



HAL
open science

Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux: Profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette

A. Perrier

► To cite this version:

A. Perrier. Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux: Profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 1976. Français. NNT : . tel-02859802

HAL Id: tel-02859802

<https://hal.inrae.fr/tel-02859802>

Submitted on 8 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT D'ÉTAT ES SCIENCES PHYSIQUES

présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI

par M. Alain PERRIER

pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences

Sujet de la Thèse :

ÉTUDE et ESSAI de MODÉLISATION des ÉCHANGES de MASSE
et d'ÉNERGIE au NIVEAU des COUVERTS VÉGÉTAUX :

Profils microclimatiques,
évapotranspiration et photosynthèse nette.

Soutenue le 29 Avril 1976 devant la Commission d'Examen :

Président : M. PONCIN

Examineurs : MM. FONTAN, CHARTIER, BERNARD et ULRICH

- P L A N -

INTRODUCTION

Page 13

| | |
|---|----|
| I - <u>PRESENTATION DU MODELE DE COUVERT ADOPTE :</u> | |
| <u>DONNEES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES CARACTERISTIQUES</u> | 15 |
| I.1. - <u>LES DIFFERENTS TRANSFERTS AU NIVEAU D'UN COUVERT</u> | 16 |
| I.1.1. Problème mécanique ou échange de quantité de mouvement | 16 |
| I.1.2. Problème énergétique ou échange d'énergie et d'eau | 17 |
| I.1.3. Problème photosynthétique ou échange d'énergie radiative visible et de gaz carbonique | 17 |
| I.2. - <u>ANALYSE DES HYPOTHESES DE BASE DU MODELE</u> | 18 |
| I.2.1. Homogénéité horizontale | 18 |
| I.2.2. Echelle de temps et d'espace | 21 |
| I.2.3. Choix du régime de convection adapté au milieu considéré | 23 |
| I.2.4. Schéma général et conditions aux limites admises | 25 |
| a) Description globale : l'advection | 25 |
| b) Choix du flux conservatif | 26 |
| c) Choix de la hauteur de référence z_R | 28 |
| d) Définition des bornes du système Air-Végétation | 29 |
| I.3. - <u>DESCRIPTION DES GRANDEURS NECESSAIRES A CETTE MODELISATION</u> | 31 |
| I.3.1. Paramètres caractéristiques du couvert | 31 |
| a) Les surfaces d'échange et leur description : Surface foliaire et densité de surface foliaire | 31 |
| b) Les propriétés physiques et biologiques des surfaces | 35 |
| I.3.2. Grandeurs caractéristiques aux bornes | 36 |
| I321. Grandeurs aux bornes, relatives au transfert mécanique | 36 |
| I322. Grandeurs aux bornes, relatives au transfert d'énergie | 37 |
| I323. Grandeurs aux bornes, relatives au transfert de CO ₂ | 40 |

.....

| | |
|---|---------|
| I.4. - <u>PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL</u> | Page 41 |
| I.4.1. Les objectifs généraux du dispositif | 41 |
| a) Objectifs d'ordre méthodologique | 41 |
| b) Détermination des profils microclimatiques | 42 |
| c) Evapotranspiration ou flux de chaleur latente | 44 |
| d) Photosynthèse nette | 46 |
| I.4.2. Les investigations expérimentales | 46 |
| I421. Investigations d'ordre biologique | 47 |
| a) Mesure des caractéristiques du couvert | 47 |
| b) Mesure des résistances stomatiques | 49 |
| c) Mesure des potentialités photosynthétiques des feuilles | 50 |
| I422. Investigations d'ordre physique | 51 |
| a) Mesure des profils microclimatiques | 51 |
| b) Mesure des densités de flux | 57 |
| | |
| <u>II - MODELISATION DES TRANSFERTS MECANIQUES :</u> | |
| <u>APPLICATION A LA DETERMINATION DES PROFILS DE DIFFUSIVITE</u> | |
| <u>TURBULENTE ET DE VENT</u> | |
| | 63 |
| II.1. - <u>RAPPEL DES RELATIONS FONDAMENTALES SUR LES TRANSFERTS MECANIQUES</u> | 63 |
| II.1.1. Rappel des équations du milieu aérien au-dessus des couverts | 65 |
| II.1.2. Equation de base au sein du couvert | 67 |
| II.1.3. Vérifications et utilisations de ces relations fondamentales | 68 |
| a) Profil de vent et de diffusivité au-dessus du couvert | 68 |
| b) Profil de diffusivité et coefficient de traînée au sein du couvert | 74 |
| II.2. - <u>SOLUTION GENERALE PROPOSEE : PROFIL DE VENT ET DE DIFFUSIVITE</u> | |
| <u>AU-DESSUS ET AU SEIN DU COUVERT</u> | 77 |
| II.2.1. Etude de la solution générale proposée : profil de vent et de diffusivité | 79 |
| a) Condition limite inférieure | 80 |
| b) Condition limite supérieure | 81 |
| c) Les profils de vitesse et de diffusivité | 81 |
| d) Les paramètres aérodynamiques du couvert | 81 |
| II.2.2. Etude de quelques cas particuliers donnés par la solution générale proposée | 83 |
| a) Première solution particulière simple | 83 |
| b) Deuxième solution particulière | 85 |
| II.2.3. Conclusions | 92 |

.....

| | |
|--|---------|
| II.3. - <u>SOLUTION PROPOSEE POUR LE CALCUL DU COEFFICIENT DE TRAINEE MOYEN C_M</u> | Page 92 |
| II.4. - <u>SOLUTIONS PROPOSEES POUR LE CALCUL DE $L(z)$</u> | 99 |
| II.4.1. Définition d'une grandeur $L(z)$ | 100 |
| a) Calcul de la probabilité de présence d'une surface | 101 |
| b) Calcul de la variation de probabilité | 103 |
| II.4.2. Calcul de la fonction S_p | 105 |
| a) Solution générale | 105 |
| b) Solution particulière : cas de l'équiprobabilité des normales | 107 |
| c) Solution particulière : indépendance entre les inclinaisons θ_f et les azimuts ϕ_f | 109 |
| II.4.3. Recherche d'une solution simplifiée de $L(z)$ | 110 |
| II.5. - <u>RESULTATS ET CONFRONTATION EXPERIMENTALE</u> | 114 |
| II.5.1. Rôle comparé des paramètres du couvert $C_{M(z)}$ et $f(z)$ | 114 |
| II.5.2. Analyse de la solution $L(z)$ (calcul spatial) | 116 |
| a) Comparaison des différentes solutions | 116 |
| b) Comparaison entre profils calculés et mesurés | 118 |
| c) Comparaison avec les paramètres aérodynamiques classiques U_* , D , z_0 | 123 |
| d) Conclusions | 128 |
| II.5.3. Etude de la solution simplifiée $L(z)$ (calcul unidirectionnel) | 128 |
| a) Comparaisons des solutions obtenues par calcul unidirectionnel et le calcul spatial général | 129 |
| b) Etude expérimental sur blé | 129 |
| c) Evolution de la hauteur de déplacement D | 131 |
| II.5.4. Rôle des paramètres du couvert C_M , a_x , $f(z)$ | 133 |
| a) Rôle de C_M | 133 |
| b) Rôle du recouvrement a_x | 133 |
| c) Rôle de la surface foliaire et de la densité de surface foliaire | 133 |
| II.6. - <u>CONCLUSIONS</u> | 138 |

