3 à 2m) et de rugosité plus forte (fig.29),

. d'autre part, la bonne concordance des courbes d'évolutions moyennes d'une année sur l'autre (fig. 27c) pour un maïs pleinement développé (variété F7 HP1, densité d'environ 90000 p/ha) et ceci malgré une certaine dispersion au niveau des valeurs individuelles. De façon pratique, ce type d'évolution, très stable pour une culture donnée, peut évidemment être par la suite utilisé directement à partir de la seule mesure de la vitesse au niveau de référence pour en déduire la valeur de la vitesse de frottement en vue du calcul du profil de vent et de diffusivité (rel. II.9 et 9 bis).

- Les résultats concernant la valeur de D montrent une variation assez faible entre les dépouillements manuels (fig.28a) et les dépouillements par programme (fig.28b) qui ne permettent guère que de traduire une décroissance linéaire du rapport  $D/z_h$  en fonction de la vitesse de référence ( $U(z_R) = U(z_h)+3$ ) :

$$D = 0,89 - 0,05 U(z_R)$$

Il est d'ailleurs très souvent admis (STANHILL 1962) que D n'est qu'une fonction de la hauteur  $z_h$  :

$$\log D = 0,995 \log z_h - 0,145$$

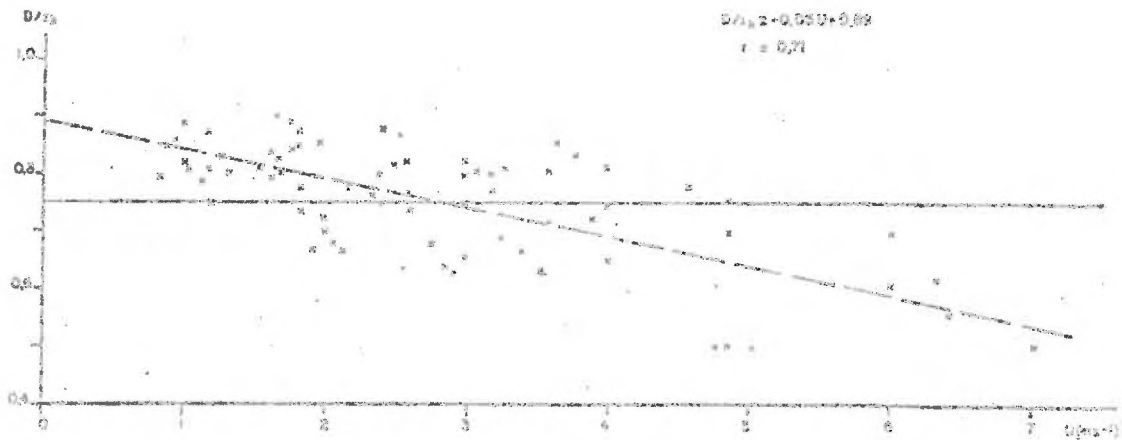
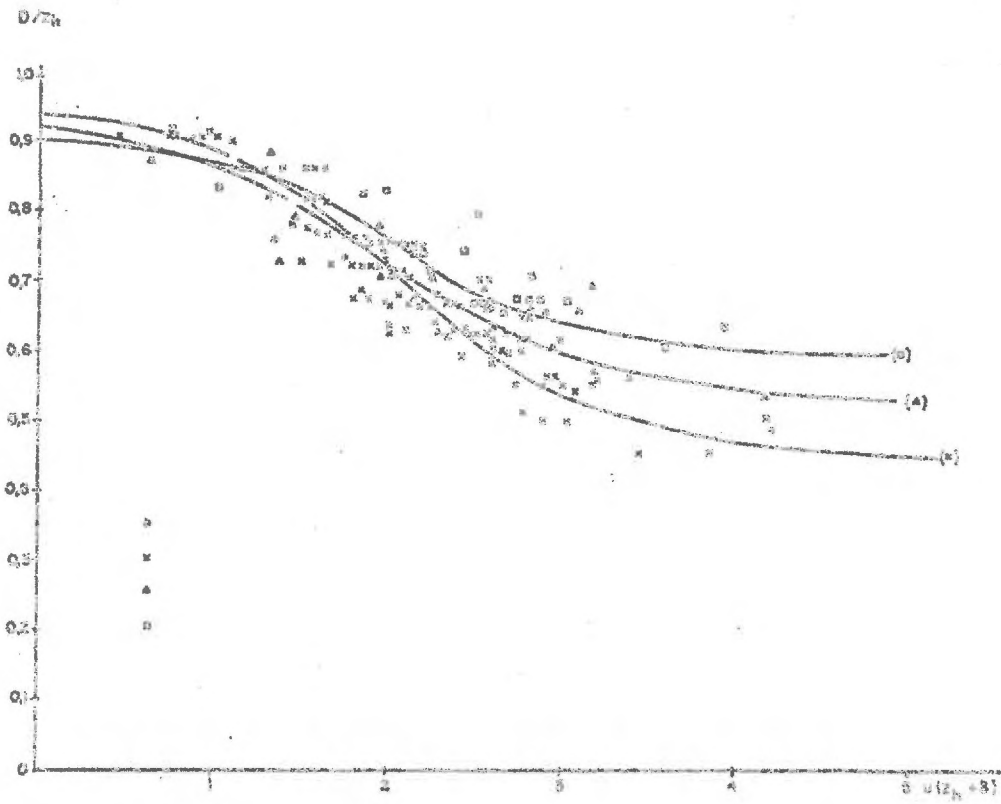


Fig. 28 : Evolution de la hauteur de déplacement  $D$  rapportée à la hauteur du couvert  $z_n$  :

a) années 1969-1970

□ Maïs de 0,6 à 0,8 m de hauteur

Δ Maïs de 1,2 à 1,6 m de hauteur

x Maïs de 1,6 à 2,2 m de hauteur

b) années 1972-1974

x Maïs de 1,6 à 2 m de hauteur (1972)

o Maïs (1974)

et la valeur 0,65 à 0,7 de ce rapport est très souvent utilisée. Il y a, par ailleurs, concordance puisque notre valeur moyenne (fig.28b) est voisine de 0,75 et également très proche de celle que donnerait la formule préconisée par SPANHILL : 0,71. De nombreux auteurs pensent (COUNIHAW 1971, SEGNER et ROSENZWEIG 1972) que les paramètres géométriques du couvert sont dominants et conduisent à une indépendance de la hauteur de déplacement D par rapport à la vitesse du vent. BRADLEY et FINNICAN (1973) soulignent que la valeur de D est bien comprise entre  $0,5 z_h$  et  $z_h$ , et sur blé la valeur de 0,75 correspond le mieux aux valeurs expérimentales trouvées. Il semblerait pourtant que, malgré l'imprécision de la détermination de D, nos résultats montrent une certaine décroissance en fonction de la vitesse de référence qui recouperait d'autres résultats (TAN et LING 1963, UDAGAWA 1966, MAKI 1969, MANKING et VAN HEEMST 1970). Cependant, cette décroissance pourrait n'être qu'un artefact dû à la variation de la hauteur moyenne d'une culture et de ses feuilles en particulier, lorsque la vitesse du vent augmente. Cette variation analysée sur sorgho et riz (TAKAMI et MAKI 1969) conduit à une décroissance de la hauteur moyenne  $z_h$  du couvert qui expliquerait la décroissance du rapport  $D/z_h$  lorsque  $z_h$  est la hauteur moyenne du couvert mesurée par faible vitesse de vent. Nous verrons que l'étude de notre modèle nous conduit aussi à une autre interprétation (cf. par. II.5.2).

- Enfin, la variation du paramètre de rugosité du couvert, toujours en fonction de la vitesse de référence  $U(z_h)$ , est illustrée par la figure 29. Les fluctuations concernant ce paramètre sont toujours assez grandes, mais une tendance nette à la croissance en fonction de la vitesse de référence se dessine et se trouve très souvent observée (UDAGAWA 1966, MAKI 1969, MAKI 1975a) avec parfois une tendance à la décroissance pour de fortes vitesses (TAN et LING 1963). En effet, la courbure des plantes et le lit de feuilles supérieures tendent à rendre la surface moins rugueuse (DEACON 1953, UDAGAWA 1966, DENMEAD 1968, FERRIER et al 1972). Cependant, pour ce paramètre, de nombreux auteurs (LEITEAU 1969, KONDO 1971, SEGNER et ROSENZWEIG 1972) pensent qu'il doit s'exprimer en fonction de paramètres purement géométriques (hauteur des aspérités, leur section, la surface relative, etc...). Le type de relation simple est une formulation en fonction de la hauteur de la culture  $z_h$  (SZENCZ 1969) :

$$\log z_0 = 0,997 \log z_h - 0,883$$

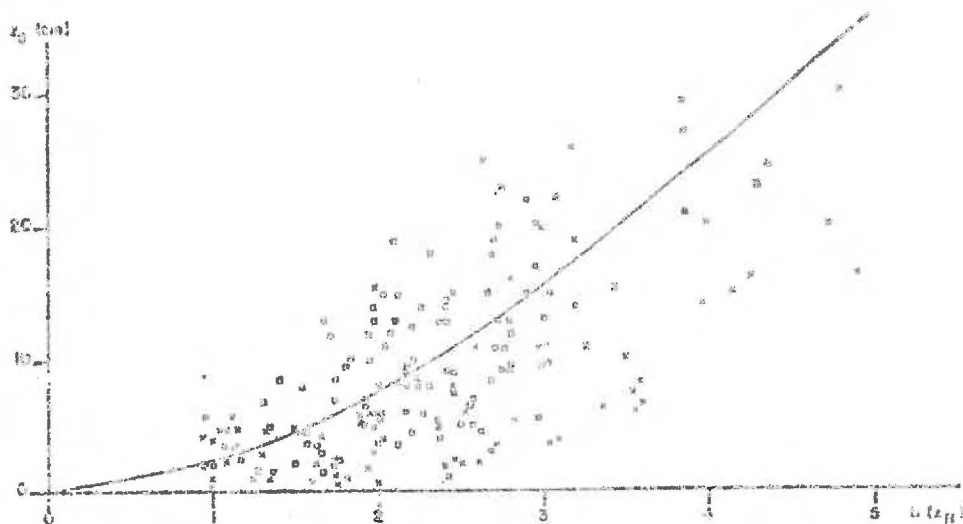


Fig.29 - Evolution du paramètre de rugosité pour un maïs  
 □ 1969-1970  
 × 1972

Pour notre part, le but recherché étant plus une analyse des profils et des flux, le paramètre de rugosité  $z_0$  sera donc peu utilisé puisque  $K(z)$  en est pratiquement indépendant :

$$K(z) = k \cdot U_* \cdot (z - D)$$

et les profils au-dessus du couvert peuvent s'exprimer uniquement à partir des grandeurs  $z$ ,  $z_R$ ,  $D$  et  $U_*$  :

$$U(z) = U(z_R) + \frac{U_*}{k} \text{Log} \frac{z - D}{z_R - D}$$

Ainsi, de façon classique, sommes-nous amenés à utiliser les deux paramètres  $U_*$  et  $D$  pour, à partir d'une vitesse mesurée au niveau de référence, reconstituer le profil logarithmique de vitesse (relation ci-dessus) et le profil linéaire de diffusivité (relation ci-dessus).

b) Profil de diffusivité et coefficient de traînée au sein du couvert

Les relations de base fournissent bien une relation entre les deux

profils  $U(z)$  et  $K(z)$  (rel. II,12), mais il est impossible, sans une relation supplémentaire, de pouvoir déduire l'un et l'autre à partir des caractéristiques du couvert :  $f(z)$ , la densité de surface foliaire et  $C_M(z)$ , le coefficient de trainée moyen. C'est pourquoi, la seule possibilité directe d'obtenir le profil de diffusivité  $K(z)$  au sein du couvert est de mesurer le profil de vitesse  $U(z)$  et d'en déduire le profil de diffusivité (rel. II,11) si  $U_*$  et  $C_M(z)$  sont connus.

On a montré au paragraphe précédent comment  $U_*$  peut être déterminé pour un couvert ; à partir de cette valeur et des hypothèses simplificatrices suivantes :

$$C_M(z) = \text{cte}$$

(pour l'ensemble du couvert, ce qui suppose des organes de mêmes caractéristiques à travers toute la végétation)

$$\tau(z=0) = 0$$

(contrainte nulle à la surface du sol sous un couvert dense).

Il est possible de calculer la valeur de  $C_M$ , (rel. II,13 bis), la contrainte pariétale du couvert  $\tau_p$  étant d'après II,3, II,9 et II,9 bis égale à  $\rho U_*^2$ .

Il est aussi possible de calculer le profil de diffusivité  $K(z)$  (rel. II,11). La figure 30 illustre, pour un profil de vitesse de vent au sein d'un couvert de maïs défini par sa densité de surface foliaire  $f(z)$ , le calcul du profil  $K(z)$  à partir de la valeur  $U_*$  ( $0.44 \text{ ms}^{-1}$ ) et de la valeur calculée de  $C_M$  (0.4). Mais cet exemple souligne aussi la fragilité de la méthode, car la moindre erreur dans les valeurs des vitesses mesurées conduit à une estimation du gradient  $dU(z)/dz$  très imprécise qui donne souvent des points aberrants (fig.30). SEGINNER (1974) a largement montré le peu de précision d'un tel calcul. Cependant, si l'on se base sur des profils moyens (fig.31, moyenne de 10 profils), ce type de calcul donne des résultats satisfaisants (des imprécisions ou aberrations apparaissent par contre sur les deux profils extrêmes : pas de moyenne).

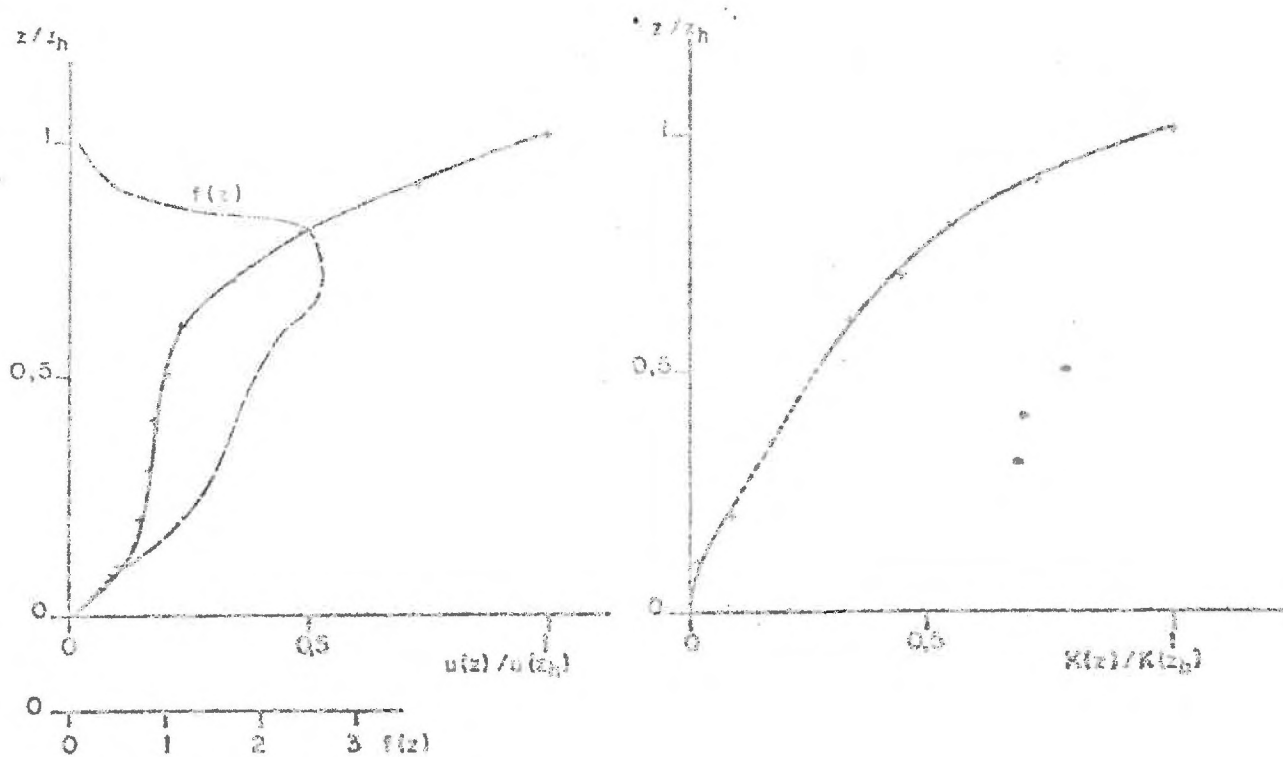


Fig. 30 : Calcul du profil de diffusivité au sein d'un couvert de maïs :

$f(z)$  profil mesuré

$U(z)/U(z_h)$  profil mesuré (30.7.74) :  $U_* = 0,44$  et  $C_M$  trouvé égal à  $0,4$

• points aberrants

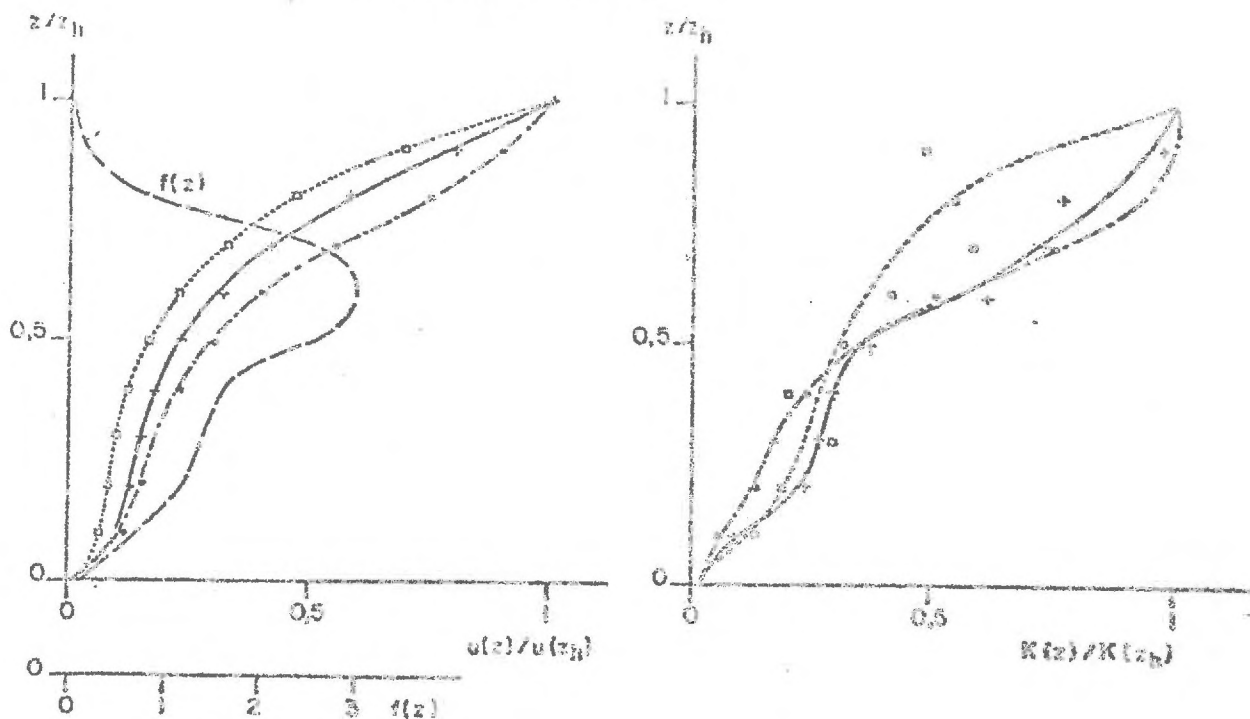


Fig. 31 : Calcul du profil de diffusivité à partir des profils de vitesse au sein du couvert (12.8.72) :

+ profil moyen de  $U(z)$  (10 profils) et de  $K(z)$  correspondant

( $C_M = 0,4$ ,  $U_*/U(z_h) \approx 0,3$ )

□ profil minimum de  $U(z)$  et de  $K(z)$  correspondant

( $C_M = 0,4$ ,  $U_*/U(z_h) \approx 0,24$ )

• profil maximum de  $U(z)$  et de  $K(z)$  correspondant

( $C_M = 0,4$ ,  $U_*/U(z_h) \approx 0,4$ )



La décroissance de la diffusivité en fonction de la profondeur au sein du couvert correspond aux types de variation généralement trouvés (UCHIJIMA 1962a, BROWN et COVEY 1966, LEMON 1970). La décroissance ainsi obtenue pour le profil moyen pourrait être soit plus accentuée (fig.32) par rapport à la réalité, dans le cas où le coefficient moyen de traînée aurait été sous-estimé (0,4 au lieu de 0,5) soit au contraire moins accentuée que la réalité si le coefficient moyen de traînée était sur-estimé (0,4 au lieu de 0,3 ou 0,2).