.....

| | |
|--|-----|
| III.1. - <u>ANALYSE DU SYSTEME D'EQUATION DE BASE</u> | 141 |
| III.1.1. Bilan d'énergie | 141 |
| III.1.2. Expressions des densités de flux convectif | 142 |
| III.1.3. Expressions des échanges au niveau des surfaces | 143 |
| III.1.4. Etude de la relation entre $T_g(z)$, la température de surface $C_g(z)$ la concentration à la surface | 147 |
| III.1.5. Système d'équations lié au bilan d'énergie nécessaire pour résoudre les transferts d'énergie | 151 |
| III.1.6. Etude du profil de rayonnement net | 153 |
| III.2. - <u>ANALYSE ET RESOLUTION DU SYSTEME REDUIT : PROFIL D'ENTHALPIE $H(z)$ ET DE DEFICIT DE SATURATION $Y(z)$</u> | 156 |
| III.2.1. Expression de l'enthalpie et étude de sa variation | 156 |
| III.2.2. Equation du déficit de saturation | 157 |
| III.2.3. Système de résolution de toutes les grandeurs | 161 |
| III.3. - <u>ETUDE DU PROFIL D'ENTHALPIE $H(z)$</u> | 162 |
| III.3.1. Valeur de la température de surface d'un sol | 163 |
| III.3.2. Discussion et comparaison | 165 |
| III.4. - <u>ETUDE DE LA SOLUTION DE L'EQUATION DONNANT LE PROFIL DE DEFICIT DE SATURATION $Y(z)$</u> | 167 |
| III.4.1. - Etude des trois solutions types de l'équation $Y(z)$ | 168 |
| a) Cas d'un profil de résistance stomatique nulle $Y_o(z)$ | 168 |
| b) Cas d'un profil de résistance stomatique infinie $Y_M(z)$ | 170 |
| c) Cas d'un profil de résistance stomatique $r(z)$ connu | 172 |
| III.4.2. - Rôle des solutions $Y(z)$ et des valeurs correspondantes pour le sommet du couvert $Y(z_h)$ | 174 |
| a) Rappels des relations et des notions classiques de l'évapotranspiration | 175 |
| b) Rôle des différentes valeurs prises par $Y(z_h)$ | 180 |
| III.4.3. - Particularité des solutions $Y(z)$ | 183 |
| a) Rôle de l'état hydrique de la surface du sol $Y(o)$ | 183 |
| b) Rôle du déficit de saturation $Y(Z_R)$ | 184 |
| c) Rôle du rayonnement net R_n | 185 |

.....

III.5. - LES SOLUTIONS AUX TRANSFERTS D'ENERGIE : RESULTATS ET CONFRONTATIONS

| | |
|--|----------|
| <u>EXPERIMENTALES</u> | Page 186 |
| III.5.1. - Description des profils microclimatiques : Températures de l'air, de son point de rosée et des surfaces | 186 |
| III.511 Profils de température et de température du point de rosée de l'air | 186 |
| a) Rôle des caractéristiques climatiques: $R_n, U(z_R), Y(z_r)$ | 186 |
| b) Rôle des caractéristiques de surface: paramètre $\alpha(z)$ | 190 |
| c) Rôle de la densité de surface foliaire | 190 |
| d) Exemples de confrontations expérimentales | 195 |
| III.512 Profil de température de surface | 198 |
| III.5.2. - Analyse des variations de densité de flux de chaleur latente et sensible | 201 |
| III.5.3. - Analyse de l'évapotranspiration | 204 |
| a) Evolution en fonction du rayonnement net R_n | 204 |
| b) Evolution en fonction de la vitesse du vent, $U(z_R)$ | 207 |
| c) Rôle de la densité de peuplement | 207 |
| III.6. - <u>LA NOTION DE RESISTANCE (r_a, r_o, r_s) ET SA LIMITE DE VALIDITE</u> | 210 |
| III.7. - <u>L'EVAPOTRANSPIRATION ET SON ESTIMATION</u> | 213 |
| IV - <u>MODELISATION DU TRANSFERT DE CO₂</u> - | 215 |
| IV.1. - <u>DESCRIPTION DE L'EQUATION DONNANT LE PROFIL DU FLUX DE CO₂ : $\phi_{CO_2}(z)$</u> | 217 |
| IV.2. - <u>ETUDE DE L'EXPRESSION DE LA PHOTOSYNTHESE DE LA FEUILLE $\phi_p(z)$</u> | 219 |
| IV.2.1. Description de la relation $\phi_p(z)$ | 219 |
| IV.2.2. Etude des paramètres $R(z)$ et $E_a(z)$ | 221 |

.....

| | |
|---|----------|
| IV.3. - <u>RESULTATS ET CONFRONTATION EXPERIMENTALE</u> | Page 224 |
| IV.3.1. Description des profils de concentration et de leur évolution | 224 |
| IV.3.2. Evolution des densités de flux de photosynthèse nette | 230 |
| IV.3.3. Photosynthèse nette du couvert | 230 |
| <u>CONCLUSIONS</u> | 234 |

LISTE DES SYMBOLES

| | |
|-----------------|--|
| A | Coefficient ou fonction intermédiaire. |
| A(θ) | Fonction de répartition des angles d'inclinaison des feuilles. |
| a | Albédo des surfaces. |
| $a_{i\phi}(z)$ | Densité de surface foliaire pour la classe d'élément i et d'angle ϕ ($m^2 m^{-3}$). |
| ax | Paramètre de recouvrement des obstacles. |
| a_0, a_1, a_2 | Coefficients. |
| B | Coefficient ou fonction intermédiaire. |
| C(z) | Concentration en vapeur d'eau ($Kg m^{-3}$). |
| $C_s(z)$ | Concentration en vapeur d'eau à la surface des feuilles ($Kg m^{-3}$). |
| C_c | Coefficient de traînée due à la force de traînée. |
| $C_M(z)$ | Coefficient moyen de traînée des feuilles au niveau z . |
| C_o | Coefficient de traînée d'un élément. |
| C_p | Coefficient de traînée due aux pressions. |
| c_p | Chaleur massique de l'air ($J Kg^{-1} °C^{-1}$). |
| D | Hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique (m). |
| d | Dimension moyenne des feuilles (m). |
| E | Terme d'évapotranspiration (valeur positive) ($W m^{-2}$). |
| E_a | Evapotranspiration de la surface considérée si sa température est T(z_R) (valeur positive) ($W m^{-2}$). |
| E_o | Evapotranspiration dans le cas de la saturation à la surface du couvert (valeur positive) ($W m^{-2}$). |
| ET, ETR | Evapotranspiration réelle (valeur positive) ($W m^{-2}$). |
| E(z) | Energie radiative absorbée au niveau z (courtes longueurs d'onde $<3\mu m$) ($W m^{-2}$). |
| $E_D(z)$ | Energie diffuse ($<3\mu m$) au niveau z ($W m^{-2}$). |
| $E_i(z)$ | Energie directe ($<3\mu m$) au niveau z ($W m^{-2}$). |
| $E_V(z)$ | Energie visible au niveau z ($W m^{-2}$). |
| F(z) | Surface foliaire cumulée (entre les niveaux z_h et z) ($m^2 m^{-2}$). |
| F_c | Force de traînée ($Kg m s^{-2}$). |
| F_i | Force de traînée totale ($Kg m s^{-2}$). |

| | |
|--------------------------------|---|
| F_p | Force de pression (Kg m s^{-2}). |
| $f(z)$ | Densité de surface foliaire au niveau z ($\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$). |
| $f, f(y)$ | Surfaces des obstacles par unité de volume au niveau y ($\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$). |
| f_h | Surfaces d'obstacles en projection sur un plan perpendiculaire à une direction donnée et par unité de volume ($\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$). |
| $G(\)$ | Fonction complexe de la géométrie du couvert. |
| $g(\theta)$ | Fonction de répartition des inclinaisons θ . |
| $H(z)$ | Enthalpie de l'air au niveau z (J m^{-3}). |
| H_a | Enthalpie de l'air au niveau de référence z_R (J m^{-3}). |
| $h(z)$ | Coefficient d'échange des feuilles au niveau z (m s^{-1}). |
| $h_c(z)$ | Même coefficient pour le CO_2 (m s^{-1}). |
| $h_M(z)$ | Même coefficient pour H_2O (m s^{-1}). |
| $\left[h \right]_{z_h}^{z_R}$ | Coefficient d'échange du couvert entre le sommet et le niveau de référence (m s^{-1}). |
| \vec{i} | Vecteur unitaire. |
| \vec{j} | Vecteur unitaire. |
| \vec{k} | Vecteur unitaire. |
| \vec{l} | Vecteur unitaire. |
| \vec{m} | Vecteur unitaire. |
| \vec{n} | Vecteur unitaire. |
| $K(z)$ | Diffusivité turbulente de quantité de mouvement ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). |
| $K_M(z), K_S(z)$ | Diffusivité turbulente de masse et de chaleur ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). |
| k | Constante de Karman (0,4). |
| $L(z)$ | Longueur de mélange caractéristique du niveau z (m). |
| L | Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J Kg^{-1}). |
| L_0 | Dimension caractéristique d'un élément (m). |
| L.A.I. | Indice de surface foliaire totale (Leaf Area Index). |
| $l(z)$ | Longueur de mélange dans l'air libre (m). |
| l_i | Largeur des feuilles (m). |
| M | Masse molaire de la vapeur d'eau (Kg mole^{-1}). |
| \vec{n} | Vecteur normal aux obstacles. |

| | |
|-------------------|---|
| n_{sx} | Nombre de valeurs de résistance stomatique de la face supérieure (classe x, gamme Δr). |
| n_{ix} | Nombre de valeurs de résistance stomatique de la face inférieure |
| $P(T)$ | Pression saturante de vapeur d'eau à la température T en P. |
| $P(r)$ | Probabilité de présence des obstacles (sphère de rayon r). |
| P_{mm} | Photosynthèse maximale d'une feuille (CO_2 et lumière saturants) ($Kg\ m^{-2}\ s^{-1}$). |
| $p(z), p_a$ | Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air au niveau z et z_R en P. |
| $p(\theta, \phi)$ | Probabilité pour les obstacles d'avoir une normale d'angle θ et ϕ . |
| ΔQ | Variation d'énergie au sein du couvert. |
| ΔQ_{CO_2} | Variation d'énergie au sein du couvert due à la photosynthèse. |
| $R(z)$ | Respiration au niveau z. |
| R | Constante des gaz parfaits. |
| R_i | Nombre de Richardson. |
| $R(z)$ | Bilan de rayonnement de grandes longueurs d'onde au niveau z ($>3\mu m$) ($W\ m^{-2}$). |
| R_a | Rayonnement atmosphérique. |
| R_g | Rayonnement global. |
| $R_n(z)$ | Rayonnement net au niveau z ($W\ m^{-2}$). |
| R_n | Rayonnement net du couvert ($W\ m^{-2}$). |
| R_{n*} | Rayonnement net climatique ($W\ m^{-2}$). |
| r | Rayon. |
| $r(z)$ | Résistance stomatique moyenne au niveau z ($s\ m^{-1}$). |
| r_a | Résistance aérodynamique du couvert ($s\ m^{-1}$). |
| r_c | Résistance globale du couvert ($s\ m^{-1}$). |
| r_{cx} | Résistance de transfert du CO_2 aux centres de carboxylation ($s\ m^{-1}$). |
| r_m | Résistance de diffusion du CO_2 dans le mésophylle ($s\ m^{-1}$). |
| r_o | Résistance de structure du couvert ($s\ m^{-1}$). |
| r_s | Résistance stomatique moyenne du couvert ($s\ m^{-1}$). |
| r_x | Résistance due aux processus chimiques de la carboxylation ($s\ m^{-1}$). |

| | |
|---------------------------|---|
| S | Surface (m^2). |
| S_p | Variation de probabilité de présence des obstacles par unité d'accroissement de volume. |
| $T(z)$ | Température de l'air au niveau z ($^{\circ}C$). |
| $T_{max}(z_h)$ | Température maximale de surface (pas d'évaporation) ($^{\circ}C$). |
| $T_{*}(z_h), T_{s*}(z_h)$ | Température de l'air au sommet du couvert dans le cas de la saturation et de la non-saturation ($^{\circ}C$). |
| $T_r(z)$ | Température de rosée de l'air au niveau z ($^{\circ}C$). |
| T_{rs} | Température de rosée à la surface ($^{\circ}C$). |
| $T_{r*}(z_h)$ | Température du point de rosée de l'air au sommet du couvert ($^{\circ}C$). |
| $T_s(z)$ | Température de surface des feuilles au niveau z ($^{\circ}C$). |
| T_{so}, T_{ss} | Température de surface dans le cas de la saturation et de la non-saturation ($^{\circ}C$). |
| U | Vitesse horizontale moyenne ($m s^{-1}$). |
| $U(z)$ | Vitesse horizontale du vent au niveau z ($m s^{-1}$). |
| U_{*} | Vitesse de frottement du couvert ($m s^{-1}$). |
| U_{*s} | Vitesse de frottement à la surface du sol ($m s^{-1}$). |
| \bar{u} | Vitesse horizontale moyenne ($m s^{-1}$). |
| $u(t)$ | Vitesse horizontale instantanée ($m s^{-1}$). |
| $u'(t)$ | Fluctuation de la vitesse ($m s^{-1}$). |
| \vec{u} | Vecteur unitaire dans la direction choisie. |
| V | Volume (m^3). |
| \bar{w} | Vitesse verticale moyenne ($m s^{-1}$). |
| $w'(t)$ | Fluctuation de la vitesse verticale ($m s^{-1}$). |
| $X(z)$ | Variable adimensionnée $[L(z) U'(z)/U(z)]$ |
| X_o | Solution particulière de $X(z)$. |
| $Y(z)$ | Différence entre la température de l'air $T(z)$ et la température du point de rosée $T_r(z)$, grandeur proportionnelle au déficit de saturation ($^{\circ}C$). |
| $Y_M(z)$ | Valeurs particulières maximales de $Y(z)$ lorsque les surfaces sont sèches. |
| $Y_o(z)$ | Valeurs particulières minimales de $Y(z)$ quand les surfaces sont saturées. |
| z | Hauteur (m). |