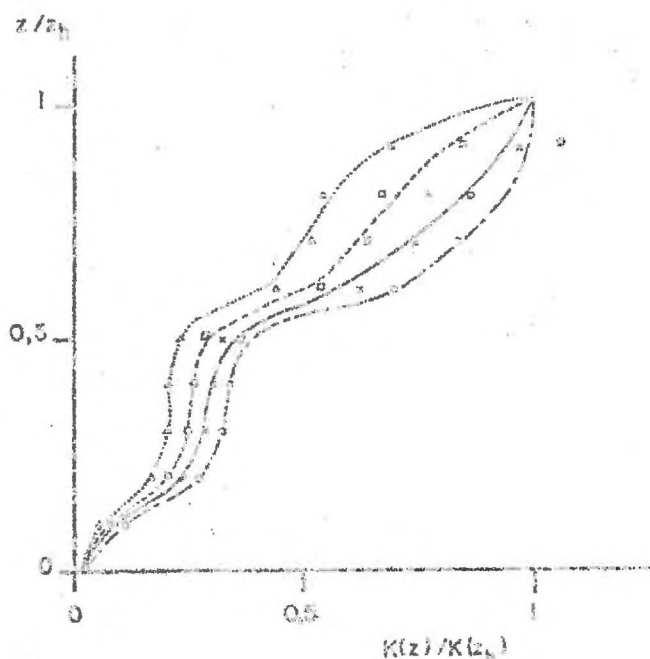


Fig.32 - Calcul des profils de diffusivité à partir du profil de vitesse moyen établi le 12.8.72 (fig.31).

○ $C_M = 0,5$	$U_* = 0,35$
× $C_M = 0,4$	$U_* = 0,31$
□ $C_M = 0,3$	$U_* = 0,27$
△ $C_M = 0,2$	$U_* = 0,22$

## II.2 - SOLUTION GENERALE PROPOSEE : Profil de vent et de diffusivité au-dessus et au sein du couvert

Si une solution existe et traduit bien la réalité (cf. par. II.1.3a) en ce qui concerne l'air libre au-dessus du couvert, par contre, au sein

du couvert, une solution au profil de diffusivité  $K(z)$  n'est possible que dans la mesure où  $U(z)$  est bien connu (cf. par II.1.3b). La recherche d'une solution directe à la fois pour  $U(z)$  et  $K(z)$  et valable aussi bien au-dessus qu'au sein du couvert est le but de ce paragraphe.

Dans ce but, en dehors de la relation de base (II,3) et de sa formulation particulière (II,6), l'équation générale II,12 correspond bien à ce souci de généralisation ; en effet, elle reste valable quelle que soit la côte  $z$  considérée au-dessus et au sein du couvert, et recouvre en particulier l'équation II,4 valable uniquement pour l'air libre (cas où  $z \geq z_0$  soit  $f(z) = 0$  et  $C_M(z) = 0$ ). Mais, de même qu'au-dessus du couvert la solution des profils  $U(z)$  et  $K(z)$  passe par deux relations (rel. II,4 et rel. II,8) qui sont les hypothèses de Prandtl, de même la solution recherchée devra associer à la relation II,12 qui est la généralisation des relations II,3 et II,4 pour le cas des couverts, une relation supplémentaire semblable à la relation II,8, mais valable à la fois au-dessus et au sein du couvert.

La presque totalité des solutions particulières préconisées (INOUE 1963, UCHIMURA and WRIGHT 1964, GIONCO 1965, PERRIER 1967, BARR 1971) faisait appel à la notion de longueur de mélange, c'est-à-dire, à une forme de la relation II,8 adaptée à l'intérieur des couverts et offrait en première approximation une estimation suffisante. Cependant, les expressions introduites étaient incomplètes car elles consistaient en réalité à remplacer la loi de Prandtl valable pour l'air libre par une loi valable uniquement pour l'intérieur des couverts, avec toutes les difficultés de continuité que cela posait au voisinage du sommet du couvert (air libre) et au voisinage du sol (surface continue). Enfin, ces expressions étaient souvent peu adaptées à des types de couvert ayant des variations verticales importantes de leurs propriétés (densité de surface foliaire et coefficient de traînée).

C'est pourquoi, à partir de l'hypothèse d'une relation de la longueur de mélange valable quelles que soient les propriétés du couvert et le niveau choisi près du sol, au sein du couvert, à son sommet ou dans l'air libre, et dont une étude sera présentée au paragraphe II.4, on montrera comment il est possible d'établir une solution du profil de vitesse de vent  $U(z)$  et de diffusivité  $K(z)$ . Cette solution en  $U(z)$  et  $K(z)$  est alors valable pour

tout niveau  $z$  ( $0 < z < z_R$ ) et peut être étendu à tous les types de couvert quelle qu'en soient leur densité, leur structure et surtout la variation verticale de ses paramètres.

### II.2.1. Etude de la solution générale proposée : profil de vent et de diffusivité

L'hypothèse de base que nous introduisons est donc le choix d'un paramètre  $L$  ou longueur de mélange, dont la valeur proposée par Prandtl ne serait que la valeur particulière, dans le cas d'un milieu fluide semi infini, sans obstacle et surmontant une surface donnée. La longueur  $L(z)$  ainsi introduite fonction de la hauteur  $z$  et de la géométrie du couvert, et dont on verra au paragraphe II.4 le calcul, permet simplement d'écrire, par analogie avec la théorie de Prandtl, les trois relations suivantes qui dérivent successivement des relations particulières (II,5 , II,6 , II,7) et qui sont valables quelle que soit la hauteur  $z$  ( $z < z_R$ ) :

$$L(z) = k \cdot L(z) \quad (II\ 13)$$

$$\tau(z) = \rho \cdot k^2 \cdot L(z)^2 \cdot \left( \frac{d U(z)}{dz} \right)^2 \quad (II\ 13\ bis)$$

$$K(z) = k^2 \cdot L(z)^2 \cdot \frac{d U(z)}{dz} \quad (II\ 13\ ter)$$

L'introduction d'un tel paramètre suppose implicitement, qu'en moins pour la gamme des éventuelles vitesses concernant l'intérieur de la végétation, la longueur de mélange est un terme indépendant de la vitesse moyenne horizontale. Cette hypothèse devient obligatoirement fautive à partir du moment où de fortes vitesses entraînent des mouvements de feuilles et de l'ensemble du couvert tels que leur structure s'en trouve modifiée (TAKAMI et MAKI 1969, TAKEDA 1966) et, corrélativement, la valeur du paramètre  $L(z)$  aussi.

L'introduction de la relation 13.ter dans l'équation du bilan de quantité de mouvement II,12 qui, comme nous l'avons vu, est aussi valable pour tout  $z < z_R$ , conduit à l'équation différentielle générale du second ordre

suivante (PERRIER 1975) ; en posant  $U'(z) = \frac{dU(z)}{dz}$  et  $U''(z) = \frac{dU'(z)}{dz}$  on écrit :

$$U''(z) \cdot U'(z) + \left[ L'(z) / L(z) \right] \left( U'(z) \right)^2 - \left[ C_M(z) \cdot f(z) / 4k^2 \cdot L(z) \right] U'(z)^2 = 0 \quad (\text{II } 14)$$

En introduisant la nouvelle variable  $X(z)$  :

$$X(z) = \left[ L(z) \cdot U'(z) / U(z) \right]^2 \quad (\text{II } 15)$$

où  $X(z)$  est une variable sans dimension, l'équation précédente se réduit à l'équation différentielle du premier ordre suivante ( $X'(z) = dX(z)/dz$ ) :

$$X'(z) + \frac{2}{L(z)} X(z)^{3/2} - \frac{C_M(z) \cdot f(z)}{2k^2} = 0 \quad (\text{II } 14 \text{ bis})$$

La connaissance des paramètres  $L(z)$  (par. II,4),  $C_M(z)$  (par. IX,3) et  $f(z)$  (par. I.3.1a) permet de résoudre cette équation à partir des conditions limites fixées aux bornes du système.

#### a) Condition limite inférieure

$$U(0) = 0 \text{ (pour la surface du sol)}$$

En effet, la vitesse à la surface du sol tend vers zéro mais en se rapprochant du profil logarithmique classique proportionnel à  $\text{Log} \frac{z + z_{0s}}{z_{0s}}$

si  $z_{0s}$  est la rugosité de la surface du sol et si les obstacles deviennent rares (absence de feuille) (UCHIJIMA 1962a et b, PERRIER 1967). La dérivée de la vitesse ( $\sim (z+z_{0s})^{-1}$ ) tend donc vers une valeur grande et la longueur de mélange  $L(z)$  vers la valeur  $k \cdot z_{0s}$  petite (rel. II,13) de sorte que la valeur  $X(z)$  tend vers l'infini.

La rapide convergence des solutions  $X(z)$  quand on fait tendre  $X(0)$  vers des nombres très grands, permet d'avoir aisément une bonne solution de  $X(z)$ .

On montre alors, que la double connaissance de  $L(z)$  et  $X(z)$  permet, compte tenu de la seconde condition limite au niveau de la borne supérieure  $z_H$ , de résoudre les profils recherchés.

b) Condition limite supérieure

$$U(z_R) = U_a$$

$U_a$  : valeur climatique de la vitesse du vent pratiquement indépendante du couvert analysé, mais sous la dépendance des contraintes pariétales  $\tau_p$  au niveau des cultures avoisinantes de la zone amont (cf. par. I.2.4 c)

c) Les profils de vitesse et de diffusivité

A partir de  $U(z_R)$  et des solutions  $X(z)$  et  $L(z)$ , on déterminera, pour toute cote  $z$  du système, la valeur de la vitesse de l'air d'après (II,15) et cette condition limite :

$$U(z) = U(z_R) \cdot e^{-\int_z^{z_R} X(z)^{1/2} \cdot L(z)^{-1} \cdot dz} \quad (\text{II } 16)$$

Par voie de conséquence, le profil des diffusivités (d'après II,13 ter et II,15) s'écrira :

$$K(z) = k^2 \cdot X(z)^{1/2} \cdot L(z) \cdot U(z) \quad (\text{II } 17)$$

Cette recherche générale des profils  $U(z)$  et  $K(z)$  permet évidemment de retrouver les trois paramètres classiques déterminant la relation de type logarithmique généralement adoptée pour la zone située au-dessus du couvert, soit  $U_*$ ,  $D$  et  $z_0$ .

d) Les paramètres aérodynamiques du couvert

- En effet, par définition, la vitesse de frottement est égale à la racine carré du rapport  $\tau_p/\rho$ , donc d'après II,13 bis, il découle :

$$U_* = k \cdot L(z_h) \cdot U'(z_h) \quad (\text{II } 18)$$

soit encore d'après (II,15) :

$$U_* = k \cdot U(z_h) \cdot X(z_h)^{1/2} \quad (\text{II } 18 \text{ bis})$$

- Quant à la hauteur de déplacement  $D$ , elle peut s'obtenir à partir de la relation II,9 exprimée à partir de la hauteur  $z_h$  :

$$U(z_R) = U(z_h) + \frac{U_*}{k} \cdot \text{Log} \frac{z_R - D}{z_h - D}$$

ce qui conduit à la relation suivante :

$$D = \frac{z_R - z_h \cdot e^{A \cdot X(z_h)^{1/2}}}{1 - e^{A \cdot X(z_h)^{1/2}}} \quad (\text{II } 19)$$

si l'on pose :

$$A = e^{-1} \int_{z_h}^{z_R} X(z)^{1/2} \cdot L(z)^{-1/2} \cdot dz$$

- Enfin, à partir de la relation II,9, l'épaisseur de rugosité s'écrira :

$$z_0 = (z_h - D) \cdot e^{-X(z_h)^{-1/2}} \quad (\text{II } 20)$$

L'utilisation de ces diverses formules et les confrontations expérimentales seront présentées au paragraphe II.5.2c . Cependant, il est possible de conclure que les solutions trouvées pour les grandeurs  $U(z)$ ,  $K(z)$  et  $U_*$  sont toutes, pour une hauteur donnée et dans la mesure où les paramètres du couvert  $f(z)$ ,  $L(z)$  et  $C_M(z)$  sont indépendants de la vitesse du vent, proportionnelles à la vitesse de référence  $U(z_R)$ . Quant aux paramètres  $D$  et  $z_0$ , ils sont indépendants de la vitesse du vent.

Ces conclusions ne sont qu'approximativement vérifiées puisque, si la vitesse au sommet du couvert  $U(z_h)$  (fig.25) est bien à peu près proportionnelle à  $U(z_R)$ , la vitesse de frottement  $U_*$ , proportionnelle à  $U(z_R)$  pour une culture basse (fig. 27a et b), ne l'est plus tout à fait pour un maïs bien développé (fig. 27c). Quant à  $D$  et  $z_0$  (fig. 28 et 29), ils ne semblent pas être constants avec  $U(z_R)$ , bien que cette variation puisse être en partie contestée (cf. par. II,1.3). Nous verrons que ces premières contradictions ne sont dues en grande partie qu'aux hypothèses simplificatrices admises et en premier lieu la neutralité thermique. Elle conduit lors de l'interprétation d'un profil expérimental à une sous-estimation de  $U$  d'autant plus faible que  $U(z_R)$  est plus faible, d'où probablement la non linéarité.

## II.2.2. Etude de quelques cas particuliers donnés par la solution générale proposée

Si l'équation différentielle II,14 ou II,14 bis n'a pas de solution analytique générale, quelques solutions particulières peuvent cependant être adoptées, solutions qui correspondent, par ailleurs, aux deux tentatives essentielles déjà réalisées pour résoudre le problème du profil de vitesse de vent au sein du couvert. L'aspect très général de la solution proposée se trouve donc ainsi confirmé puisqu'elle intègre les deux types de solutions jusqu'ici proposées.

La solution particulière la plus simple suggérée par l'équation est une constante :

$$X(z) = X_0$$

Cette solution particulière conduit à la relation :

$$C_M(z) \cdot f(z) \cdot L(z) = 4 \cdot k^2 \cdot X_0^{3/2} \quad (\text{II } 21)$$

On en déduit alors deux cas possibles :

- la solution la plus simple, supposant un couvert homogène et donnée par :

$$L(z) = \text{Cte}$$

- une solution ne supposant que l'homogénéité des organes ( $C_M(z) = \text{Cte}$ ) et admettant la variation de leur répartition ( $f(z)$ ), soit :

$$L(z) = \text{Cte}/f(z)$$

### a) Première solution particulière simple

Cette relation purement mathématique correspond, cependant, à un cas réel simple, celui d'un couvert parfaitement homogène défini par les caractéristiques constantes suivantes :

$f(z) = f$  (même densité en tout point).

$C_M(z) = C_0$  (même feuillage donc même coefficient de frottement si la gamme de vitesse  $U(z)$  reste faible).

$$L(z) = L(z_h) = L = \text{Cte} \quad (\text{même longueur de mélange au sein du couvert puisque même structure spatiale})$$

Cette hypothèse de la valeur constante de  $L(z)$  au sein du couvert homogène jusqu'au sommet  $z_h$  du couvert ( $L = L(z_h)$ ) ne se justifie cependant plus au voisinage du sol où l'on doit retrouver une loi en  $L(z) = cz$  (TAKEDA 1962).

La solution particulière en  $X_0$  aboutit, selon la relation II,15, à une solution du type :

$$\frac{U'(z)}{U(z)} = \sqrt{\frac{C_0 \cdot f}{4k^2 \cdot L^2}} = A$$

soit en intégrant cette relation (rel. III,16) :

$$U(z) = U(z_h) \cdot e^{-\int_z^{z_h} A \cdot dz} \quad (\text{III } 22a)$$

$$U(z) = U(z_h) \cdot e^{-A(z_h - z)}$$

Ce profil de vitesse correspond à celui donné par INOUE (1963) et repris par CIONCO (1965): cependant, il provoque une discontinuité au sommet du couvert due à la brusque variation de  $L(z)$  pour les hauteurs supérieures à  $z_h$ , hauteur pour laquelle la vitesse de frottement peut être calculée d'après la relation II,13 bis qui donne :

$$\frac{U_x}{\rho} = U_x^2 = k^2 \cdot L(z_h)^2 \cdot U'(z_h)^2$$

soit d'après II,22 :

$$U_x = k \cdot A \cdot L(z_h) \cdot U(z_h) \quad (\text{II } 22b)$$

De plus, si l'on suppose la variation linéaire classique de  $L(z)$  au-dessus du couvert selon la théorie de Prandtl (rel. II,8), au sommet du couvert, on aura :

$$kL(z_h) = k(z_h - D)$$



La hauteur de déplacement D du plan de référence aérodynamique s'écrira alors :

$$D = z_h - L(z_h) \quad (\text{II } 22c)$$

De même, le profil de vitesse au-dessus du couvert (loi du profil logarithmique) en fonction de D sera, selon la relation II,13 bis et II,22b :

$$U(z_h) = U(z_R) + \frac{U_*}{k} \log \frac{z_h - D}{z_R - D} \quad (\text{II } 22d)$$

Cependant, les relations précédentes (22a, b, c, d) ne déterminent pas entièrement le problème, puisque la valeur de  $L(z_h)$  reste indéterminée ; seule une mesure expérimentale supplémentaire telle que  $U(z_h)$  ou  $U_*$ , par exemple, peut lever cette indétermination.