| | |
|----------------------------|---|
| z_h | Hauteur du couvert (m). |
| z_{h1}, z_{h2} | Hauteurs caractéristiques du couvert (m). |
| z_o | Épaisseur de rugosité du couvert (m). |
| z_{os} | Épaisseur de rugosité à la surface du sol (m). |
| z_R | Hauteur de référence (m). |
| α | Coefficient d'atténuation du profil de vent. |
| $\alpha(z)$ | Coefficient lié au profil de résistance stomatique. |
| α_o, β_o | Coefficient d'absorption de l'énergie radiative nette. |
| α_1, β_1 | Coefficient d'absorption du visible. |
| α_D | Coefficient d'extinction du diffus au sein du couvert. |
| α_{D1}, α_{D2} | Coefficients. |
| α_i | Angle d'inclinaison des éléments de feuille. |
| $\alpha(\phi)$ | Coefficient lié aux coefficients de traînée et fonction de l'angle ϕ . |
| β_D | Coefficient pour la lumière diffuse. |
| γ | Constante psychrométrique. |
| ϵ | Emissivité des surfaces (grandes longueurs d'onde). |
| η | Fonction. |
| θ_i | Angle d'inclinaison des organes. |
| θ_f | Angle d'inclinaison des feuilles. |
| μ | Rapport. |
| ν | Viscosité cinématique ($m^2 s^{-1}$). |
| ρ | Masse volumique de l'air ($Kg m^{-3}$). |
| $\tau(z)$ | Contrainte ou flux de quantité de mouvement au niveau z ($Kg m^{-1} s^{-2}$). |
| τ_f | Contrainte pariétale au niveau de la feuille ($Kg m^{-1} s^{-2}$). |
| τ_o | Contrainte à la surface du sol ($Kg m^{-1} s^{-2}$). |
| τ_p | Contrainte pariétale au niveau du couvert ($Kg m^{-1} s^{-2}$). |
| ϕ | Angle entre la direction du vent et les éléments dans un couvert (azimut). |
| ϕ_f | Angle (azimut d'une feuille). |
| $\Delta\Phi$ | Flux advectif ($J m^{-3} s^{-1}$). |
| $\Delta\Phi_L(z)$ | Source ou puits de chaleur latente ($W m^{-3}$). |

| | |
|----------------------|--|
| $\Delta\phi_S(z)$ | Source ou puits de chaleur sensible ($W m^{-3}$). |
| ϕ_C | Flux conductif de chaleur à la surface du sol. |
| $\phi_{CO_2}(z)$ | Flux de gaz carbonique au niveau z ($Kg m^{-2} s^{-1}$). |
| $\phi_m(z)$ | Flux de quantité de mouvement au niveau z ($Kg m^{-1} s^{-2}$). |
| $\phi_L(z)$ | Flux de chaleur latente au niveau z ($W m^{-2}$). |
| ϕ_{LM} | Evapotranspiration d'un couvert entièrement sec (flux à la surface du sol). |
| ϕ_{Lo} | Evapotranspiration d'un couvert entièrement humide (cas d'ETP). |
| ϕ_o | Rendement des processus photochimiques de la photosynthèse. |
| $\phi_P(z)$ | Source ou puits de CO_2 au niveau z dans le couvert ($Kg m^{-2} s^{-1}$) par unité de surface d'échange. |
| $\phi_S(z)$ | Flux de chaleur sensible au niveau z ($W m^{-2}$). |
| $\chi(z)$ | Concentration de l'air en CO_2 , niveau z ($Kg m^{-3}$). |
| $\chi(z_R) = \chi_a$ | Concentration de référence au niveau z_R . |
| ψ_s | Potentiel hydrique à la surface du sol. |
| σ | Constante de Stefan-Boltzman ($W m^{-2} \text{ } ^\circ K^{-4}$). |

INTRODUCTION

Les couverts végétaux constituent de formidables usines de synthèse dont la production fournit non seulement la presque totalité de l'énergie primaire de type alimentaire, mais encore fournit grâce à la fossilisation passée de cette énergie une grande partie de l'énergie actuellement consommée. La population d'êtres autotrophes que constituent les couverts végétaux fonctionne en puisant des éléments minéraux et de l'eau dans le substrat sol, du gaz carbonique dans le milieu air et en synthétisant, grâce à l'énergie solaire captée, ces éléments de base - H_2O et CO_2 - en glucides et autres composés organiques hautement énergétiques.

La productivité de ces systèmes dépend donc, bien naturellement, de leur alimentation en ces différents composés indispensables : éléments minéraux, eau et gaz carbonique ; l'alimentation minérale ou fumure, comme les apports d'eau ou irrigation sont des moyens artificiels employés depuis fort longtemps pour accroître la productivité des cultures. Cependant, cette productivité dépend aussi de l'usine elle-même, choix de la plante et de sa variété ; là encore, par le biais de la sélection, un moyen puissant d'accroissement de la productivité et des potentialités de stockage de la plante a été progressivement perfectionné. Enfin, cette productivité des cultures va dépendre aussi pour une large part des conditions climatiques et microclimatiques qui interfèrent de façon très directe sur toutes les réactions physiologiques, c'est-à-dire, sur le fonctionnement interne de l'usine et son développement futur.

Le but poursuivi concerne précisément ce dernier point, c'est-à-dire,

comment, climat local et plante interagissent pour créer certaines conditions microclimatiques et certains échanges entre le couvert et son milieu ambiant. La modélisation entreprise sera précisément de définir comment, à partir d'une plante donnée et de ses caractéristiques, ainsi que des diverses populations de densité et de structure variées qu'il est possible de considérer, une description qualitative et quantitative des réactions aux facteurs climatiques (évapotranspiration et photosynthèse) et de la modification du microclimat créé, peut être atteinte. En effet, les variations de structure des populations entraînent des modifications dans les échanges de masse et d'énergie et, par conséquent, dans les grandeurs microclimatiques à tous les niveaux au sein du couvert et au-dessus du couvert ; globalement, ces modifications se traduisent par une croissance et une production sensiblement différentes et, par conséquent, par une efficacité de l'eau qui peut être variable.

L'analyse entreprise, qui touche à la fois la compréhension des phénomènes d'échange, leur prédiction et leur quantification, nécessite cependant les compléments biologiques de première importance que sont les réactions instantanées liées au mécanisme physiologique du système, telles que : la régulation stomatique en vue d'une intégration dans le temps, l'utilisation de la production photosynthétique pour modifier par la croissance (racinaire et aérienne) le milieu végétal initialement défini. A défaut d'une compréhension ou d'une modélisation de ces mécanismes physiologiques qui ne font pas directement partie du but poursuivi dans cet essai de modélisation des couverts végétaux, des mesures répétées dans le temps fourniraient les éléments quantitatifs nécessaires.

Pour atteindre cet objectif, une analyse détaillée des relations de base et de leur domaine d'application doit être présentée, ainsi que les essais de généralisation entrepris pour appliquer ces lois au domaine complexe d'une végétation. Enfin, une synthèse de ces différents éléments sera décrite pour tenir compte des interactions complexes entre les divers types d'échange que sont les transferts de quantité de mouvement, d'énergie et de masse, synthèse sans laquelle un milieu naturel aussi complexe que le corps poreux que constitue le milieu végétal, ne peut pas être analysé et modélisé avec précision.

I - PRESENTATION DU MODELE DE COUVERT ADOPTE :

DONNEES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES CARACTERISTIQUES

L'ensemble des couverts végétaux constitue un certain type de surface d'échange entre le sol et l'atmosphère dont la complexité, liée à la biologie du système, le dissocie des surfaces d'échanges beaucoup plus simples que représentent les surfaces de sol nu ou les étendues d'eau. A cette complexité, il faut ajouter la variété due à la très grande diversité naturelle de ces couverts.

Cependant l'agronome et le forestier sont intervenus depuis des siècles pour modeler, homogénéiser et aussi réduire cette infinie variété des associations végétales naturelles. Ainsi, le champ de l'agronome n'est-il à présent, le plus souvent, qu'un peuplement ne comprenant qu'une espèce végétale et dont la densité a généralement été portée au voisinage de son optimum afin d'obtenir, compte tenu des conditions climatiques et du niveau technique actuel, la meilleure production par unité de surface. Quant à la forêt, si elle n'est pas toujours un peuplement d'une espèce unique, elle est très souvent, en exploitation intensive, un peuplement spatialement assez homogène.

C'est dans le cadre de couverts relativement homogènes sous l'angle spatial que la modélisation s'appliquera, son but étant d'analyser pour un couvert donné, compte tenu des caractéristiques climatiques et de la masse d'air, la répartition des échanges de vapeur d'eau et de CO_2 , les échanges globaux au niveau du couvert et l'ensemble des profils microclimatiques (vent, température, humidité, CO_2). Après un bref rappel des principaux transferts et des grandeurs qui les caractérisent, les hypothèses de base concernant les liens entre ces échanges et ce type de couvert seront présentées et discutées afin de mieux préciser le domaine de validité et les possibilités d'une telle analyse. Il restera alors à définir les grandeurs caractéristiques aux bornes du système choisi et les principaux paramètres permettant de décrire le milieu et, en particulier, les caractéristiques physiologiques du couvert vues sous l'angle de la modélisation physique des échanges

de masse et d'énergie. Enfin, pour préciser les conditions dans lesquelles ces notions plus ou moins abstraites ainsi que les développements qui vont suivre ont été forgés, adaptés à la réalité et confrontés à l'expérience in situ (grande culture dans la région parisienne) une présentation du dispositif expérimental avec ses objectifs, ses techniques et méthodes a été faite pour clore ce premier chapitre introductif.

I.1. LES DIFFERENTS TRANSFERTS AU NIVEAU D'UN COUVERT

Comme nous l'avons souligné, lorsqu'on cherche à analyser la croissance et le développement d'un couvert végétal en fonction de son milieu extérieur, on ne peut faire abstraction des échanges vitaux que sont les échanges d'eau et de gaz carbonique. Mais la vaporisation de l'eau étant un phénomène très énergétique - un kilo d'eau représente $2,46 \cdot 10^6$ J soit environ l'énergie radiative d'origine solaire reçue par unité de surface au niveau de la terre pendant une heure et par belle journée d'été - son analyse est indissociable de celle concernant les échanges d'énergie dans leur ensemble. De même les échanges de CO_2 qui traduisent en partie la photosynthèse du couvert ne peuvent être analysés indépendamment des échanges d'énergie radiative situés dans les gammes de longueurs d'onde du visible dont dépend directement la synthèse chlorophyllienne. Enfin, l'ensemble de ces transferts ne peut être dissocié du milieu fluide (l'air) au sein duquel ils s'effectuent et par conséquent, on ne peut ignorer les problèmes mécaniques de transfert de quantité de mouvement dont l'analyse permet, par similitude, celle des transferts convectifs de masse et d'énergie. Ainsi, trois types de problèmes sont à analyser successivement (fig.1).

I.1.1. Problème mécanique ou échange de quantité de mouvement (cf.chap.II)

Cette analyse constitue le point initial de toute étude des échanges de masse et d'énergie, car elle permet généralement de définir les diffusivités turbulentes, ou coefficient de proportionnalité entre un flux et un gradient :

$$\text{Flux} = \text{Constante} \times \text{Diffusivité} \times \text{Gradient} \quad (\text{I.1})$$

La connaissance des diffusivités turbulentes permet alors, non seulement de résoudre complètement ce type d'échange et d'atteindre un des profils

microclimatiques caractéristiques, celui de la vitesse du vent (cf. chap.II), mais encore de traiter les échanges de chaleur et ceux de masse (H_2O et CO_2). En réalité, sous un angle purement biologique, ce sont essentiellement ces derniers, les échanges d'eau (cf. para. I.1.2) et de gaz carbonique (cf. para. I.1.3) - synthèse chlorophyllienne - qui présentent un intérêt majeur direct ; ils permettent, en effet, de préciser l'efficacité de l'eau d'un couvert et sa production.

I.1.2. Problème énergétique ou échange d'énergie et d'eau (cf. chap.III)

Le problème énergétique est très certainement un des points les plus importants par les multiples aspects qu'il recouvre et qu'il permet donc de traiter. D'une part, comme nous l'avons vu, le problème eau ne peut être abordé indépendamment d'une étude énergétique globale puisque la vaporisation de l'eau au niveau de la plante consomme généralement la plus grande partie de l'énergie disponible. D'autre part, la température de l'air et principalement la température des organes dont il est inutile de détailler le rôle physiologique considérable, est précisément la résultante de ces échanges d'énergie qui revêtent donc à double titre un intérêt particulier. En résumé, l'analyse énergétique qui comprend l'étude du bilan radiatif ou profil de rayonnement et les flux de chaleur sensible et de chaleur latente (fig.1) permet de résoudre trois types de problèmes importants concernant les couverts végétaux :

- détermination des pertes en eau à tous les niveaux du couvert et aussi par conséquent, pour l'ensemble du couvert,
- détermination des températures de surface dont le rôle sur le développement et la croissance est primordial,
- enfin, détermination du micro et phytoclimat d'une culture qui intéresse l'écologiste, le zoologiste et le phytopathologiste (nous définissons par phytoclimat les caractéristiques climatiques et leurs variations spatiales au voisinage des organes et par microclimat les variations des caractéristiques climatiques au-dessus des couverts).