Dans ce cas, la diffusivité turbulente devient :

$$K(z) = k^2 \cdot L^2(z_h) \cdot U(z) \cdot A = k \cdot L(z_h) \cdot U_* \cdot \frac{U(z)}{U(z_h)}$$

$$\frac{K(z)}{K(z_h)} = \frac{U(z)}{U(z_h)} \quad (\text{II } 23a)$$

rapport de diffusivité proportionnelle au rapport des vitesses au sein du couvert, modèle adopté par COWAN (1968) ; au-dessus du couvert on retrouve alors la solution linéaire liée au profil logarithmique :

$$K(z) = k \cdot U_* \cdot (z - D) \quad (\text{II } 23b)$$

La figure 33 illustre le type de solution  $U(z)$  et  $K(z)$  que l'on peut obtenir à partir de conditions connues ( $U(z_R) = 4 \text{ m s}^{-1}$ ,  $z_R = 6 \text{ m}$ ,  $z_h = 2 \text{ m}$ ,  $f = 2$  et  $C_o = 0,25$ ) ; ces valeurs conduisent, compte tenu des équations 22 et d'une valeur donnée de la vitesse de frottement ( $U_* = 0,54 \text{ m s}^{-1}$ ), à :

$$L(z_h) = 0,65 \quad U(z_h) = 1,34 \text{ m s}^{-1} \quad D = 1,35$$

#### b) Deuxième solution particulière

Cette même relation II,21 correspond à une seconde solution un peu plus proche de la réalité des couverts ( $f(z)$  variable), introduite par PERRIER (1967) qui provenait d'un calcul de  $L(z)$  à partir de la densité

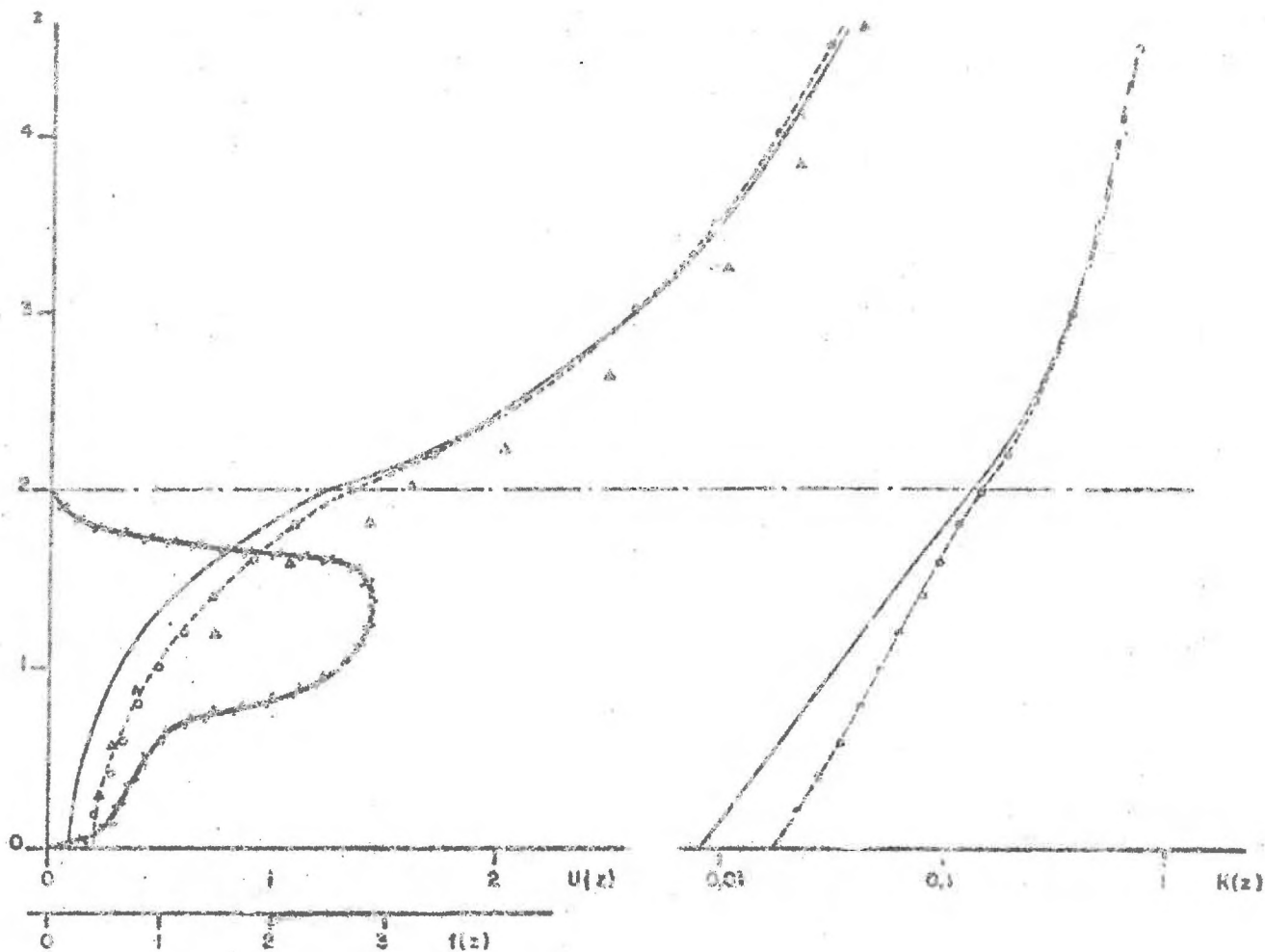


Fig. 33 - Profils de vitesse de vent et de diffusivité calculés et mesurés :

- o -- o Profils calculés selon les relations 22 a et 23 a et b (première solution)
- Profils calculés selon les relations 24a et 31a et b (deuxième solution)
- Δ Valeurs mesurées de la vitesse du vent
- ~~—~~ Profil vrai de densité de surface foliaire dont la valeur efficace moyenne a été prise égale à 2 pour le calcul des profils.

des obstacles et conduisait à la relation (à coefficient théorique voisin de 1,57) :

$$L(z) = \frac{\alpha}{f(z)}$$

Dans ces conditions,  $C_M$  pouvant être considéré comme constant et égal à  $C_0$ , si les feuilles sont de même type au sein du couvert, on peut écrire :

$$X_0 = \left( \frac{\alpha \cdot C_0}{k \cdot k^2} \right)^{2/3}$$

D'après II,15, le profil de vitesse sera alors donné par :

$$\frac{U'(z)}{U(z)} = \frac{f(z)}{\alpha} \left( \frac{\alpha \cdot C_0}{4 \cdot k^2} \right)^{1/3} = B \cdot f(z) \quad (\text{II } 24)$$

soit :

$$U(z) = U(z_h) \cdot e^{-B \int_{z_h}^z f(z) \cdot dz}$$

Or, d'après la relation I,5, on pourra écrire en fonction de la surface foliaire cumulée  $F(z)$  :

$$U(z) = U(z_h) \cdot e^{-B \cdot F(z)} \quad (\text{II } 24a)$$

Cependant, comme pour la solution simplifiée précédente, cette solution crée quelques difficultés aux deux extrémités du couvert, soit au niveau du sol, soit au sommet du couvert à cause de la discontinuité avec la solution de type logarithmique. La figure 33 illustre pour les mêmes conditions que précédemment la solution en  $U(z)$  très voisine de la précédente et la solution en  $X(z)$ , toutefois cette solution, moins bonne que dans le cas précédent puisque l'on a admis  $f(z) = Cte$ , a l'avantage de s'appliquer aussi au cas de  $f(z)$  variable et conduit alors à une solution plus proche de la réalité que précédemment (fig.35). Ces deux exemples nécessitent la connaissance de  $U_*$  qui d'après II,27 et II,28 appliqués au sommet du couvert donne :

$$U(z_h) = 1,26 \quad \text{et} \quad D = 1,415.$$

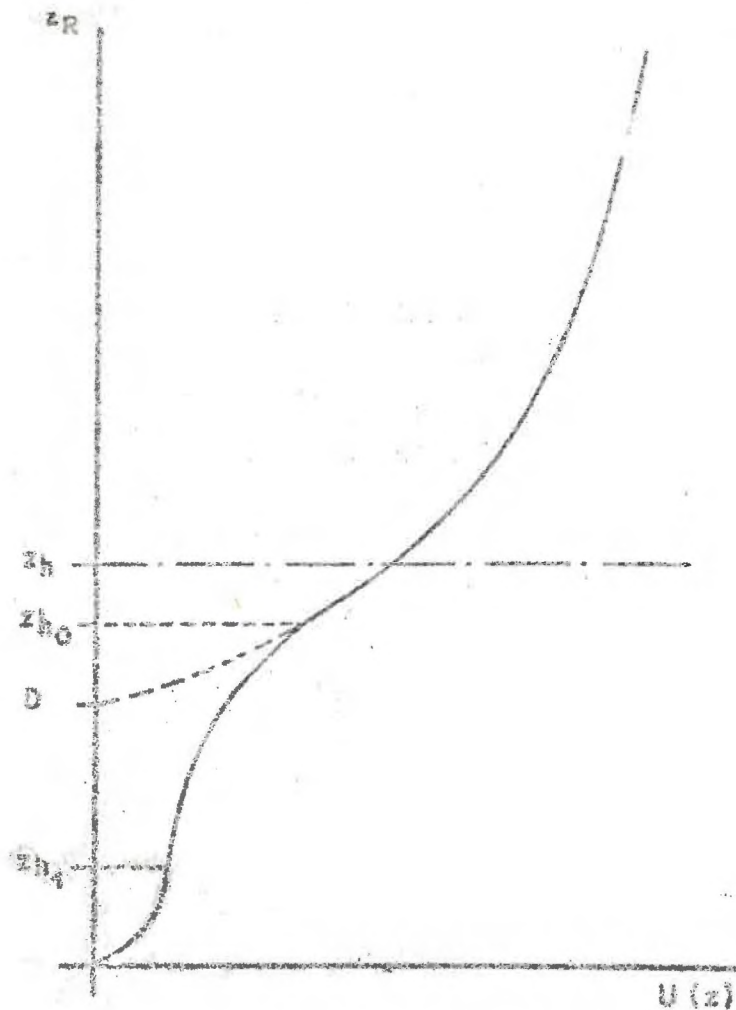


Fig.34 - Schéma de raccordement de la succession des trois profils précodifiés.

C'est dans le but d'améliorer le raccordement des profils et d'obtenir une solution plus proche de la réalité que PERRIER (1967) a proposé la série d'un profil logarithmique classique, puis du profil exponentiel (II,24a) et enfin, au voisinage du sol, d'un second profil logarithmique, ainsi que les solutions de meilleur ajustement entre ces profils pour une hauteur  $z_{ho}$  comprise entre  $D$  et  $z_h$  et une hauteur  $z_{h1}$  comprise entre la surface du sol et  $D$  (fig.34). Ces hauteurs étant définies par l'épaisseur de végétation qui permet, soit au voisinage du sommet ( $z_h - z_{ho}$ ), soit au voisinage du sol  $z_{h1}$  d'appliquer la relation  $L(z) = \alpha/f(z)$ , c'est-à-dire

en première approximation :

$$(z_{h_1} - z_{h_0}) f(z_{h_0}) = z_{h_1} \cdot f(z_{h_1}) = a \quad (\text{II } 25)$$

L'équation II,24a devient :

$$U(z) = U(z_{h_0}) \cdot e^{-B \cdot [F(z) - F(z_{h_0})]} \quad z_{h_1} < z < z_{h_0} \quad (\text{II } 26)$$

avec, comme dans le cas précédent, d'après II,13 bis :

$$U_* = k \cdot \alpha \cdot B \cdot U(z_{h_0}) \quad (\text{II } 27)$$

et avec un profil logarithmique au-dessus de cette hauteur  $z_{h_0}$  :

$$U(z_{h_0}) = U(z_R) + \frac{U_*}{k} \log \frac{z_{h_0} - D}{z_R - D} \quad (\text{II } 28)$$

Au voisinage du sol, avec l'hypothèse d'un autre profil logarithmique, ces relations deviennent :

$$U(z) = \frac{U_{*s}}{k} \log \frac{z + z_{os}}{z_{os}} \quad (z < z_{h_1}) \quad (\text{II } 29)$$

la nouvelle relation qui s'accompagne au niveau du raccordement  $z_{h_1}$  de la relation analogue à II,22b et II,27 :

$$U_* = k \cdot \alpha \cdot B \cdot U(z_{h_1})$$

soit d'après II,26 qui donne  $U(z_{h_1})$  et d'après II,27 :

$$U_{*s} = U_* \cdot e^{-B \cdot [F(z_{h_1}) - F(z_{h_0})]} \quad (\text{II } 30)$$

D'autre part, en remplaçant  $U_{*s}$  et  $U(z_{h_1})$  par leur valeur dans II,29, on obtient :

$$z_{os} = z_{h_1} \left( e^{-\frac{k \cdot U(z_{h_0})}{U_*}} - 1 \right) \quad (\text{II } 31)$$

où  $U_{*s}$  est la vitesse de frottement à la surface du sol et  $z_{os}$  la rugosité de la surface du sol, compte tenu de la présence du couvert (rôle des tiges).

Le profil de diffusivité peut alors s'écrire pour les trois parties du profil :

$$K(z) = k \cdot U_{zs} \cdot (z - D) \quad z > z_{ho} \quad (\text{II } 31a)$$

d'après la relation II,13 ter, on aura pour  $z_{hl} \leq z \leq z_{ho}$  :

$$K(z) = k^2 \cdot \frac{g^2}{f(z)^2} \cdot U'(z)$$

soit d'après II,24 et en faisant apparaître la valeur charnière  $K(z_{ho})$  :

$$\frac{K(z)}{K(z_{ho})} = \frac{f(z_{ho})}{f(z)} \cdot \frac{U(z)}{U(z_{ho})} \quad (\text{II } 31b)$$

et enfin, pour  $z < z_{hl}$  d'après la loi du profil logarithmique :

$$K(z) = k \cdot U_{zs} \cdot (z + z_{os}) \quad (\text{II } 31c)$$

La figure 35 illustre un ensemble de profils  $U(z)$  et  $K(z)$  obtenus directement (rel. II,24a) ou à l'aide de la succession de trois profils, toujours pour les mêmes conditions ( $U(z_R)$ ,  $z_R$ ,  $U_0$  et  $U$ ) (cf. fig.33), mais pour un profil de densité  $f(z)$  relatif à un maïs dense (117 000 pieds  $ha^{-1}$ ), pour lequel la valeur moyenne  $f$  est approximativement 2 (similitude entre  $U(z)$  calculée pour  $f = 2$  et  $U(z)$  mesurée (fig.33)).

Les principaux paramètres obtenus sont alors, d'après les relations II,26 à II,31 :

$$\begin{aligned} z_{ho} &= 1,63 \text{ m} & z_{hl} &= 0,6 \text{ m} \\ D &\approx 1,01 & U_{zs} &= 0,105 \text{ ms}^{-1} & z_{os} &\approx 0,39 \text{ m} \end{aligned}$$

Une meilleure approximation et une meilleure continuité sont ainsi obtenues à l'aide de la succession des trois profils ; elles conduisent dans certains cas, comme dans celui présenté, à des profils de diffusivité avec maximum, qui correspondent à de nombreuses observations (LEMON 1970 - DRUILLET et al. 1971).

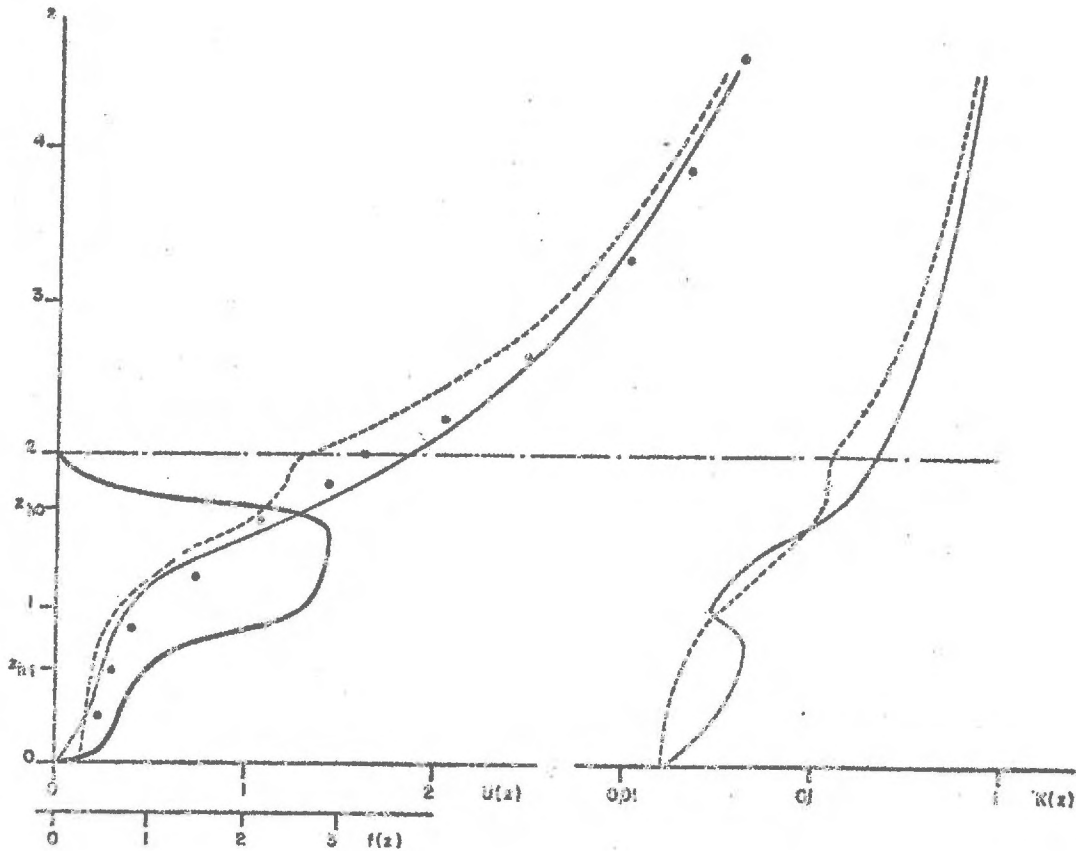


Fig. 35 - Profils de vitesse de vent et de diffusivité pour une culture de maïs :

- \* Valeurs mesurées .
- Valeurs calculées selon les relations 24a et 31a et b
- Valeurs calculées selon le double raccordement (rel.26 - 28 - 29 et 31a, b, c).

L'ajustement en  $z_{ho}$  reste toujours assez incertain et n'offre pas une solution de continuité parfaite, bien qu'il soit généralement meilleur que l'ajustement en  $z_h$  du cas précédent ; de même, le coefficient théorique  $\alpha$  doit souvent être retouché pour obtenir une meilleure coïncidence avec les profils expérimentaux. Il n'en reste pas moins que cette dernière solution de trois profils successifs, contrairement à la précédente, a l'avantage d'être valable pour tous les types de couvert à densité de surface foliaire  $f(z)$ , homogène ou non, selon la verticale.

### II.2.3. Conclusions

Ces solutions particulières (cf. par.II.2.2), bien qu'ayant l'avantage de pouvoir être traduites de façon analytique, ne sont qu'approchées et pleinement satisfaisantes que dans la mesure où elles sont ajustées à un type de couvert. Elles ne représentent qu'un premier pas que nous cherchons à dépasser pour éviter les solutions de discontinuité entre le milieu au-dessus du couvert, au sein du couvert et au voisinage du sol.

Pour cela, il est nécessaire d'étudier une loi de variation continue et générale du paramètre  $L(z)$  (cf.par.II.2.1) qui dépasse les approximations précédentes ainsi que certaines lois arbitraires et particulières préconisées dans quelques études (BARR, 1971) afin de conduire à une réelle possibilité de généralisation à l'ensemble des couverts et de leurs situations.

Par la suite, compte tenu d'une telle loi de variation de  $L(z)$ , toutes les investigations se feront à partir de la résolution de l'équation II,14bis, puis des équations II,16 et II,17, afin d'obtenir les profils de vitesse et de diffusivité turbulente. En réalité, les équations II,14 bis et 17 soulignent bien la nécessité de connaître pour tout couvert, non seulement la fonction  $L(z)$  (cf.par. II.4) mais encore le produit de la densité totale de surface foliaire  $f(z)$  par le coefficient de traînée moyen de la couche  $C_M(z)$  (cf.par. II.3). La connaissance de ces deux types de fonctions  $C_M(z)$ ,  $f(z)$  et  $L(z)$  représente la condition nécessaire et suffisante à la détermination recherchée des profils de vitesse et de diffusivité turbulente selon la solution générale établie. Ces deux types de fonction font l'objet de notre étude et seront présentés au cours des deux paragraphes suivants .

### II.3 - SOLUTION PROPOSEE POUR LE CALCUL DU COEFFICIENT DE TRAÎNÉE MOYEN $C_M$

Le coefficient de traînée  $C_0$  pour une feuille de surface  $S$  se définit comme étant le rapport entre la force de traînée  $F$  subie par la feuille et le produit de la densité de l'air  $\rho$ , de la surface  $S$  et du carré de la vitesse  $U^2$  :

$$C_0 = \frac{F}{\rho \cdot S \cdot U^2} \quad (II\ 32)$$



En réalité, cette force se compose, d'une part, d'une force  $F_p$  due à des différences de pression entre les deux faces de la feuille, et d'autre part, d'une force  $F_c$  due à la contrainte pariétale  $\tau_f$  à la surface de la feuille ( $\tau_f = F_c/S$ )

$$F = F_p + F_c \quad \text{et} \quad C_o = C_p + C_c$$

avec :

$$C_p = \frac{F_p}{\rho \cdot S \cdot U^2} \quad C_c = \frac{\tau_f}{\rho \cdot U^2}$$

Il est nécessaire de dissocier ces deux termes, car si le premier est négligeable pour une feuille horizontale parallèlement à l'écoulement, il devient vite prépondérant en fonction de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale (fig.36) (CALVERT 1967 - THOM 1969). Aussi, le coefficient théorique donné par BLASIUS pour une incidence nulle ( $\phi = 0$ ) d'une plaque plane mince en régime laminaire :

$$C_c = 1.328 \left( \frac{U \cdot d}{\nu} \right)^{-1/2} = 1.328 \text{ Re}^{-1/2}$$

(d, dimension moyenne de la surface,  $\nu$ , viscosité cinématique de l'air) est-il la plupart du temps très différent des valeurs obtenues pour des feuilles (THOM 1969).

Enfin, il ne faut pas oublier que si le coefficient de frottement varie en fonction de la vitesse du vent ( $U^{-1/2}$ ), cas particulier de la plaque plane mince, le coefficient global de traînée  $C_o = C_p + C_c$  dont il est question ici, varie aussi en fonction d'une puissance de la vitesse  $U$  en particulier dans la zone des faibles vitesses ( $< 2 \text{ m s}^{-1}$ ) pour devenir pratiquement constant à forte vitesse ( $> 2 \text{ m s}^{-1}$ ). La plupart des zones au sein du couvert correspondent à ces gammes de faible vitesse (fig.35) et il faudra donc tenir compte, non seulement de la dimension moyenne, de la forme, de la position, de la surface des organes, mais encore de la vitesse moyenne  $U(z)$  de la couche.

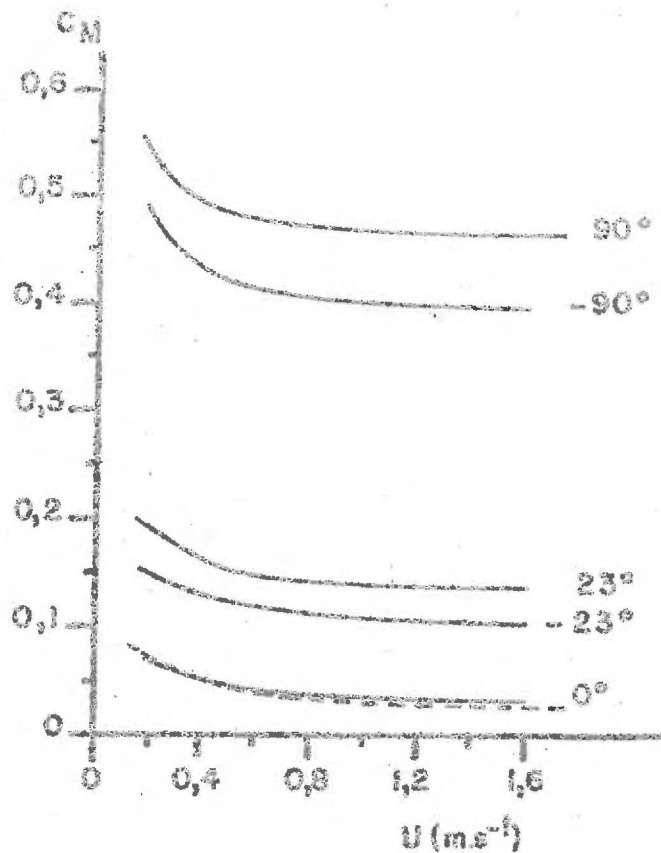


Fig. 36 - Coefficient de traînée d'une feuille en fonction de la vitesse du vent et pour différents angles d'inclinaison (d'après THOM 1969).

Ainsi, trois particularités devront intervenir pour les différentes couches au sein du couvert :

- la vitesse moyenne  $U(z)$  de la couche,
- les différents types d'éléments ( $i$ ) qui la composent (forme, dimension),
- l'orientation des divers éléments par rapport à l'écoulement.

En suivant l'analyse détaillée donnée par THOM (1971), on pourra écrire au niveau d'une couche de cote  $z$ , que la valeur du produit  $C_M(z) \cdot f(z)$ , où  $C_M(z)$  représente le coefficient de traînée moyen équivalent pour la couche et  $f(z)$  la densité totale de surface foliaire, est donnée par la relation suivante :

$$C_M(z) \cdot f(z) = \sum_i \cdot \sum_\phi \cdot a_{i\phi}(z) \cdot C_{s_i}(U(z), \phi, d(z)) \quad (\text{II } 33)$$

$i$  : indice caractérisant les différents types d'éléments composant le couvert (feuilles, tiges épis, épillets ...)

$\phi$  : angle entre la direction du vent et la surface de l'élément considéré (ou section droite faisant le plus grand angle  $\phi$  dans le cas d'éléments cylindriques).

$a_{i\phi}$  : densité de surface foliaire relative à l'élément  $i$  et à la classe d'angle  $\phi$  (tableau I)

$C_{oi}$   $[U(z), \phi, d(z)]$  : le coefficient de trainée de l'élément  $i$  en fonction de la classe d'angle et de la vitesse de la couche.

Une première contradiction apparaît évidemment à ce niveau puisque jusqu'à présent le coefficient  $C_M(z)$  a été pris indépendant de la vitesse du vent, or dans la gamme normale des vitesses de vent faibles au sein du couvert (fig.37), rappelons qu'il est nécessaire d'introduire une variation de  $C_{oi}$  en fonction de la vitesse. En réalité, cette difficulté sera évitée en résolvant l'équation II,14bis, pour laquelle  $C_M(z)$  est initialement calculé à partir d'un profil  $U(z)$  probable donné par une atténuation exponentielle du type II,24a, puis par approximations successives à partir du profil vrai de vitesse trouvé à chaque itération (2 à 3 itérations suffisent pour avoir une très bonne convergence).

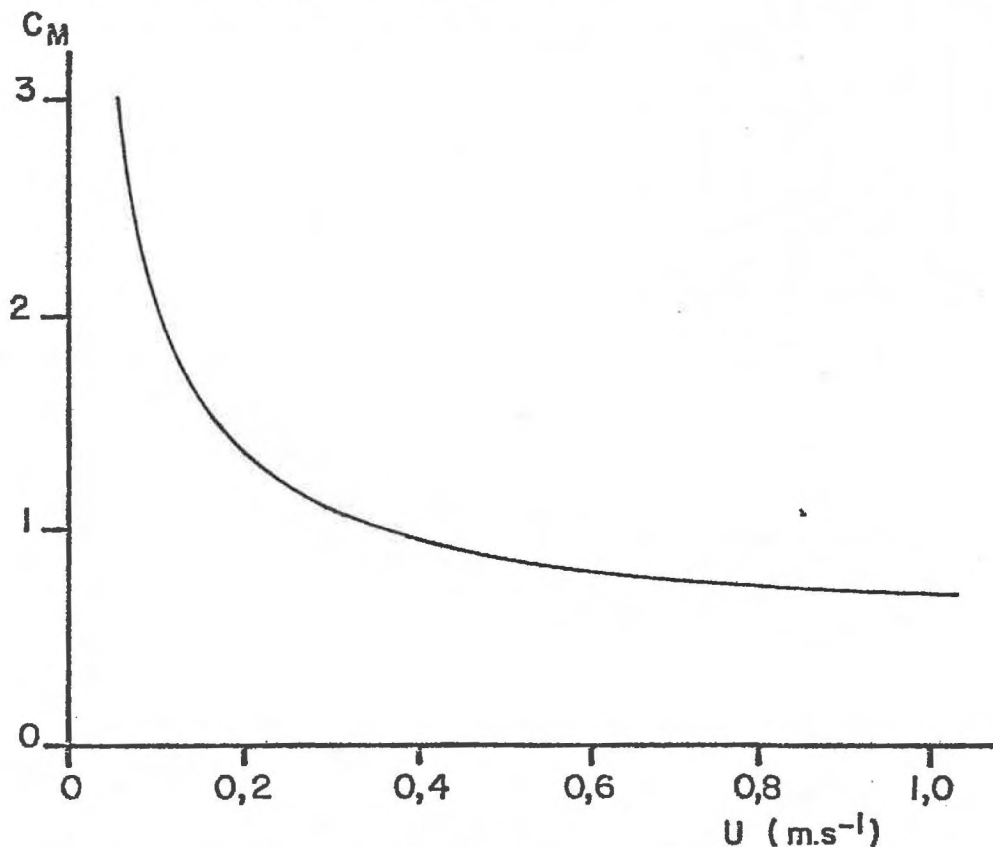


Fig. 37 - Evolution du coefficient de trainée d'un élément cylindrique en fonction de la vitesse du vent (SCHLICHTING 1955).

Pour une vitesse du vent donnée à priori ou calculée, le calcul de la relation II,33 ne pose pratiquement plus de difficultés, surtout que les classes d'éléments  $i$  se résument pratiquement à seulement trois catégories :

- la classe des feuilles de dimension moyenne  $d_f(z)$  (cf. par. I,6) qui se subdivise en neuf groupes en fonction des incidences ( $0 - 10^\circ$  ;  $10^\circ - 20^\circ$  etc ...).
- la classe unique des tiges ( $\phi = 90^\circ$ ) de diamètre  $d_t(z)$  ; les tiges étant le plus souvent en position verticale.
- la classe unique des épis assimilés aussi à des cylindres verticaux de diamètre  $d_c(z)$ .

Enfin, compte tenu de la figure 36 qui souligne une évolution semblable des coefficients de trainée  $C_{of}$  des feuilles en fonction de la vitesse pour différentes inclinaisons  $\phi$ , on pourra écrire :

$$C_{of} [U(z), \phi, d_f(z)] = \alpha(\phi) \cdot C_{of} [U(z), d_f(z)]$$

le coefficient  $\alpha(\phi)$  pouvant être tiré de la figure 36.

THOM (1971) donne l'approximation suivante pour une culture de haricot :

$$C_{of} [U(z), d_f(z)] \sim 1,08 U^{-1/2}$$

A partir des graphiques 36 et 37 ou de mesures plus fines des coefficients de trainées  $C_{oi}$  des différents éléments d'un couvert, dont malheureusement très peu de données sont disponibles, il est possible de calculer la relation II,33 de la façon suivante :

$$C_M(z) \cdot f(z) = \sum_{\phi} a_{f\phi}(z) \cdot \alpha(\phi) \cdot C_{of}(z) \quad (\text{feuilles } \nabla \text{ inclinées})$$

$$+ a_t(z) \cdot C_{ot}(z) \quad (\text{tiges verticales}) \quad (\text{II 33 bis})$$

$$+ a_e(z) \cdot C_{oe}(z) \quad (\text{épis verticaux})$$

Un exemple du profil  $C_M(z)$  est donné, d'une part, pour un couvert de maïs (La Minière) et d'autre part, pour un couvert de blé (fig.38).

En conclusion, il faut cependant rappeler qu'une variation appréciable de ces coefficients apparaît lorsque les feuilles vont se mettre à bouger et à flotter dans le vent; une augmentation de 20% de  $C_{of}$  a été

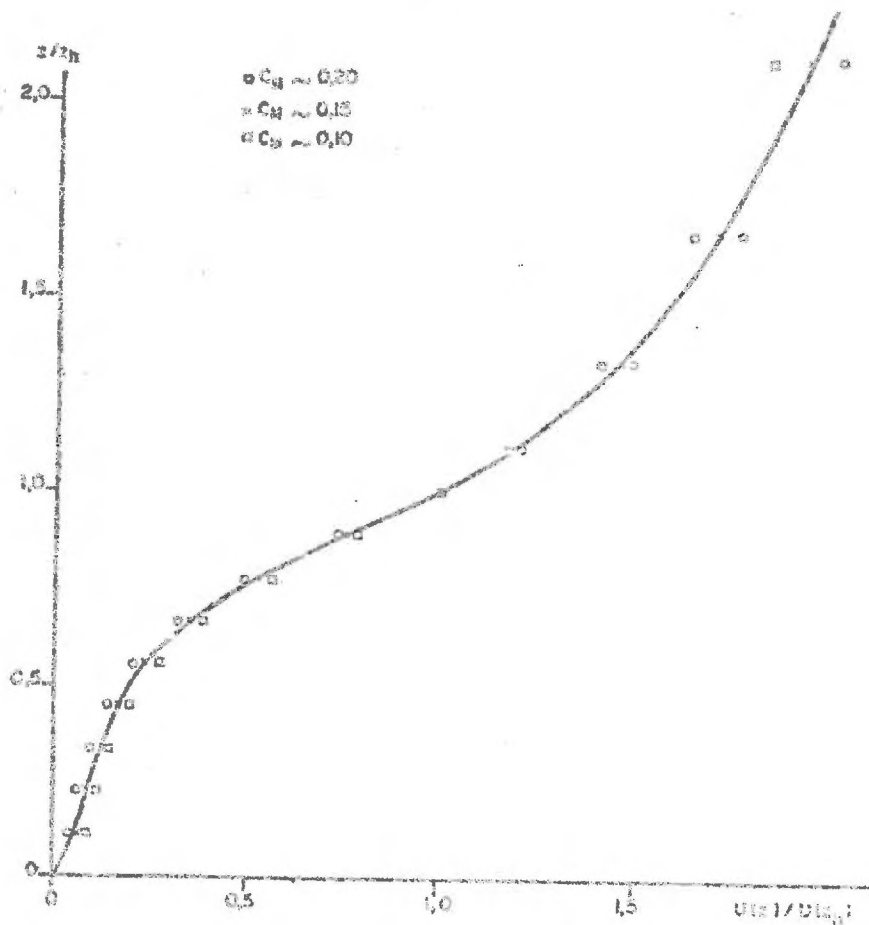
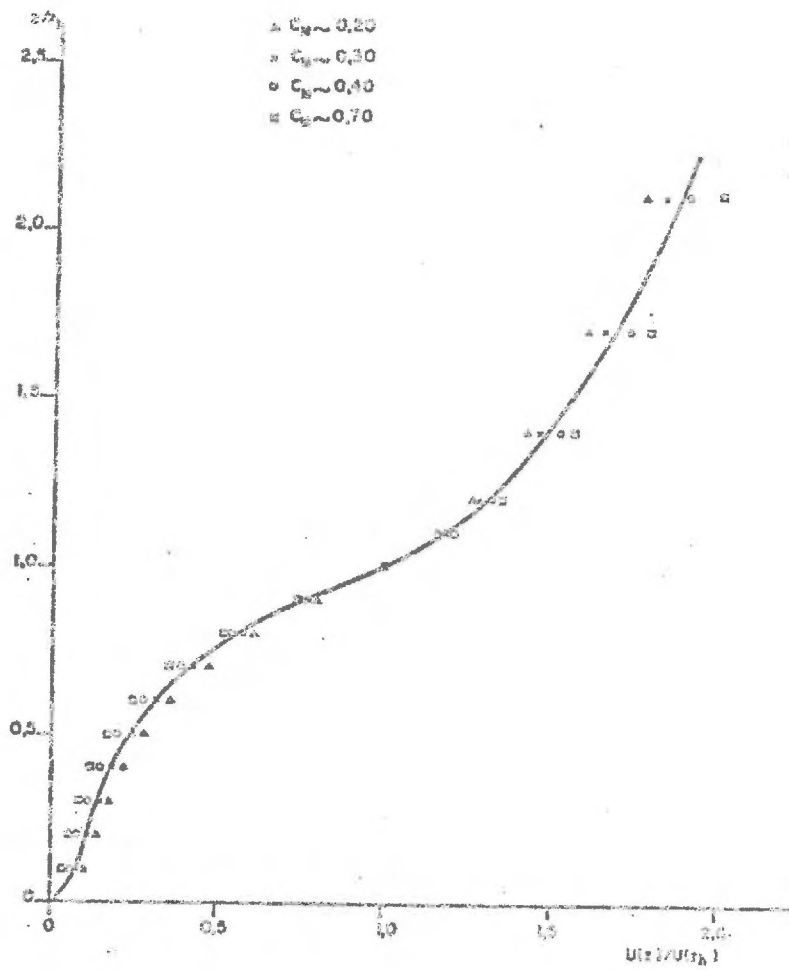


Fig. 39(a et b) - Evolution du profil de vitesse du vent en fonction du coefficient de trainée ( $U$  grand) pour une culture de maïs (a) et de blé (b).

démontrée par PARLANGE et al. (1971 - 1972) et SCHUEPP (1972).

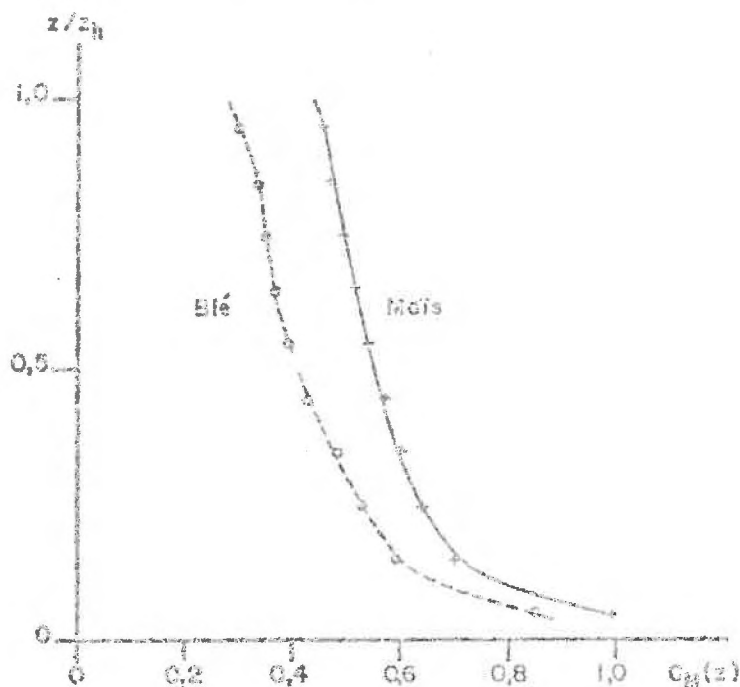


Fig. 38 - Profil calculé du coefficient moyen de traînée pour une culture de maïs et de blé.