I.1.3. Problème photosynthétique ou échange d'énergie radiative visible et de gaz carbonique (cf. chap.IV)

Le problème photosynthétique est triple : c'est d'abord une fonction

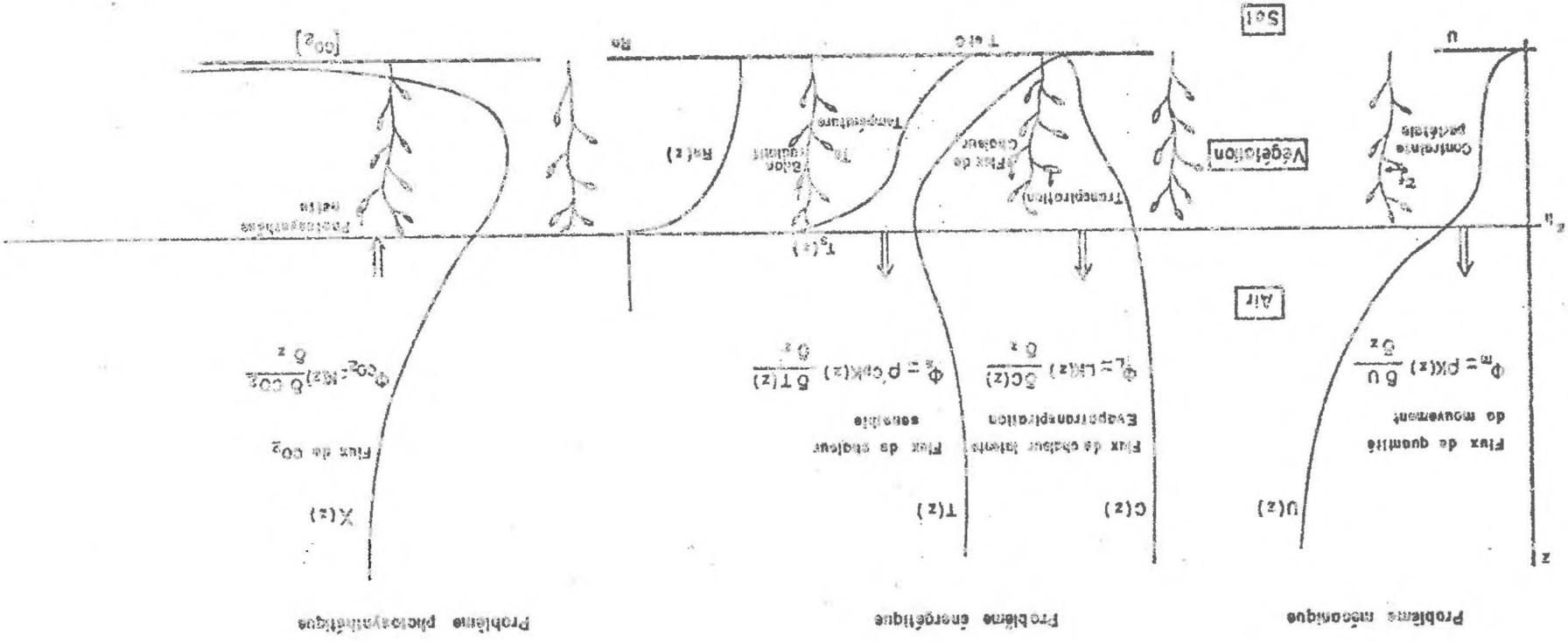


Fig. 1 - Schéma décrivant les principaux profils microclimatiques et les flux qui s'y rapportent.

a) Problème mécanique : $U(z)$ profil de vitesse de vent, $\Phi^m(z)$ flux de quantité de mouvement, τ_D contrainte péristale au niveau de la feuille.

b) Problème énergétique : $T(z)$ profil de température de l'air, $C(z)$ profil de concentration de vapeur d'eau, $T_s(z)$ profil de température de surface des feuilles, $R_a(z)$ profil de rayonnement net (bilan radiatif), $\phi_s^s(z)$ flux de chaleur latente, $\phi_s^l(z)$ flux de chaleur sensible.

c) Problème photosynthétique : $X(z)$ profil de concentration en CO₂, $\phi^{CO_2}(z)$ flux de CO₂

avec $K(z)$ la diffusivité turbulente, ρ la masse volumique, c_p la chaleur massique et L la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

biologique liée à la plante et à ses caractéristiques propres, dont entre autres, la structure et la disposition spatiale de ses feuilles ; puis un problème d'absorption de la part de l'énergie radiative visible utile à cette fonction biologique ; enfin, un problème de diffusion massique du CO_2 de l'air extérieur vers les centres de photosynthèse au sein des chloroplastes.

I.2. ANALYSE DES HYPOTHESES DE BASE DU MODELE

Comme nous l'avons vu, c'est dans le cadre d'un couvert relativement homogène sous l'angle spatial que la modélisation entreprise s'appliquera, et cette notion sera donc succinctement discutée. D'autre part, il sera aussi nécessaire de préciser les échelles d'espace et de temps qui seront utilisées au cours de cette analyse, échelles qui sont plus ou moins directement imposées par le but poursuivi, les phénomènes mis en cause, les dimensions et le degré d'homogénéité du milieu considéré. Enfin, la base des analyses concernant les échanges au niveau du couvert étant sous la dépendance du système convectif, il sera de première importance de définir comment se justifie, et dans quelles limites, le choix du régime convectif et dans quelles mesures l'hypothèse de la conservativité du flux au-dessus d'un couvert de surface suffisante est applicable.

I.2.1. Homogénéité horizontale

Deux caractéristiques, le choix d'une variété unique ou d'un clone et celui d'une densité généralement élevée, tant en agronomie qu'en sylviculture, ont favorisé l'homogénéité, bien qu'elle ne puisse réellement être définie que par rapport à un problème particulier, ce que nous ferons ci-dessous en liaison avec les phénomènes de transfert et la biologie du système. Soulignons aussi que la croissance verticale des plantes conduit, tant par l'âge que par la nature et par la forme des organes qui se développent, à une certaine stratification qui favorise une tendance à l'homogénéité horizontale. Par contre, la plupart des cultures semées sous forme de rangées conduit à une répartition particulière qui contribue à réduire l'homogénéité spatiale de façon plus marquée dans les parties basses et hautes du couvert où la densité de végétation est plus faible. C'est le cas des tiges et des troncs dans la partie basse des couverts ou celui des cimes (par exemple les panicules mâles d'une culture de maïs), bien que leurs surfaces d'échange ne

représentent souvent que quelques pour cent des surfaces totales.