Cependant, il ne faut pas surestimer le rôle des valeurs de  $C_M(z)$  puisque de fortes variations de ce paramètre (fig.39) n'entraînent que de faibles variations dans le profil des vitesses et dans les paramètres tels que  $U_*$  et  $z_0$  (fig.40).

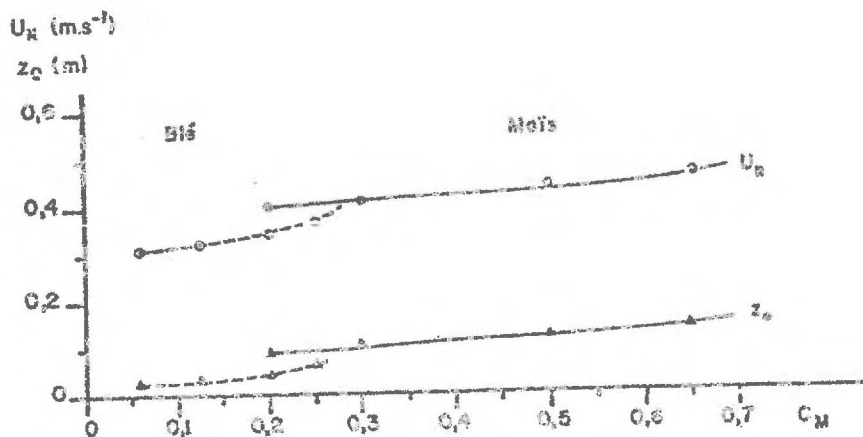


Fig.40 - Evolution de la vitesse de frottement et de l'épaisseur de rugosité  $z_0$  en fonction du coefficient de traînée ( $U$  grand) pour une culture de maïs et de blé.

#### II.4. SOLUTIONS PROPOSEES POUR LE CALCUL DE $L(z)$

Il a déjà été mentionné que l'hypothèse de base était une tentative de généralisation du concept de la longueur de mélange introduite par PRANDTL au cas d'un milieu dont les obstacles ne se réduisent plus à un simple plan mais à une infinité de petites surfaces dispersées dans l'espace au-dessus d'un plan. Cette idée de départ avait conduit PERRIER (1967) au calcul d'une longueur de mélange  $l(z)$  au sein d'un couvert homogène, calcul assez satisfaisant car conduisant à des résultats proches de la réalité, mais qui n'assurait pas la continuité aux bornes sol et air du couvert (cf. solution décrite au paragraphe II.2.2b).

Nous avons donc recherché une extension de ce concept schématique de longueur de mélange qui serait valable dans toutes les situations et permettrait ainsi d'avoir une valeur  $l(z)$  applicable à n'importe quel niveau au-dessus du couvert. Par hypothèse, nous écrirons :

$$L(z) = G \text{ (géométrie du milieu, stabilité de l'air, turbulence de l'air)}$$

Cette expression suggère que le terme dominant doit être celui de l'espace libre à chaque niveau, c'est-à-dire, un rôle dominant attribué à la disposition géométrique des obstacles : c'est essentiellement cet aspect qui sera analysé ici.

$$L(z) = G \text{ (géométrie)}$$

Le second terme probable de variation de  $L(z)$  est la stabilité thermique de l'air à chaque niveau. L'action de la non neutralité thermique de l'air (BUSINGER et al. 1967), comme on l'a rappelé au paragraphe II.1.3, modifie notablement les profils et peut, en première approximation, se traiter à partir d'un terme correctif de la forme (PANOWSKY 1963) :

$$L(z) = L_0(z) \cdot (1 - \sigma \cdot R_i)$$

où  $R_i$  est le nombre de Richardson et  $\sigma$  un coefficient. En réalité, bien que ce type de correction semble être nécessaire dans certaines conditions (DRUILHET et al. 1971), il ne sera pas systématiquement étudié ici.

Enfin, il est probable que la structure de la turbulence au niveau de référence peut avoir un rôle sur la valeur de  $L(z)$  au sein du couvert, puisque la contribution des différentes échelles de tourbillon est

probablement variable pour une même structure du couvert en fonction de la profondeur. Bien que de nombreux travaux soient poursuivis dans ce sens, depuis les premières expériences de STOLLER et LEMON, 1963 (ALLEN, 1968 - ISOBE 1972 - CIONCO, 1972), en-dehors de quelques corrélations entre structure de turbulence et hauteur dans le couvert, (SAITO et al. 1970 - ISOBE, 1972) aucune autre relation n'a été donnée et rien ne semble ressortir du rôle d'une variation de la structure de la turbulence de l'air au-dessus du couvert sur ce qui se passe au sein de celui-ci.

#### II.4.1. Définition d'une grandeur L(z)

La relation étudiée sera donc pour l'instant de la forme :

$$L(z) = G(\text{structure du couvert})$$

L'hypothèse de départ sera, pour un point A de côte z, une longueur L(z) égale à l'intégrale radiale (sphère centrée sur A et de rayon r) pondérée par une certaine probabilité de ne pas rencontrer d'obstacle à l'intérieur de la sphère de rayon r. En réalité, on introduira la probabilité complémentaire P(r) de rencontrer un obstacle dans une direction quelconque depuis le point A considéré (côte z) jusqu'à la distance r de ce point :

$$L(z) = \int \left[ 1 - P(r) \right] dr$$

La limite de l'intégration se fera pour la distance où, pour une direction au moins de l'espace ( $\frac{1}{2} \pi$  stéradian), la probabilité de rencontrer un obstacle est l'unité : ce sera au plus la distance z à laquelle se trouve la surface du sol. On écrit donc :

$$L(z) = \int_0^{r=z} \left[ 1 - P(r) \right] . dr$$

Ainsi, pour un point A situé dans l'air libre à une distance z d'un plan (fig.41), on aura les valeurs suivantes :

- P(r)=0 (r < z) car aucun obstacle quelle que soit la direction considérée
- P(r)=1 (r ≥ z) car un obstacle sûr, au moins dans la direction A<sub>x</sub> du sol.

Dans le cas d'obstacles répartis dans l'espace, à partir d'un point A quelconque de côte z (fig.41) on pourra toujours définir, pour une sphère creuse centrée sur A et d'épaisseur dr, une certaine espérance de surface



d'obstacles, pour la zone ou les zones où la présence de ces obstacles est possible au sein de cette sphère creuse. On calculera alors la variation de probabilité de présence d'une surface élémentaire par unité d'accroissement d'épaisseur de la sphère creuse  $\frac{dP_s}{dr}(r)$ , puis finalement, la variation de probabilité  $\Delta P(z)$  recherchée qui permettra de résoudre l'intégrale ci-dessus.

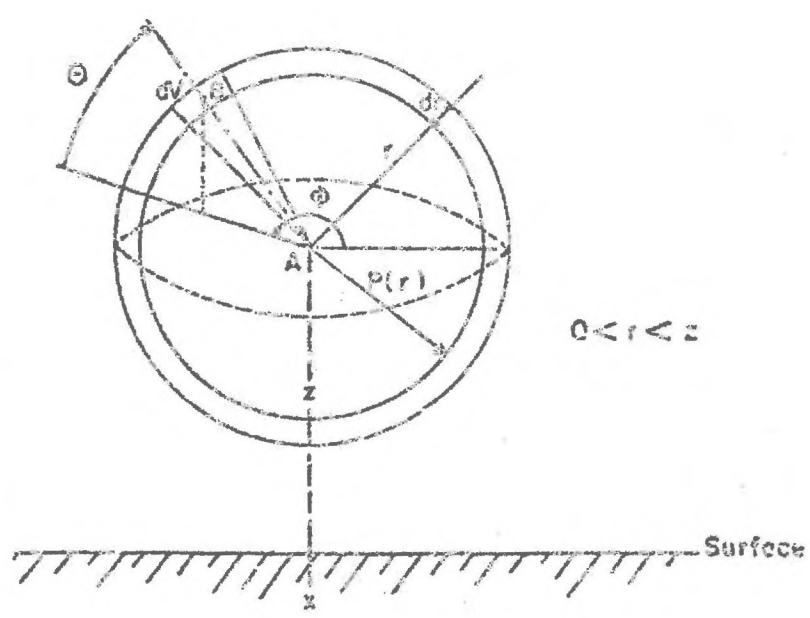


Fig. 41 - Schéma d'intégration à partir d'un point A de côte z.

a) Calcul de la probabilité de présence d'une surface

- Si  $f$  est la densité de surface ( $m^2 m^{-3}$ ) des obstacles, densité définie pour l'élément de volume  $dV$  autour d'un point B de la sphère creuse, et  $f_h$  la valeur de  $f$  en projection sur l'élément de surface  $dS$  de normale  $AB$ , la surface probable pour l'élément d'angle solide  $d\Omega = \frac{dS}{r^2}$  vue du point A sera :

$$f_h \cdot dV$$

et l'espérance de surface en ce point sera :

$$\frac{f_h \cdot dV}{dS} = f_h \cdot dr \tag{II 34}$$

valeur qui s'accroît pour des zones où la densité des obstacles augmente, c'est-à-dire lorsque la probabilité de présence d'un obstacle vrai croît. Localement la valeur  $f_h$  devient infinie pour un obstacle certain au point B, dont la surface ne serait pas parallèle à la direction AB et qui ne serait pas infiniment mince : c'est le cas, par exemple, de la surface du sol. De même l'absence certaine d'obstacle se traduit par une densité de surface nulle.

- Si, en tout point de la sphère creuse, il est possible de définir la densité de surface locale  $f_h(r, \theta, \phi)$  en projection sur le rayon correspondant défini par sa hauteur  $\theta$  ( $\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}$ ) et son azimut  $\phi$  ( $0 < \phi < 2\pi$ ) la variation de probabilité de présence d'une surface élémentaire par unité d'accroissement d'épaisseur de la sphère creuse s'écrira :

$$\dot{S}_p = \frac{dP_s(r)}{dr} = \int_{\phi = -\pi}^{\phi = \pi} \int_{\theta = -\pi/2}^{\theta = \pi/2} f_h(r, \theta, \phi) \frac{r^2 \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\phi}{4\pi r^2} \quad (II 35)$$

Ce calcul correspond à tout point A de côte z situé au sein du couvert (hauteur  $z_h$ ), et pour un rayon r tel que tout point de la sphère creuse considérée se situe au sein du couvert ( $r < z_h - z$ ), (fig.42) ; de cette façon des obstacles sont possibles en tout point de la sphère creuse.

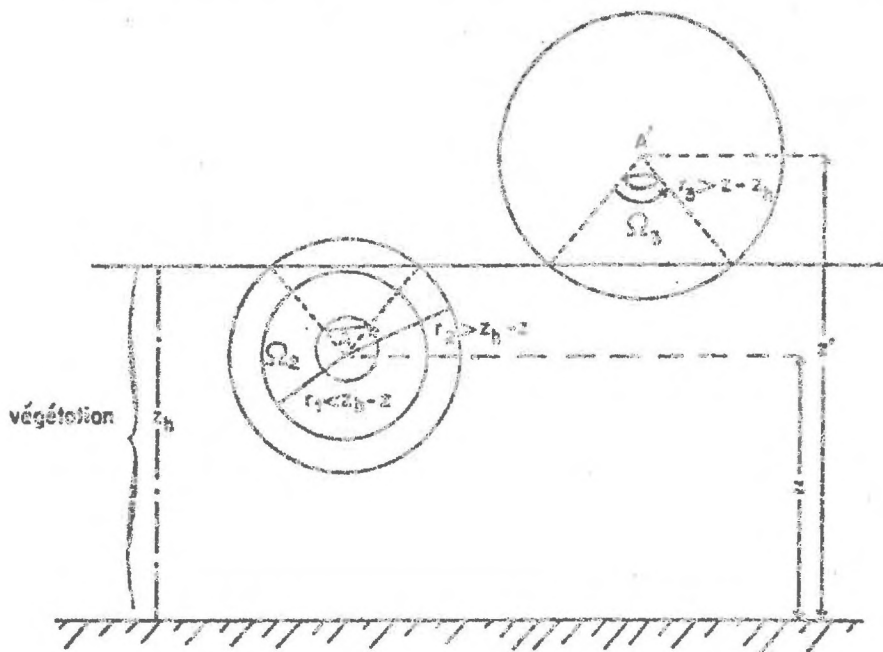


Fig.42 - Variation de l'angle solide d'intégration en fonction de la position A et du rayon d'intégration r :

$$\begin{array}{ll} \Omega_1 = 2\pi & r < z_h - z \\ \pi < \Omega_2 < 2\pi & z_h - z < r < z_h \\ \Omega_3 < \pi & z - z_h < r \end{array}$$

- Si  $f_h(r, \theta, \phi)$  ne peut être défini que pour certains points de la sphère creuse correspondant à un angle solide  $\Omega$  (zone où les obstacles peuvent être présents), la probabilité de présence d'une surface élémentaire par unité d'accroissement d'épaisseur de la sphère creuse, s'écrira :

$$S_p = \frac{1}{\Omega} \iiint_{\Omega} f_h(r, \theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (\text{II } 35 \text{ bis})$$

Ce second calcul correspond à tous points A à l'extérieur du couvert et à l'intérieur ( $r > z_h - z$ ) pour lesquels les sphères creuses ne se trouvent qu'en partie au sein du couvert (fig. 42).

b) Calcul de la variation de probabilité

La diminution relative de la probabilité de ne pas rencontrer d'obstacle à la distance  $r$  sera égale à la probabilité de présence d'une surface élémentaire par unité d'accroissement d'épaisseur de la sphère creuse (rel. II, 35 et 35 bis), soit :

$$\frac{-d \left[ 1 - P(r) \right] / dr}{\left[ 1 - P(r) \right]} = \frac{d P_s(r)}{dr} = S_p \quad (\text{II } 36a)$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = \left[ 1 - P(r) \right] \cdot S_p \quad (\text{II } 36b)$$

Cette expression n'est naturellement valable que si l'on ne suppose aucune répartition privilégiée des obstacles. Un paramètre correctif  $ax$  est à introduire pour tenir compte des obstacles qui présenteraient la particularité de se disposer, soit avec une tendance à un recouvrement minimum, donc à se placer dans les endroits non encore ombrés, soit à l'inverse avec une tendance à un recouvrement maximum ( $ax > 1$ ) :

$$\frac{dP(r)}{dr} = \left[ 1 - ax \cdot P(r) \right] \cdot S_p \quad (\text{II } 36c)$$

et ceci tant que  $\left[ 1 - ax \cdot P(r) \right]$  est supérieur à zéro ; dans le cas contraire, la valeur devient zéro.

Ces expressions (II,36b et c) conduisent à la valeur suivante de  $1 - P(r)$  :

$$\sqrt{1 - P(r)} = \frac{e^{-ax} \int_0^r S_p \cdot dr - (1 - ax)}{ax} \quad (\text{II } 37)$$

Comme nous avons vu que la borne supérieure de l'intégrale (II,34) pour un point de côte  $z$  est précisément cette valeur  $z$ , puisque la surface du sol est alors atteinte et que  $P(r > z)$  devient égal à l'unité, la valeur  $L(z)$  pour  $z < z_h$  s'exprimera par :

$$L(z) = \frac{ax - 1}{ax} z + \frac{1}{ax} \int_0^z e^{-ax} \int_0^r S_p \cdot dr \cdot dr \quad (\text{II } 37a)$$

avec, dans le cas particulier d'un couvert parfaitement homogène ( $ax = 1$  et  $S_p = \text{Cte}$ ) :

$$L(z) = \left[ \frac{1 - e^{-S_p \cdot z}}{S_p} \right] \quad (\text{II } 37b)$$

La véritable valeur de la longueur de mélange  $l(z)$  est donc :

$$\text{pour } z < z_h \quad l(z) = k \cdot L(z)$$

$$\text{pour } z \geq z_h \quad l(z) = k \cdot (z - z_h) + k \cdot L(z, z_h) \quad (\text{II } 38)$$

$$L(z, z_h) = \frac{ax - 1}{ax} z_h + \frac{1}{ax} \int_{z-z_h}^z e^{-ax} \int_{z-z_h}^r S_p \cdot dr \cdot dr \quad (\text{II } 38 \text{ bis})$$

Il est important de préciser que cette solution n'est pas strictement conforme à la loi logarithmique classiquement utilisée au-dessus du couvert qui admet que :

$$l(z) = k \cdot (z - D) \quad z > z_h$$

En effet, la valeur de la hauteur de déplacement du plan de référence  $D$  serait par comparaison avec (II,38 bis) :

$$D = z_h \cdot \left[ 1 - \frac{L(z, z_h)}{z_h} \right] \quad (\text{II } 39)$$

or la valeur  $L(z, z_h)$  dépend partiellement, par l'intermédiaire de  $S_p$  (paragraphe suivant), de la côte  $z$  et n'est donc pas une constante ; cette difficulté n'apparaîtra pas dans le cas de la solution simplifiée proposée au paragraphe II.4.3. Cependant, la faible variation de  $D$  en fonction de  $z$  permet toujours d'obtenir en première approximation et de façon assez précise un profil logarithmique au-dessus du couvert et une estimation de  $D$ . Enfin, pour plus de précision, les valeurs de  $L(z)$  doivent toutes être augmentées de la valeur  $k.z_{0s}$  due à la rugosité de la surface du sol qui est une des conditions limites admises pour la borne inférieure au niveau du sol (cf. par. I.3.2.1).

#### II.4.2. Calcul de la fonction $S_p$

##### a) Solution générale

Cette fonction sera définie à partir de la connaissance de  $f_h(r, \theta, \phi)$  qui représente la densité de surface foliaire moyenne en un point de l'espace vue selon la direction  $(\theta, \phi)$  qui est donc la normale à la surface  $f_h(r, \theta, \phi)$ . En fait, l'hypothèse de départ qui consiste à admettre une homogénéité horizontale du couvert (cf. par. I.2.1) permet de caractériser chaque couche du couvert de côte  $y$  par une densité moyenne  $f(y)$  (cf. par. I.3.1a) et, au sein de cette couche, de repérer les feuilles par leur normale  $\vec{n}$  et leur surface moyenne  $f_h$  recherchée et définie par :

$$f_h(y, \theta, \phi) = \sum_0^i s_f \left| \vec{u} \cdot \vec{n} \right| \quad (\text{II } 40)$$

avec :

$$f(y) = \sum_0^i s_f$$

$f(y) = \sum_0^i s_f$ , c'est la densité de surface foliaire au niveau  $y$

$s_f$  = la surface moyenne des  $i$  feuilles

$y$  =  $z + r \sin \theta$ , où  $z$  est la côte du point pour lequel on calcule la fonction  $S_p$ ,

$r$  le rayon de la sphère autour de ce point, et

$\theta$  la hauteur de l'angle ou inclinaison du rayon d'observation (fig.41).

La valeur absolue du produit scalaire signifie que la surface projetée est la même pour une même normale  $\vec{n}$  quel que soit son sens.

En réalité, les vecteurs  $\vec{n}(\theta_f, \phi_f)$ , repérés par leurs deux angles  $\theta_f, \phi_f$ , relatifs à la feuille considérée, seront définis de façon aléatoire, c'est-à-dire, par une probabilité  $p(\theta_f, \phi_f)$  d'avoir une feuille ayant une normale caractérisée par les angles  $\theta_f$  et  $\phi_f$ . On pourra alors écrire :

$$f_h(y, \theta, \phi) = f(y) \sum_{\theta_f} \sum_{\phi_f} p(\theta_f, \phi_f) \left| \vec{u} \cdot \vec{n}(\theta_f, \phi_f) \right| \quad (\text{II } 41)$$

Ainsi, de la façon la plus générale, en ne tenant compte que de l'homogénéité horizontale, la fonction  $S_p$  deviendra, compte tenu des équations II,35 bis et II,41 :

$$S_p = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} f(y) \left[ \sum_{\theta_f} \sum_{\phi_f} p(\theta_f, \phi_f) \left| \vec{u} \cdot \vec{n}(\theta_f, \phi_f) \right| \right] \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (\text{II } 42)$$

Avec, dans un repère orthonormé  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ , les vecteurs  $\vec{u}$  et  $\vec{n}$  définis par :

$$\vec{u} = \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot \vec{i} + \cos \theta \cdot \sin \phi \cdot \vec{j} + \sin \theta \cdot \vec{k} \quad (\text{II } 42a)$$

$$\vec{n}(\theta_f, \phi_f) = \cos \theta_f \cdot \cos \phi_f \cdot \vec{i} + \cos \theta_f \cdot \sin \phi_f \cdot \vec{j} + \sin \theta_f \cdot \vec{k} \quad (\text{II } 42b)$$

Si l'on considère un nouveau repère orthonormé  $\vec{I}, \vec{J}, \vec{K}$ , tel que sa direction  $\vec{K}$  devienne orientée selon  $\vec{u}$  et par conséquent le plan des azimuts ( $\phi'_f$ ) perpendiculaire à  $\vec{u}$ , le vecteur  $\vec{n}$  s'écrit en fonction des nouveaux angles  $\theta'_f$  et  $\phi'_f$  et comme :

$$\vec{u} = \vec{K}$$

$$\vec{u} \cdot \vec{n}(\theta_f, \phi_f) = \sin \theta'_f$$

la relation II,41 peut alors s'écrire, compte tenu qu'une feuille vue par sa face supérieure ou inférieure joue le même rôle (pas de rôle privilégié du sens sur la normale  $\vec{u}$ ) :

$$f_h(y, \theta, \phi) = 2f(y) \int_{-\pi}^{\pi} d\phi'_f \int_0^{\pi/2} \frac{p(\theta'_f, \phi'_f)}{d\theta'_f \cdot d\phi'_f} \sin \theta'_f \cdot d\theta'_f \quad (\text{II } 43)$$

$p(\theta'_f, \phi'_f)$  étant la probabilité pour la nouvelle combinaison d'angles  $\theta'_f, \phi'_f$  et pour les nouvelles variations élémentaires de ces angles  $d\theta'_f, d\phi'_f$ . Ces valeurs sont définies à partir de  $\theta, \phi, \theta_f, \phi_f$  par la

double rotation dont est issue la transformation :

$$\begin{pmatrix} \vec{I} \\ \vec{J} \\ \vec{K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}$$

Ainsi, la description du couvert (cf. par. I.4.2.1) tranche par tranche, qui définit les probabilités  $p(\theta, \phi)$  et la densité moyenne  $f(y)$ , permet de résoudre la valeur de  $S_p$  selon II,42 ; cette valeur peut également être obtenue à l'aide de l'expression II,43 plus aisée à calculer.

#### b) Solution particulière : cas de l'équiprobabilité des normales

L'hypothèse justifiée de l'homogénéité horizontale des couches peut très naturellement être complétée par celle d'une répartition des surfaces élémentaires parfaitement aléatoires. Cette orientation aléatoire revient à supposer l'équiprobabilité des normales  $\vec{n}$  : c'est-à-dire, à avoir la même probabilité d'obtenir n'importe quel point d'une sphère de rayon  $r$  centré en  $O$  (fig.43). Si les normales sont alors repérées dans un système ortho-normé défini par une inclinaison  $\theta$  ( $-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}$ ) et un azimut  $\phi$  ( $-\pi, +\pi$ ), les probabilités d'avoir une normale dans un angle solide défini par  $d\theta$  et  $d\phi$  seront données par le rapport entre cet angle solide  $d\Omega$  et l'angle solide total :

$$p(\theta, \phi) = \frac{ds}{4\pi r^2} = \frac{(r \cdot d\theta)(r \cdot \cos \theta \cdot d\phi)}{4\pi r^2} = \cos \theta \cdot \frac{d\theta \cdot d\phi}{4\pi} \quad (\text{II } 44a)$$

La probabilité  $p_\phi$  d'avoir un angle  $\phi$  quel que soit  $\theta$ , correspond alors à l'équiprobabilité de la répartition des angles  $\phi$ , soit :

$$P_\phi = \frac{d\phi}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta \cdot d\theta = \frac{d\phi}{2\pi} \quad (\text{II } 44b)$$

Par contre, la probabilité  $p_\theta$  d'avoir un angle  $\theta$  quel que soit  $\phi$  sera une répartition en  $\cos \theta$  des différents angles  $\theta$  : il n'y a pas équiprobabilité :

$$P_\theta = \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\phi = \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{2} \quad (\text{II } 44c)$$

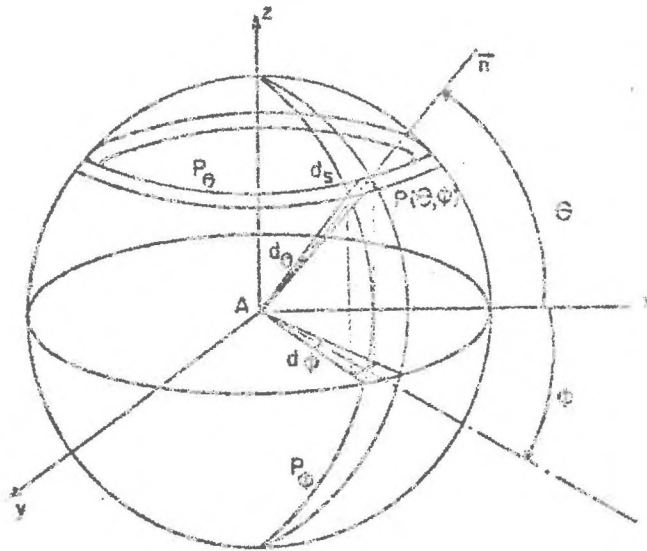


Fig. 43 - Equiprobabilité des normales  $\vec{n}$  et schématisation du calcul des probabilités des angles  $\theta$  et  $\phi$  dans un système orthonormé Axyz.

Ainsi, quel que soit le repère choisi, on peut écrire :

$$\frac{p(\theta_f, \phi_f)}{d\theta_f \cdot d\phi_f} = \frac{1}{4\pi} \cos \theta_f$$

et en appliquant cette valeur à la relation II,43, on obtiendra :

$$f_h(y, \theta, \phi) = 2 \cdot f(y) \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \theta'_f}{4} \cdot \sin \theta'_f \cdot d\theta'_f \cdot d\phi'_f$$

soit :

$$f_h(y, \theta, \phi) = \frac{f(y)}{2} \quad (\text{II } 45)$$

La valeur de la densité de surface en projection sur une direction  $(\theta, \phi)$  quelconque est toujours la moitié de la densité réelle. Le calcul de la fonction  $S_p$  pour un point A de côte  $z$  et pour tout rayon  $r$  s'écrit alors (rel. II,42) :

$$S_p = \frac{1}{\Omega} \iint_{\Omega} \frac{f(z + r \sin \theta)}{2} \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (\text{II } 46)$$



c) Solution particulière : indépendance entre les inclinaisons  $\theta_f$  et les azimuts  $\phi_f$

L'indépendance, souvent observée, de l'inclinaison  $\theta_f$  et de l'azimut  $\phi_f$  (de WIT, 1965 ; ANDERSON, 1969) permet, par le calcul ou par une mesure expérimentale séparée de  $p_{\theta_f}$  et de  $P_{\phi_f}$ , de définir la probabilité composée :

$$P(\theta_f, \phi_f) = P_{\theta_f} \cdot P_{\phi_f}$$

Plusieurs cas peuvent alors être traités :

- Les angles  $\theta_f$  et  $\phi_f$  sont équiprobables, dans ce cas la relation II,43 devient :

$$f_h(y, \theta, \phi) = 2 \cdot f(y) \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta'_f \cdot \frac{d\theta'_f}{\pi} \cdot \frac{d\phi'_f}{2\pi}$$

soit :

$$f_h(y, \theta, \phi) = \frac{2}{\pi} \cdot f(y) \quad (\text{II } 47)$$

ce qui permet de calculer aisément la fonction Sp comme dans le cas précédent (rel. II,46).

- Les azimuts  $\phi_f$  sont équiprobables, mais les inclinaisons  $\theta_f$  constantes et égales à  $\theta_0$  ; c'est le cas d'une plante de port bien déterminé, à insertion de feuilles très régulières, alors la relation II,41 s'écrira :

$$f_h(y, \theta, \phi) = f(y) \int_{-\pi}^{\pi} \left| \vec{u} \cdot \vec{n}(\theta_f, \phi_f) \right| \frac{d\phi_f}{2\pi}$$

$$f_h(y, \theta, \phi) = \frac{f(y)}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \cos \theta_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos(\phi - \phi_f) + \sin \theta \cdot \sin \theta_0 \right| d\phi_f$$

soit :

$$f_h(y, \theta, \phi) = f(y) \cdot \sin \theta_0 \cdot |\sin \theta| \quad (\text{II } 48a)$$

si  $(-\text{tg} \theta \cdot \text{tg} \theta_0) \leq 1$  ou  $(-\text{tg} \theta \cdot \text{tg} \theta_0) \geq 1$ , dans le cas contraire :

$$f_h(y, \theta, \phi) = \frac{2}{\pi} f(y) \left[ \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \theta \cdot \sin \theta_0 + \sin \alpha \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta_0 \right] \quad (\text{II } 48b)$$

avec  $\alpha = \arccos(-\text{tg} \theta \cdot \text{tg} \theta_0)$

- Enfin, le cas le plus souvent rencontré correspond aux azimuts équiprobables mais avec une répartition  $p_{\theta_f} = g(\theta_f) d\theta_f$ , soit d'après la relation II,43 et si, à  $\frac{2}{\pi} f(y)$  près,  $A(\theta_f)$  est donné par II,48 a ou b avec  $\theta_0 = \theta_f$  :

$$f_n(y, \theta, \phi) = \frac{2}{\pi} f(y) \int_0^{\pi/2} 2g(\theta_f) \cdot A(\theta_f) \cdot d\theta_f \quad (\text{II } 49)$$

En-dehors des solutions simples (rel. II,45, 47, 48), la solution précédente et le cas général (rel. II,43) nécessitent un calcul numérique à partir de la connaissance de la répartition des  $P_{\theta_f}$  et  $P_{\phi_f}$  ou du tableau  $p(\theta_f, \phi_f)$ . La figure 44 illustre le calcul de ces différentes solutions dans le cas concret d'un champ de maïs, et la solution qui en résulte au niveau de la fonction  $L(z)$  ou longueur de mélange, par l'intermédiaire de la fonction  $Sp$ .

#### II.4.3. Recherche d'une solution simplifiée de $L(z)$ (calcul unidirectionnel)

À l'approche spatiale la plus générale présentée au paragraphe II.4.1., nous avons cherché à substituer une approche simplifiée de type unidirectionnel. En effet, les mouvements de la masse d'air étant uniquement horizontaux, les variations de la vitesse du vent comme celles de la structure du couvert étant avant tout des variations verticales, il est naturel de penser qu'en première approximation, l'approche unidirectionnelle du problème selon une verticale en direction du sol peut conduire à une solution satisfaisante du problème. Cette solution est d'autant plus proche de la solution générale que le poids des couches voisines du point A considéré est plus grand, car  $P(r)$  est alors le même dans les deux solutions. On écrira donc comme au paragraphe précédent II.4.1. :

$$L(z) = \int_0^{r=z} [1 - P(r)] \cdot dr$$

où  $r$  est la distance du point A considéré (de côte  $z$ ) et où  $P(r)$  devient la probabilité de rencontrer un obstacle uniquement selon la verticale à partir du point A et jusqu'au point de distance  $r$ . Cette valeur  $P(z, r)$  se définit simplement par le rapport entre la proportion de pleins (surfaces présentes) par rapport à la surface totale, soit la projection horizontale  $S(z, r)$  de l'ensemble des surfaces comprises dans la couche  $(z, (z-r))$  par



rapport à la surface de référence  $S_0$  (fig.45) :

$$P(z, r) = \frac{S(z, r)}{S_0}$$

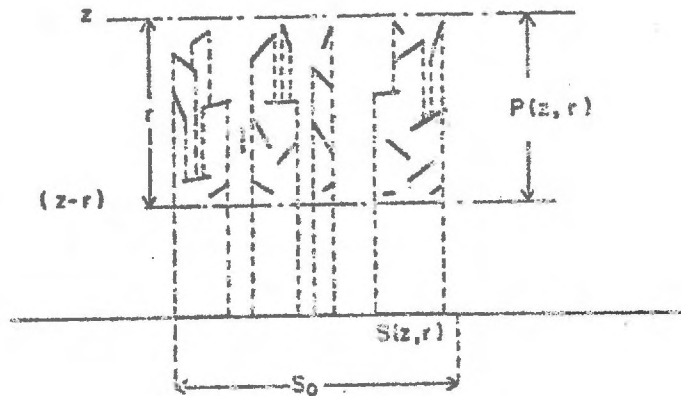


Fig.45 - Schéma représentatif de la fonction  $P(z, r) = \Sigma S(z, r)/S$ .

Valeur qui peut être obtenue directement par mesure expérimentale (cf. par. I.4.2.1.a, fig. 13a et b).

Il est aussi possible d'après la solution générale (II,37) de calculer cette probabilité  $P(r)$  :

$$\int [1 - P(r)] = \frac{(ax - 1)}{ax} + \frac{1}{ax} e^{-ax} \int_0^r f_h(z - r) \cdot dr \quad (II, 50)$$

où  $f_h(z-r)$  est la projection horizontale des obstacles au niveau  $(z-r)$  comme cela l'a été défini au paragraphe II.4.1.a ; c'est la valeur particulière de  $S_p$  pour le point de la sphère  $(\theta = -\frac{\pi}{2}, \phi)$  qui correspond à une direction  $\vec{u}$   $(\theta = -\frac{\pi}{2})$ . D'après la relation (II,41 et II,43) on est conduit à l'expression générale :

$$f_h(z - r) = S_p = f(z - r) \int_{\theta_f} \int_{\phi_f} p(\theta_f, \phi_f) \left| \sin \theta_f \right| \quad (II, 51)$$

Les différents cas particuliers de couverts étudiés aux paragraphes II.4.2 b et c conduisent aux relations simples suivantes (pour une côte  $y = z - r$ ) :

- équiprobabilité des normales :

$$S_p = \frac{f(y)}{2} \quad (\text{II } 51a)$$

- équiprobabilité des inclinaisons et des azimuts :

$$S_p = \frac{2}{\pi} f(y) \quad (\text{II } 51b)$$

- inclinaison fixe  $\theta_0$  et équiprobabilité des azimuts :

$$S_p = f(y) \sin \theta_0 \quad (\text{II } 51c)$$

- équiprobabilité des azimuts :

$$S_p = f(y) \int_0^{\pi/2} p_{\theta_r} \sin \theta_r d\theta_r \quad (\text{II } 51d)$$

La relation 51c montre que la solution simplifiée présentée ici peut être aberrante dans certains cas extrêmes, celui où toutes les surfaces infiniment minces auraient une position verticale ( $\theta = \frac{\pi}{2}$ ) ; dans ce cas  $S_p$  devient nul, la végétation quelle que soit sa densité ne joue plus aucun rôle sur la valeur  $L(z)$ , ce qui n'est pas entièrement juste. On verra cependant que dans la plupart des cas, cette solution conduit à des valeurs conformes à l'expérience, tant pour la hauteur de déplacement  $D$  qui en résulte que, secondairement, pour des profils de vitesse de vent et de diffusivité.

La solution recherchée pour  $L(z)$  est définie par la relation II,38 bis, pour laquelle la valeur  $S_p$  est donnée par une des relations 51 précédentes, calculées pour les différents niveaux  $(z-r)$  pour  $z < z_h$  et  $z_h - r$  pour  $z = z_h$  ou directement par les valeurs mesurées (cf. par. I.4.2.1. a) .

La hauteur de déplacement du plan de référence (rel. II,39) s'écrit alors, en tenant compte de la relation II,51 qui montre que  $S_p$  ne dépend que de la hauteur considérée au sein du couvert ( $z_h - r$ ) :

$$D = \frac{z_h}{ax} \left[ 1 - \frac{1}{z_h} \int_0^{z_h} e^{-ax} \int_0^x f_h(z_h - r) dr dx \right] \quad (\text{II } 52)$$

soit encore pour un couvert parfaitement homogène :

$$f(z) = f = C^{te} \quad ; \quad S_p = \frac{f}{2} \quad ; \quad ax = 1$$

$$D = z_h \left[ 1 - \frac{2}{z_h \cdot f} \left( 1 - e^{-\frac{f \cdot z_h}{2}} \right) \right] \quad (\text{II 52 bis})$$

## II.5. RESULTATS ET CONFRONTATION EXPERIMENTALE.

Les solutions des grandeurs  $C_M(z)$ ,  $f(z)$  et  $L(z)$  viennent d'être traitées, de façon analytique, aux deux paragraphes précédents (respectivement II,3 et II,4). La solution spatiale la plus générale proposée (par II,2a) et la solution simplifiée deviennent donc opérationnelles et applicables à tous les couverts pour lesquels une description de la géométrie (densité de surface foliaire  $f(z)$ , angles d'inclinaison des feuilles  $\theta_i$ , etc...) et des caractéristiques aérodynamiques des feuilles  $C_{oi}(z)$  est donnée.

### II.5.1. RÔLE comparé des paramètres du couvert $C_M(z)$ et $f(z)$

Toute solution dépendant donc de l'équation différentielle (II,14 bis) et de la relation (II,15), dépend d'autre part de la densité de surface foliaire de  $f(z)$  par l'intermédiaire de la longueur de mélange  $L(z)$  et du produit  $f(z) \cdot C_M(z)$ , et d'autre part du coefficient moyen de traînée  $C_M(z)$  par l'intermédiaire de ce même produit.