- Sous l'angle des transferts de masse et d'énergie, cette hétérogénéité ne prend de l'importance que si des zones particulières d'échange apparaissent, pouvant alors modifier les phénomènes adais et rendre caduque le type de loi adopté. Ce type de modification n'apparaît heureusement que rarement. En effet, les couches limites des organes tels que les feuilles ou les tiges sont toujours très petites, de l'ordre du millimètre atteignant parfois le centimètre, aussi, chaque élément peut généralement être considéré comme une surface d'échange individuelle et indépendante. Il faudrait atteindre des densités locales considérables (> 50 ou $100 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$) pour que les surfaces d'échanges ne puissent plus être admises comme indépendantes ; dans ce cas et sous l'angle des échanges, une zone d'inhomogénéité à prendre en considération dans l'analyse, existe. Ce genre d'interaction entre les surfaces se rencontre pour certaines parties de la plante, comme les organes reproducteurs et certaines zones de fort développement, par exemple les zones apicales.

En dehors de ces quelques cas, il peut aussi apparaître de simples contrastes entre des zones de forte densité avoisinant des zones de faible densité au niveau d'un même plan horizontal ; ces différences vont tendre à provoquer un écoulement privilégié à travers les zones de faible densité et à détruire la notion d'homogénéité si, en particulier, ces écoulements privilégiés peuvent jouer un rôle non négligeable (introduisant une erreur supérieure à 10 ou 20 % sur le flux moyen total). Heureusement ces gradients horizontaux de densité n'apparaissent que dans le cas de culture où les individus (certains vergers par exemple) ou encore rangées d'individus (vigne par exemple) sont bien différenciés. Dans ce cas, plusieurs dimensions caractéristiques interviennent (PERRIER et al. 1972) en particulier la hauteur du couvert z_h et la distance d entre les rangs, mais aussi l'interdistance i de l'espace vide entre deux rangées (fig. 2). D'après ces auteurs, pour tout rapport $d/z_h \geq 1$, la zone de dissipation du flux pour chaque individu ou rangée est indépendante (fig. 2a) ($d/z_h \gg 1$) ou partiellement en interaction avec les suivantes (fig. 2b), l'imbrication ne devenant totale (fig. 2c, 2d) que dans le cas où d/z_h est inférieur à l'unité et dans la mesure où l'intervalle i entre deux rangées reste inférieur à la distance moyenne j entre deux éléments d'échange.

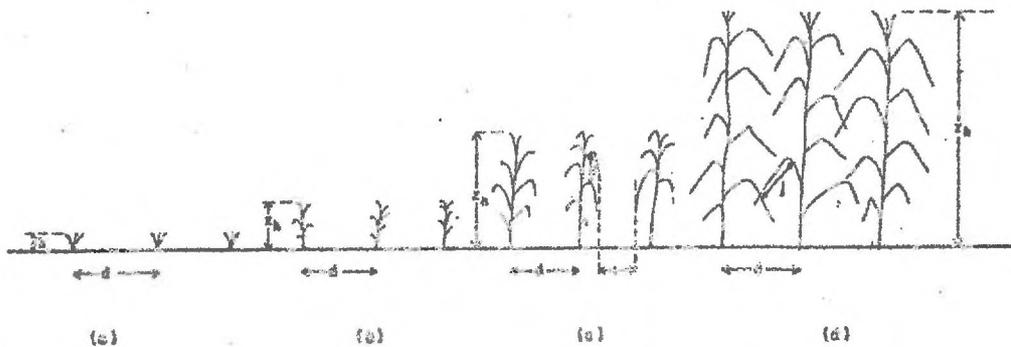


Fig. 2 - Schéma décrivant les différents cas d'hétérogénéité (a), (b), (c), le cas d'homogénéité (d) et les paramètres caractéristiques : (z_H) hauteur de la culture ; d distance entre deux rangs ; i espace sans feuille entre deux rangs ; j distance moyenne entre deux feuilles.

Dans le cas contraire $i > j$, le cas de la figure 2c comme les précédents 2a et 2b constituent des cas d'hétérogénéité qui ne relèvent plus du modèle présenté. Quand on considère une culture depuis son semis, on passe généralement par les quatre stades décrits et ce n'est donc que lorsque cette différenciation disparaît, lors du développement foliaire en particulier, que le couvert sous l'angle des transferts peut être considéré comme homogène. La culture atteint d'autant plus vite cet état d'homogénéité qu'elle est semée de façon plus homogène et plus dense ; dans ces conditions, les variations horizontales de densité observées dans les conditions naturelles qui de plus sont toujours très progressives et ne dépassent pas au maximum 1 à 2 $m^{-2} m^{-3}$, ne permettent généralement pas l'établissement d'écoulements privilégiés distincts.

Il est possible de schématiser ces observations et de les regrouper sous forme de trois critères test de l'homogénéité horizontale au niveau des couvertes :

a) Les divers échanges convectifs au sein d'un peuplement peuvent-ils être

considérés comme uniques (convection forcée turbulente à l'exclusion de convection libre par exemple) ?

b) L'intensité du flux et les grandeurs caractérisant le milieu sont-elles à peu près les mêmes en tout point d'un plan horizontal donné ?

c) Compte tenu d'une structure spatiale particulière (culture en ligne par exemple) existe-t'il des mouvements privilégiés dans certaines directions ? (vitesse horizontale accrue par exemple dans la direction de l'inter rang).

- Mais à cette homogénéité sous l'angle des transferts doit se superposer une analyse de l'homogénéité horizontale sous l'angle biologique. En effet, les transferts au niveau des surfaces d'échange sont liés aux réactions biologiques et en particulier à la régulation stomatique (cf. chap. III et IV) et par conséquent, une certaine homogénéité de cette régulation à un même niveau est nécessaire (point b précédent), bien que naturellement, la croissance des plantes, comme nous l'avons vu, y tende. Ainsi, pour les mêmes raisons que précédemment, une hétérogénéité de réaction biologique horizontale qui entraînerait plus de 10 à 20 % de variation dans le flux moyen échangé à ce niveau, ne pourrait plus être traitée par ce modèle.

I.2.2. Echelle de temps et d'espace

- Quels sont les facteurs qui vont prévaloir dans le choix de l'échelle de temps ?

a) Le couvert végétal forme un tout complexe en perpétuelle interaction avec le milieu extérieur qui par nature est un milieu fortement turbulent, entraînant au niveau de tous les paramètres caractéristiques de l'air des fluctuations quasi instantanées de l'ordre de 20 à 50 % de la valeur moyenne. Cette variation continue du milieu aérien implique de façon très classique qu'une analyse des grandeurs et des flux en tout point d'un couvert ne peut se faire que sur une base de temps suffisante (d'au moins 15 mn à 20 mn), afin de déterminer une valeur moyenne significative qui intègre bien l'action de l'ensemble des fréquences composant ce mouvement turbulent et qui ne néglige donc pas l'action des basses fréquences.