En fait, pour une même culture, si  $f(z)$  peut varier de façon considérable, en particulier par le biais de la densité de peuplement (nombre de plantes par unité de surface), la variation des dimensions et de la forme des feuilles en fonction des variétés reste assez faible et n'entraîne pas de variations du coefficient moyen de traînée supérieur à 2. Soulignons aussi que la forme même de la relation (II,14 bis) et les valeurs usuelles des paramètres  $L(z)$  et  $C_M(z) \cdot f(z)$  conduisent à un faible rôle de la variation de  $C_M(z)$  sur la solution générale ( $U(z)$  et  $K(z)$  même si ce coefficient de traînée varie de 1 à 3,5 (fig. 39a) ou de 1 à 2 (fig. 39b)) ; le poids d'une variation identique de densité de surface foliaire  $f(z)$  sur la solution la plus générale en  $U(z)$  et  $K(z)$  est nettement plus



marqué (fig. 46a et b). Cette constatation, liée à une faible connaissance des valeurs des coefficients de traînée, nous a conduit à adopter directement, pour ces premières confrontations expérimentales, une valeur unique moyenne  $C_M(z)$  pour chaque couche de végétation. Cette valeur varie alors, essentiellement en fonction de la vitesse du vent au sein du couvert (fig. 37). Les valeurs minimales admises par très fort vent sont de 0,4 pour le maïs et de 0,15 pour le blé et correspondent aux valeurs estimées au moyen des solutions approchées (analyse II,22 a et b) ou extrapolées à partir de résultats obtenus sur plaque plane (CALVERT 1967) ou sur feuille (THOM 1969), compte tenu des dimensions respectives des diverses surfaces considérées.

### II.5.2. Analyse de la solution $L(z)$ (calcul spatial)

La solution la plus générale de  $L(z)$  passe par un calcul spatial de la répartition des obstacles dont quelques hypothèses simplificatrices, très généralement vérifiées pour la plupart des couverts végétaux, permettent quelques simplifications des calculs (cf. par. II.4.2 a, b, c).

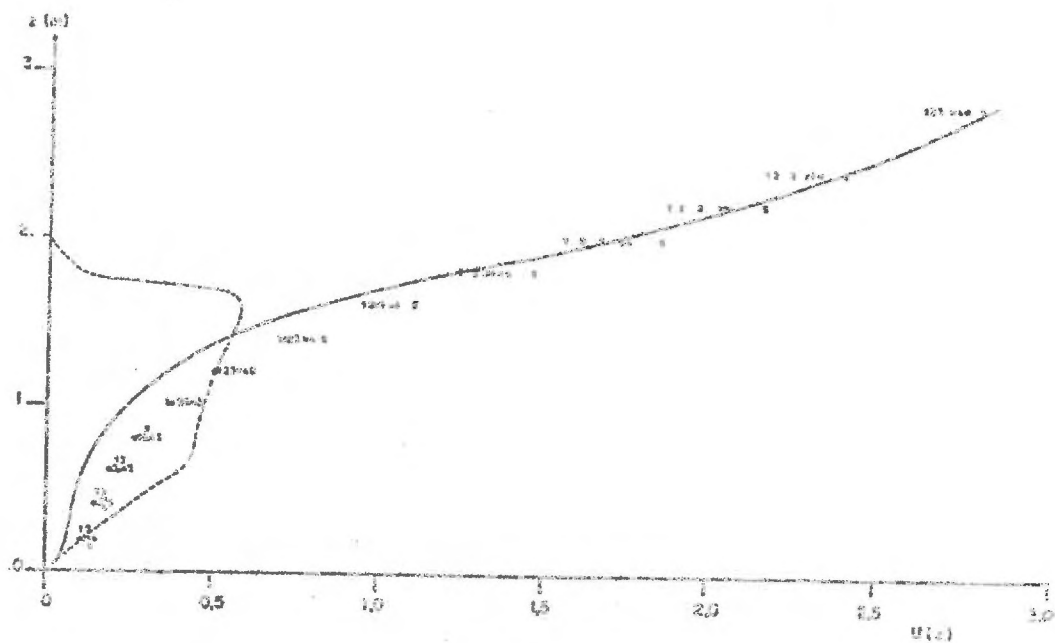
#### a) Comparaison des différentes solutions.

Pour un maïs (tableau I, cf. par. I.3.1.a) dont les densités de surface foliaire ont été mesurées non seulement par tranche de végétation mais encore, pour chaque tranche, par classe d'inclinaison, nous avons calculé les différents profils de longueur de mélange  $L(z)$  (fig. 44) et ceux de vitesse du vent et de diffusivité auxquels ils conduisaient (fig. 47a et b). Seule la solution générale tenant compte de l'équiprobabilité mesurée des azimuts et de la répartition des inclinaisons (rel. II,49) conduit à un profil de vent et de diffusivité nettement différencié soulignant une atténuation plus rapide du vent et des diffusivités plus faibles.

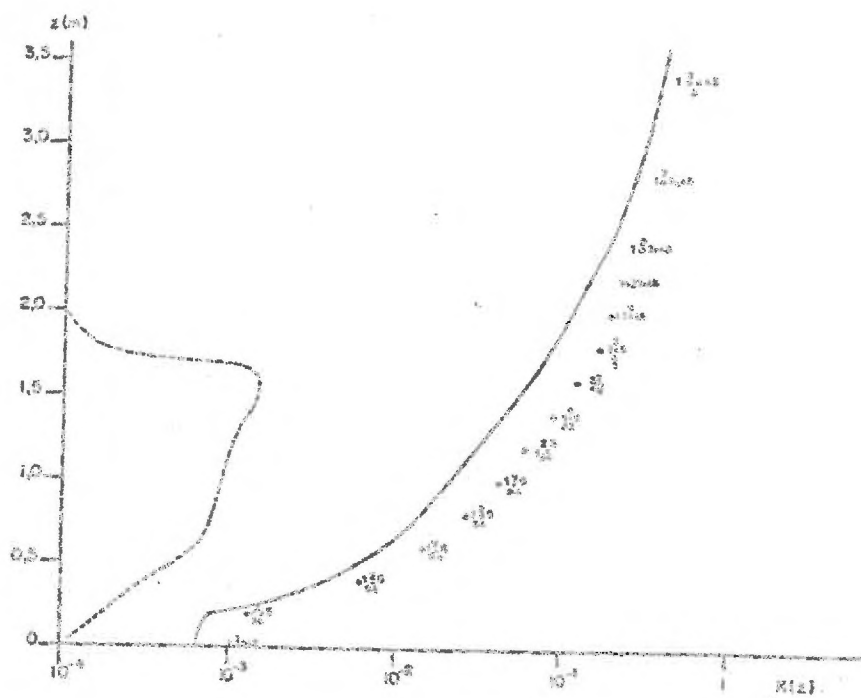
Les solutions particulières basées sur :

- l'hypothèse de l'équiprobabilité des normales (solution en  $f(z)/2$ , relation II,45 et 46),
- la double hypothèse de l'indépendance des azimuts et des inclinaisons avec équiprobabilité de chacun de ces angles (solution en  $2 f(z)/\pi$ , relation II,47),
- ou encore l'hypothèse de l'indépendance des azimuts et des inclinaisons





a



b

Fig. 47 a,b - Evolution des profils de vitesse du vent (a) et de diffusivités turbulentes (b) en fonction des divers types d'hypothèses.  
 — Calcul général à partir des mesures des probabilités in situ  $p_\theta$  et  $p_\phi$   
 x Equiprobabilité des normales  
 o Equiprobabilité des inclinaisons et des azimuts  
 1,2,3,4,5 Angles d'inclinaison fixe de 0, 30, 45, 60 et 90°.

avec équiprobabilité des azimuts, mais une inclinaison constante comprise entre 0 et 90° (solution donnée par la relation II,48), conduisent à des solutions très groupées. Les extrêmes correspondent soit à l'ensemble des feuilles horizontales ( $\theta_i \neq 0$  ou  $\theta_p$  des normales égal à 90°) qui provoque l'atténuation maximale, soit à l'ensemble des feuilles verticales qui conduit à l'atténuation minimale.

L'avantage de ces dernières solutions par rapport au calcul spatial complet est de ne nécessiter que les densités moyennes de surface foliaire  $f(z)$  pour chaque niveau. Lorsque nous n'avons que ces données, nous avons donc utilisé la solution la plus proche  $2 f(z)/\pi$  et qui correspond à l'équiprobabilité des azimuts et des inclinaisons (fig. 47).

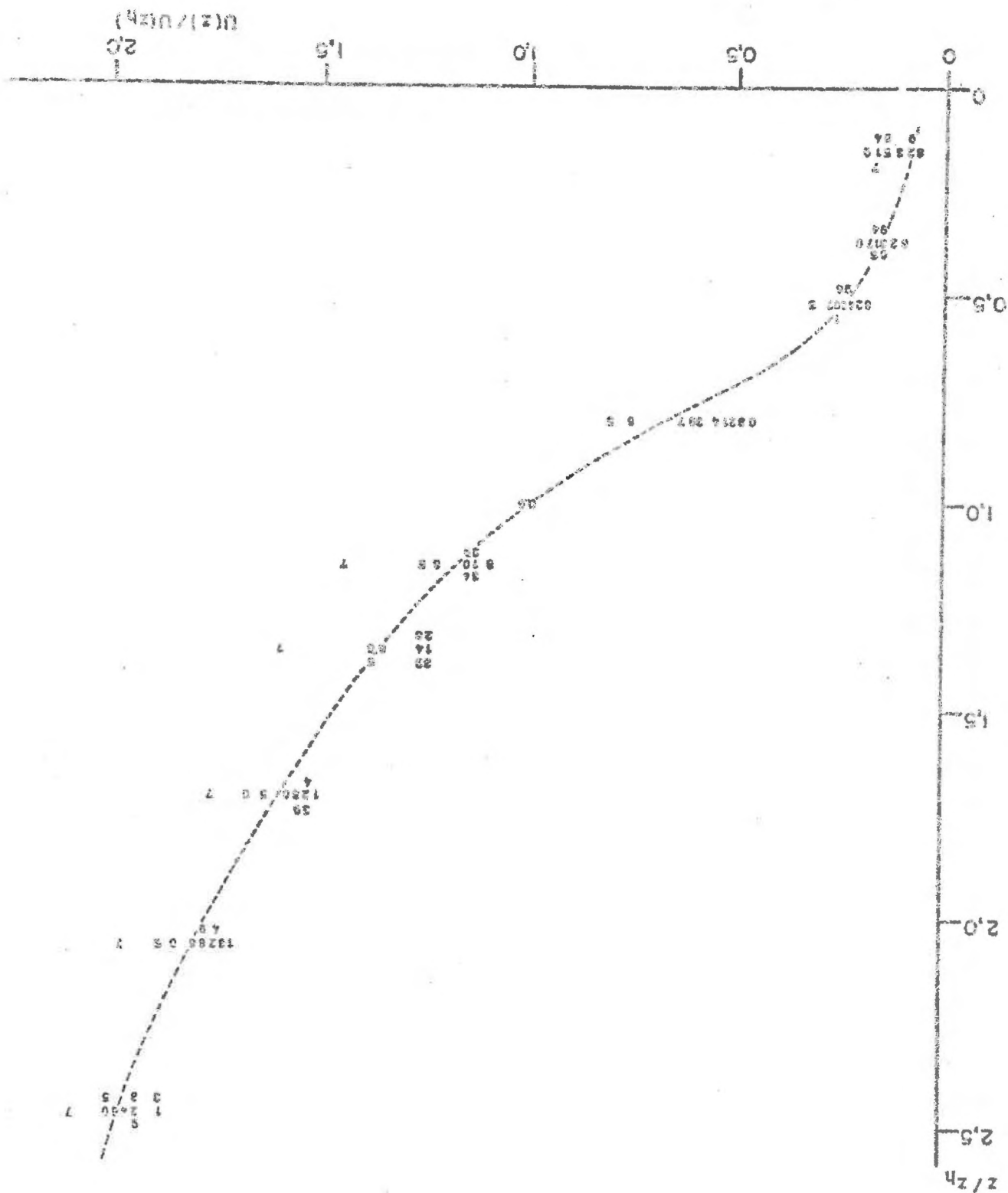
#### b) Comparaison entre profils calculés et mesurés

Trois figures illustrent la comparaison entre, d'une part, les profils calculés à partir de la vitesse mesurée (niveau  $z/z_h = 2,5$  pour le maïs et  $z/z_h = 3$  pour le blé) et les données de densité de surface foliaire et, d'autre part, les vitesses de vent mesurées, soit par fil chaud, soit au-dessus du couvert par anémomètre à coupelles (type Casalla). Dans les trois cas, la dispersion des valeurs moyennes mesurées due aux grandes instabilités de la vitesse du vent et à la difficulté de sa mesure dans les conditions naturelles a donc été reportée et correspond à la dispersion obtenue généralement sur 5 à 20 mesures.

- La figure 48 retrace l'évolution des profils de vitesse de vent en valeur adimensionnée, mesurés sur maïs au cours d'une journée. Le modèle conduit à la courbe moyenne (trait plein  $2 \text{ m s}^{-1}$  au niveau  $z/z_h = 2,5$ ) avec une certaine fluctuation de ce profil en fonction de la vitesse de référence  $U(z_R)$ ; celle-ci entraîne au sein du couvert une atténuation relative maximale pour de faibles valeurs ( $U(z_R) = 1 \text{ m s}^{-1}$ ) et une atténuation relative minimale pour de fortes valeurs ( $U(z_R) = 4 \text{ m s}^{-1}$ ). Les numéros des profils mesurés correspondent à l'évolution au cours de la journée de la vitesse du vent qui est passée par un maximum 2 à  $3 \text{ m s}^{-1}$  entre 14 et 16 h (profils 5 à 7) et a atteint les valeurs minimales  $\leq 1 \text{ m s}^{-1}$  le matin (vers 9 h) et le soir (après 19 h, profils 8 - 9).

- La figure 49 illustre, pour trois journées correspondant à trois stades différents de la croissance du maïs ( $z_h = 1,1 \text{ m}$ ,  $1,7 \text{ m}$  et  $1,9 \text{ m}$ ), les profils moyens donnés par le modèle et la moyenne des 3 à 8 profils mesurés au sein du couvert pour ces mêmes journées avec la dispersion maximale observée entre eux.

Fig. 48 - Profil de vitesse mesuré en cours de la journée (0 à 9) et profil calculé par le modèle Général (Mats, La Minière, le 12.8.72).



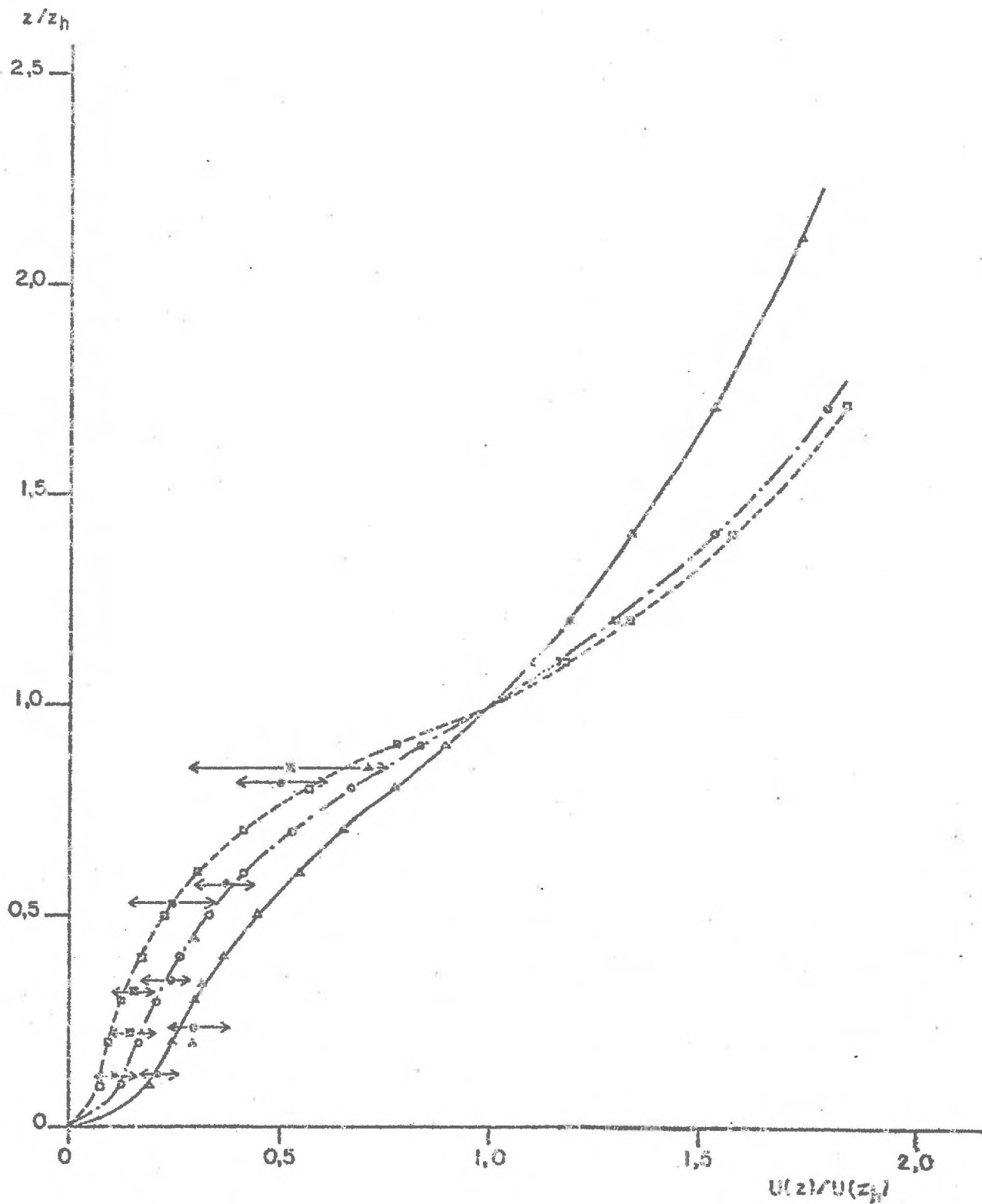


Fig. 49 - Profil de vitesse mesuré au sein du couvert pour trois stades du développement de la culture et profils calculés correspondant.

- $\Delta$  ,  $\Delta$  Valeurs expérimentales et profil calculé le 10.7.74
- + o +, 0 Valeurs expérimentales et profil calculé le 22.7.74
- +  $\rightarrow$  Valeurs expérimentales et profil calculé le 30.7.74

- Enfin une expérience sur blé a été réalisée dans le but de vérifier la modéle et comprenait une triple installation de mesure : d'une part, des anémomètres à coupelles (type Casella) au-dessus du couvert, d'autre part, des mesures par fil chaud au sein du couvert en dix niveaux (type Hasting), et en quatre niveaux des mesures du vent et de ses fluctuations par fils chauds à analyse tridimensionnelle et enregistrement magnétique (Pye Laboratory - Canberra). Le blé étant pleinement développé, nous avons choisi parmi les quelques profils enregistrés sur bande magnétique celui qui correspondait à environ  $3 \text{ m s}^{-1}$  au niveau  $z/z_L \approx 2,5$ , ainsi que tous les profils correspondant à cette vitesse obtenue par anémomètre à coupelles (Casella) et fils chauds (Hasting) soit quinze profils. La figure 50 retrace les résultats obtenus et souligne aussi l'assez bonne concordance avec le modéle.

De façon générale, ces quelques résultats, parmi de nombreux autres, montrent que la théorie ne donne en représentation adimensionnée (fig. 48) que peu de variation en fonction des différentes vitesses et l'expérience souligne une dispersion beaucoup plus grande due naturellement à la difficulté de la mesure du vent en milieu confiné comme un couvert et en particulier en milieu très turbulent (taux de turbulence d'environ 40 à 60 %) tel que le milieu naturel au voisinage du sol ou des couverts. Il n'en reste pas moins que diverses autres raisons qui ne sont donc pas purement d'ordre expérimental sont à invoquer pour expliquer cette variation. Il y a d'une part la convection thermique, en particulier dans la partie basse du couvert (faible vitesse et généralement forts gradients), ce qui explique souvent une sous-estimation du modéle dans cette zone (fig. 50). Il y a d'autre part les caractéristiques propres de la turbulence de l'air et les répercussions de cette turbulence sur la pénétration au sein du couvert en particulier par le biais du mouvement du végétal. Cet effet décrit sous différents aspects, dont l'un des plus importants est l'ondulation du couvert ou effet Honami (INOUE 1965), conduit bien évidemment à des distorsions par rapport au couvert supposé fixe dans le modéle présenté. Il y a donc là deux causes importantes qui feront l'objet d'études ultérieures dans le but de mieux cerner la réalité très complexe des phénomènes de transfert dans le milieu naturel. Enfin, rappelons que pour ces études, nous n'avons pas une description complète du couvert (pas de mesures des angles de feuilles) et qu'en conséquence, une distorsion apparaît aussi (fig. 47 a);

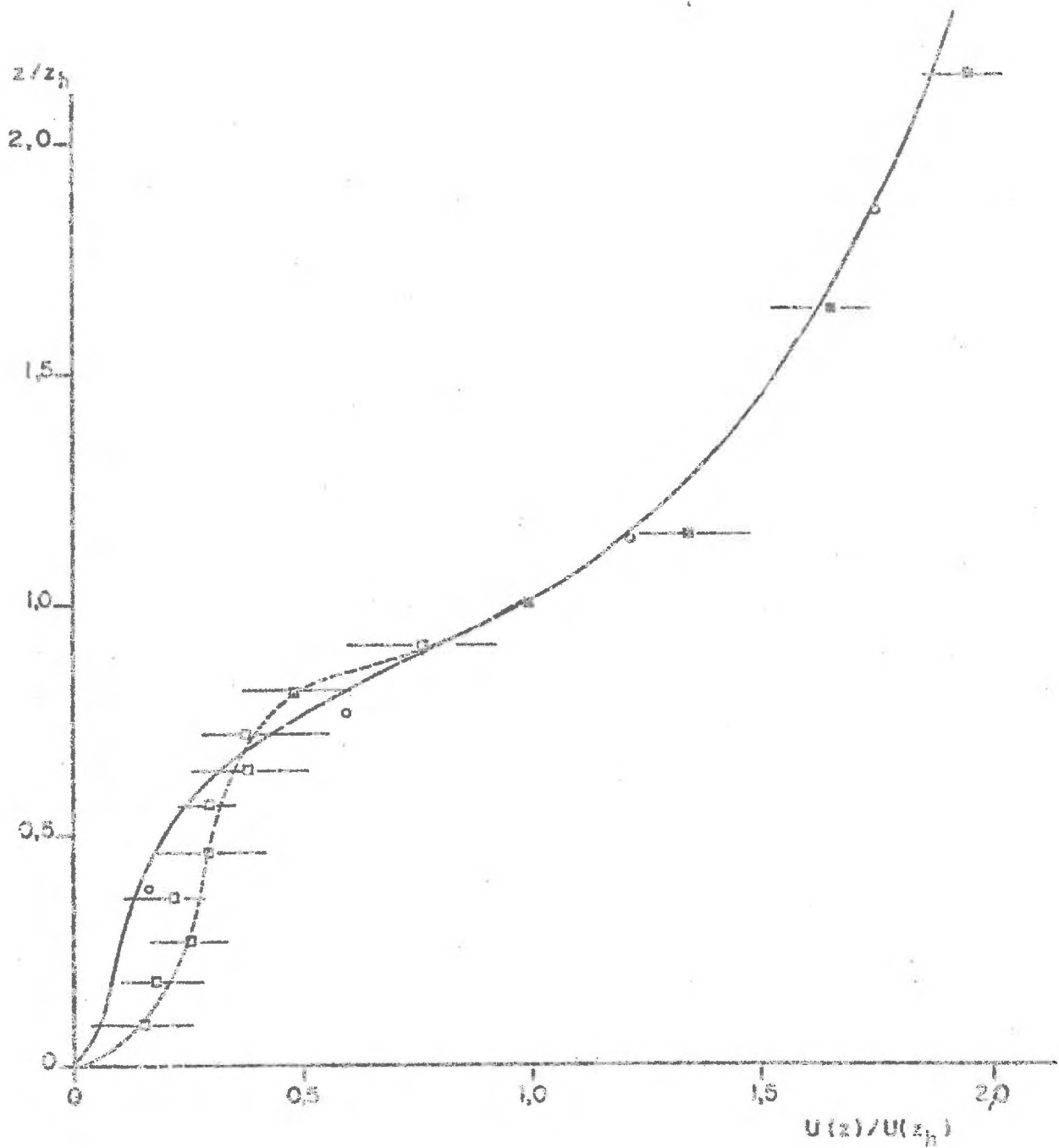


Fig. 50 - Profil de vitesse mesuré et calculé (blé - Bungendore Canberra - période du 11.7.73 et du 1.74 par fils chauds)

- o Mesures par fils chauds (analyse tridimensionnelle) 1.74
- Mesures par anémomètres à coupelles (Caselle)
- Mesures par fil chaud (Hasting)

distorsion qui peut être accentuée par l'agencement spatial des feuilles, principalement dans la partie haute du couvert où elles cherchent souvent à se placer dans une zone de maximum de captation de lumière conduisant à un coefficient de recouvrement  $\alpha$  différent de l'unité (cf. par. II.5.4b) et qui peut être très petit.

c) Comparaison avec les paramètres aérodynamiques classiques  $U_{*k}$ ,  $D$ ,  $z_0$

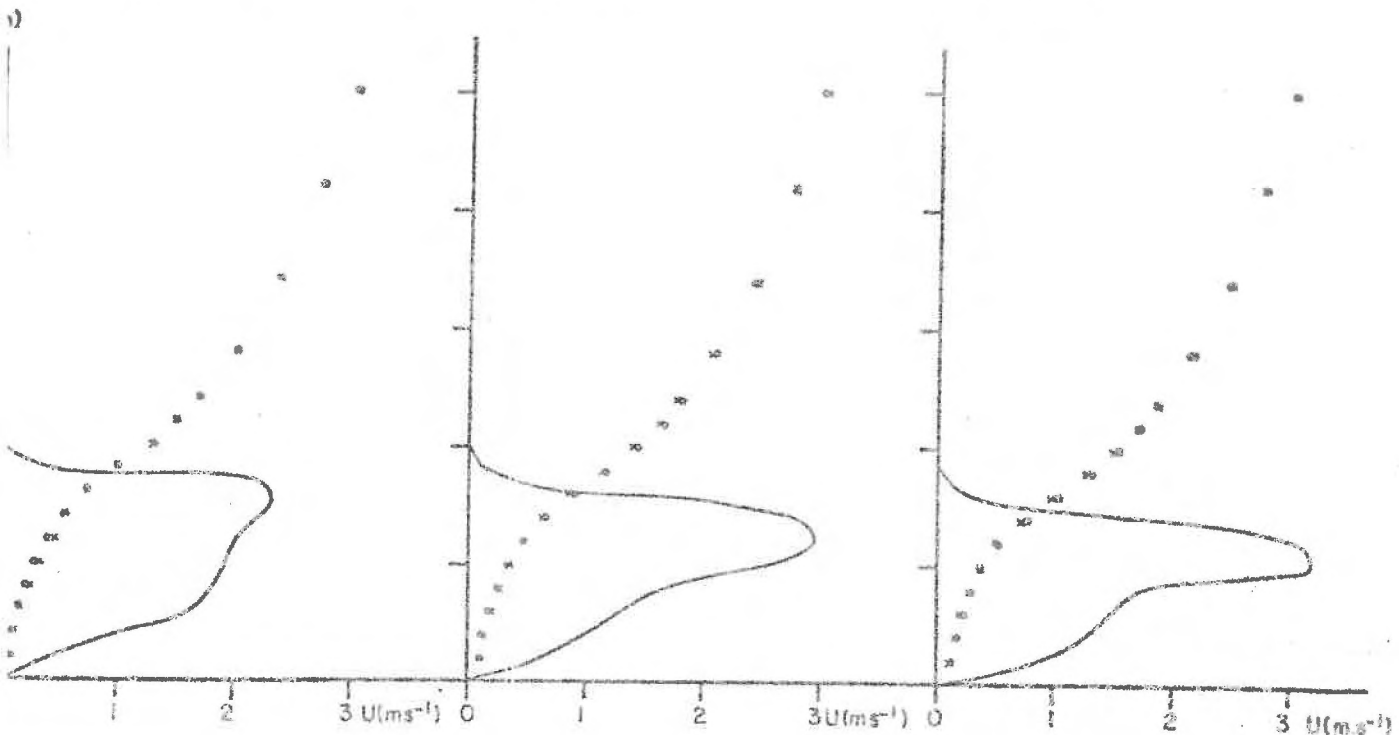
Il est nécessaire de noter que le profil  $U(z)$  obtenu par le modèle n'est pas strictement un profil logarithmique, mais qu'il peut se mettre de façon plus exacte et plus précise que n'importe quel profil expérimental sous la forme logarithmique classique (rel. II,9 au II,22d) permettant de caractériser les paramètres  $U_{*k}$ ,  $D$  et  $z_0$  calculés à partir des relations II,18 bis, II,19, II,20.

A titre d'exemple (fig.51) et pour une vitesse de référence  $U(z_R)$  voisine de  $3 \text{ m s}^{-1}$  ces paramètres ont été calculés pour les différents couverts analysés entre les années 1969 et 1975 (tableau II).

$$1969 \begin{cases} U_{*k} = 0,49 \\ D = 1,36 \\ z_0 = 0,34 \end{cases}$$

$$1971 \begin{cases} U_{*k} = 0,48 \\ D = 1,22 \\ z_0 = 0,34 \end{cases}$$

$$1972 \begin{cases} U_{*k} = 0,48 \\ D = 1,1 \\ z_0 = 0,38 \end{cases}$$



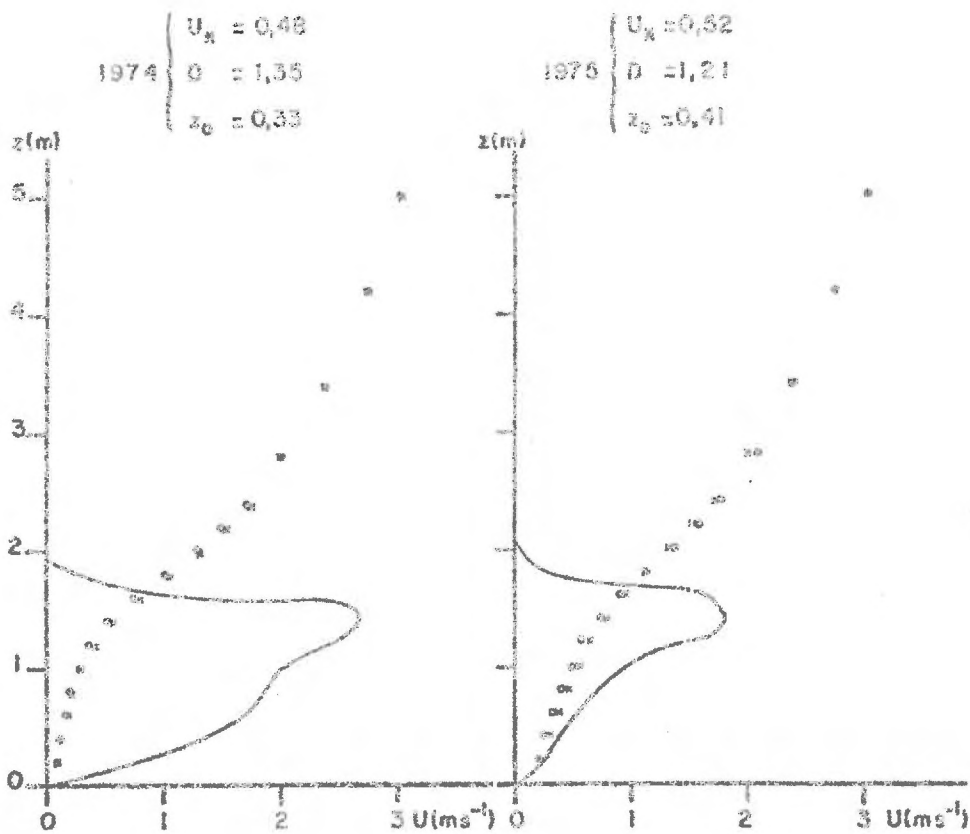
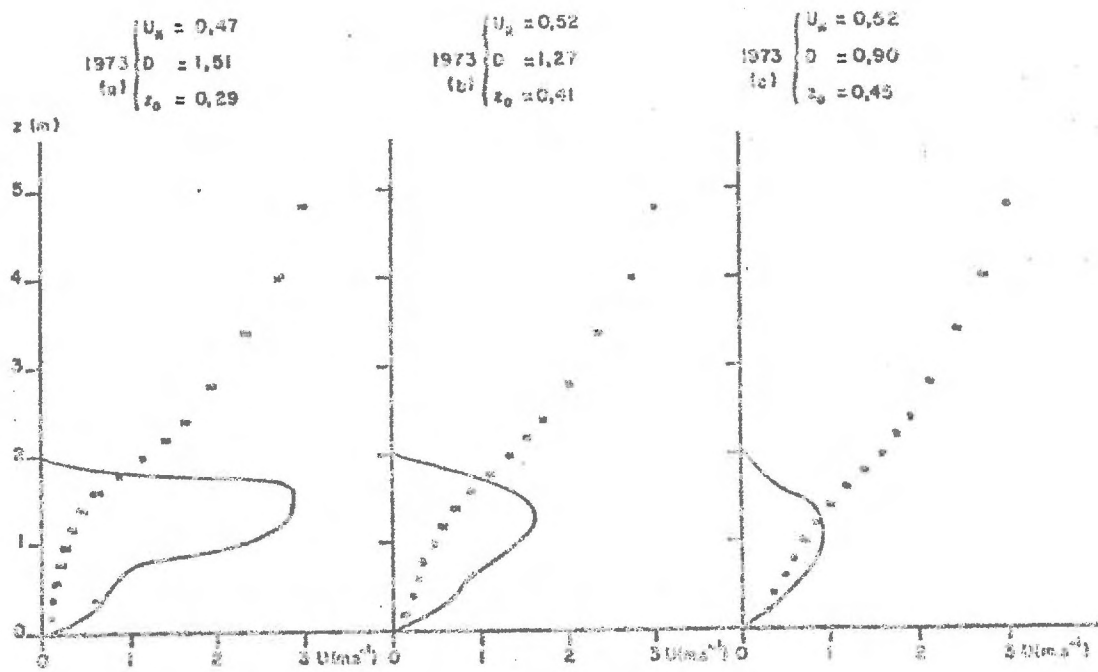


Fig. 51 - Résultats obtenus par le modèle pour les différentes cultures de maïs ( $U(z_p = 5 \text{ m}) = 3 \text{ ms}^{-1}$ )

- o Modèle général
- x Modèle simplifié



T A B L E A U II

Variation des caractéristiques aérodynamiques du maïs en fonction  
des années ( $U(z_R) = 3 \text{ m s}^{-1}$ )

	1969	1971	1972	1973a	1973b	1973c	1974	1975
$U_*$	0,49	0,48	0,48	0,47	0,52	0,52	0,48	0,52
$D/z_{R1}$	0,58	0,64	0,61	0,76	0,64	0,45	0,71	0,60
$\sigma_0/z_{R1}$	0,17	0,18	0,20	0,15	0,20	0,23	0,17	0,19

- La vitesse de frottement  $U_*$

On constate malgré des différences de densité assez importantes, en particulier en 1973 (trois densités de peuplement différentes), qu'au voisinage de ces densités il n'existe qu'une faible variation de la valeur de  $U_*$  (10 %), avec cependant une tendance nette à la décroissance de la vitesse de frottement pour les fortes densités (fig. 51 année 1973a et cf. par. II.5.4.c).

Quant aux valeurs de vitesse de frottement, elles correspondent strictement aux valeurs expérimentales maximales obtenues (fig. 27c) pour une vitesse de référence d'environ  $3 \text{ m s}^{-1}$ , alors que les valeurs moyennes suivant les années ont évolué entre 0,3 et 0,4. En réalité, comme la solution générale montre que la vitesse de frottement est pratiquement linéaire en fonction de la vitesse de référence, on obtient :

$$U_* \approx 0,163 U(z_R = 5 \text{ m})$$

et cette droite correspond à l'enveloppe des valeurs maximales trouvées expérimentalement. Comme nous l'avons vu précédemment (II.2.1 d), cette sous-estimation des valeurs expérimentales, d'autant plus grande que la vitesse de référence est plus faible puisqu'il y a une bonne concordance au-delà de  $4$  à  $5 \text{ m s}^{-1}$ , est due à la convection thermique qui a été négligée et conduit à une sous-estimation de la détermination de  $U_*$  d'autant plus grande que le suradiabatisme de l'air est plus élevé (faible valeur de  $U(z_R)$ ).

Ces valeurs de la vitesse de frottement correspondent en outre très bien, en particulier pour les vitesses de quelques mètres par seconde, à la loi donnée par MAKI (1969) pour un maïs :

$$U_{*} = 0,129 U(z_R)^{1,236}$$

Quant aux vitesses de frottement obtenues sur blé ( $U_{*} \sim 0,08 U(z_R = 4m)$  ou  $0,115 U(z_R = 1,5)$ ), une assez bonne concordance existe avec la loi proposée par UDAGAWA (1966) pour de l'orge :

$$U_{*} = 0,076 U(z_R = 1,5)^{1,25}$$

#### - La hauteur de déplacement D

Les résultats concernant la hauteur de déplacement en fonction des divers types de couvert (tableau II) soulignent une croissance du paramètre D en fonction de la densité, beaucoup plus sensible que pour la vitesse de frottement (variation de 40 % entre la valeur minimale 1973c et la valeur maximale 1973a) (cf. par. II.5.3 et II.5.4).

Il est aussi important de noter, comme nous l'avons déjà dit, que le choix d'une longueur de mélange  $L(z)$ , fonction uniquement des caractéristiques géométriques du couvert, entraîne la fixité de la hauteur de déplacement pour un couvert donné, contrairement aux variations qui semblent expérimentalement se dessiner (fig. 28a et b), malgré la grande dispersion expérimentale de cette valeur ; cette dernière est, par ailleurs, toujours corrélée (méthode de calcul, cf. par. II.1.3) à la valeur de  $z_0$  et de faibles valeurs de D s'accompagnent toujours de fortes valeurs de  $z_0$ .

Nous avons vu (cf. II.1.3) que, d'après TAKAMI et MAKI (1969), la cause essentielle de cette variation serait la variation de la hauteur du couvert liée à la vitesse du vent (mouvement du feuillage) et ces auteurs ont mis en évidence ce facteur pour trois types de couvert : plantation de mélèzes japonais, champs de maïs et de riz.

Rappelons aussi que, pour d'autres auteurs, BRADLEY et FINNIGAN (1973) cette variation de D est plus liée à des imprécisions de mesures et à