Cette base de temps, nécessaire à la mesure et à l'étude de la valeur

moyenne de toutes les grandeurs liées à la turbulence de l'air a , pour des raisons purement expérimentales (cf. par. I.4), été ramenée aux environs de 12 mn, intervalle pendant lequel toutes les grandeurs sont donc analysées et moyennées. Soulignons aussi que cette base de temps, pratiquement instantanée par rapport aux évolutions journalières et à la période de croissance des cultures (plusieurs mois), est parfaitement adaptée aux lois élémentaires des échanges physiques (rel.I.1) sur lesquelles se base cette analyse. Elle répond au but recherché d'une analyse fine des échanges au niveau d'un couvert, tout en tenant compte d'un éventuel retard ou déphasage qui peut se produire au niveau des flux entre la base du couvert et le milieu extérieur, en particulier dans le cas des cultures hautes.

Précisons que les réactions biologiques intervenant sur les échanges (régulation stomatique, absorption racinaire, potentiel hydrique des tissus) sont aussi des phénomènes dont les évolutions se produisent le plus souvent à une échelle de temps de quelques minutes ; ainsi, la base de temps du modèle physique choisi s'adapte assez bien à ce type de réactions biologiques dont les conséquences sont primordiales dans le cadre d'une étude des échanges de masse et d'énergie et qui pourraient être analysées et traduites par un modèle de ce genre. Aux paragraphes suivants (I.2.3 et I.2.4) nous verrons aussi qu'il est impossible de considérer une base de temps supérieure à une demi-heure ou au maximum une heure, car les phénomènes climatiques et biologiques évoluent tout au long de la journée et le problème ne pourrait plus être traité en régime permanent avec des conditions aux limites stables.

b) L'échelle d'espace choisie est celle d'un couvert végétal ou plus exactement, de la surface horizontale minimale d'une partie du couvert qui permettrait de donner une bonne représentativité de ce qui se passe au niveau global de ce couvert. Cette surface, compte tenu des hétérogénéités horizontales, peut varier par exemple d'environ une fraction de mètre carré pour un gazon ras et dense à une fraction d'hectare ou un hectare pour une forêt. Plus un couvert a un développement vertical grand (hauteur z_H élevée) plus les possibilités de développement vertical différencié entre les individus qui occupent d'autre part une surface au sol

plus grande s'accroissent, augmentant ainsi l'hétérogénéité ; par conséquent la surface minimale représentative du couvert tend à croître plus que proportionnellement à sa hauteur.

A titre d'exemple : un champ de maïs (70 cm entre les lignes - 20 cm entre les pieds sur lignes soit $72\ 000\ \text{p. ha}^{-1}$) présentera une surface minimale représentative de l'ordre de quelques dizaines de mètres carrés, une surface d'environ $5\ \text{m}^2$ représente encore une variabilité de 10 à 15 % de l'évapotranspiration (PERRIER et al. 1974). De même, on a montré qu'une investigation sur environ 6 m à travers les divers rangs de maïs était nécessaire pour avoir une bonne valeur des grandeurs radiatives. Par contre, pour un champ de blé, quelques mètres carrés ($\leq 3\ \text{m}^2$) sont suffisants pour fournir une valeur représentative de l'évapotranspiration à mieux que 5 %. La définition de cette dimension horizontale minimum est aussi très importante pour définir de façon générale les zones d'investigations expérimentales et les techniques de prélèvement afin de respecter quelques normes spatiales indispensables. Ces ordres de grandeur ne sont valables qu'en absence de toute hétérogénéité flagrante de sol ou de densité.

I.2.3. Choix du régime de convection adapté au milieu considéré

Le déplacement des masses d'air fortement turbulentes au-dessus des couverts (RIDER 1954) et au sein des couverts (INOUE 1963) conduit à un système de convection forcée turbulente. Les fortes valeurs du taux de turbulence au-dessus et au sein du couvert (ALLEN 1968, GIONCO 1972) montrent que ce régime se transmet en tout point d'un couvert et qu'au voisinage des surfaces d'échange, malgré des nombres de Reynolds parfois faibles (10^3 à 10^6), des échanges de type turbulent semblent prédominer devant des échanges de type laminaire (PERRIER 1968, PARLANGE et al. 1971, SCHUEPP 1972). Cependant, il ne faut pas oublier que les échanges d'énergie s'accompagnent souvent de gradients thermiques de plusieurs degrés qui tendent à instaurer un système de convection libre. Ainsi, dès que les vitesses de vent diminuent, aussi bien au-dessus du couvert (BUSINGER et al. 1971) qu'au sein du couvert (DRUILHET et al. 1971), un régime de convection mixte s'établit. Bien qu'un certain nombre de solutions aient été préconisées (PRIESTLEY 1959, WEBB 1970, LUMLEY and PANOVSKY 1964) pour corriger les analyses de convection forcée en

air libre, en fonction de l'importance d'une certaine convection libre (nombre de RICHARDSON ou GRASHOFF), ce point ne sera pas abordé. Quelques rappels et propositions seront soulignés à différents moments, mais ne feront pas l'objet d'une analyse détaillée.

Aussi, en particulier en ce qui concerne l'intérieur du couvert, tant que ces lois ne seront point précisées, le modèle basé sur une convection forcée pourra présenter des distorsions d'autant plus grandes que des gradients thermiques plus élevés apparaîtront en certains points du couvert.

A cette première difficulté due à la convection mixte s'ajoute celle du régime variable de type périodique qui se compose d'une première variation annuelle (importante uniquement pour le régime thermique du sol) et d'une seconde, journalière, toutes deux imposées par les conditions naturelles. Les variations diurnes de l'ensemble des paramètres climatiques conduisent à des régimes fortement variables particulièrement le matin et en fin d'après midi avec une plus grande constance des paramètres au voisinage du maximum journalier entre 12 et 15 h locales et durant la période nocturne (fig.3, variation des grandeurs climatiques).

Cependant, il est possible d'admettre en première approximation que durant 15 à 20 mn la variation de ces grandeurs reste suffisamment faible pour que le régime permanent puisse être appliqué dans les développements des expressions physiques ; encore faut-il que les constantes de temps de mise en régime soient seulement de quelques minutes et ne dépassent pas dix minutes. En effet, au-dessus de cette valeur, on risquerait de ne jamais obtenir le régime permanent, et un régime transitoire continu s'établirait en fonction du régime variable des données climatiques. Il faut d'ailleurs rappeler que 1 à 5 mn est précisément le temps moyen de mise en régime de la régulation stomatique dans les conditions naturelles lors d'un changement brusque des conditions radiatives par exemple.

Aucune étude n'a encore été réalisée sur les couverts pour déterminer les ordres de grandeur des éventuelles constantes de temps d'un couvert pour les flux et pour les grandeurs telles que la température ou les concentrations. C'est pourquoi nous supposons que le régime permanent est

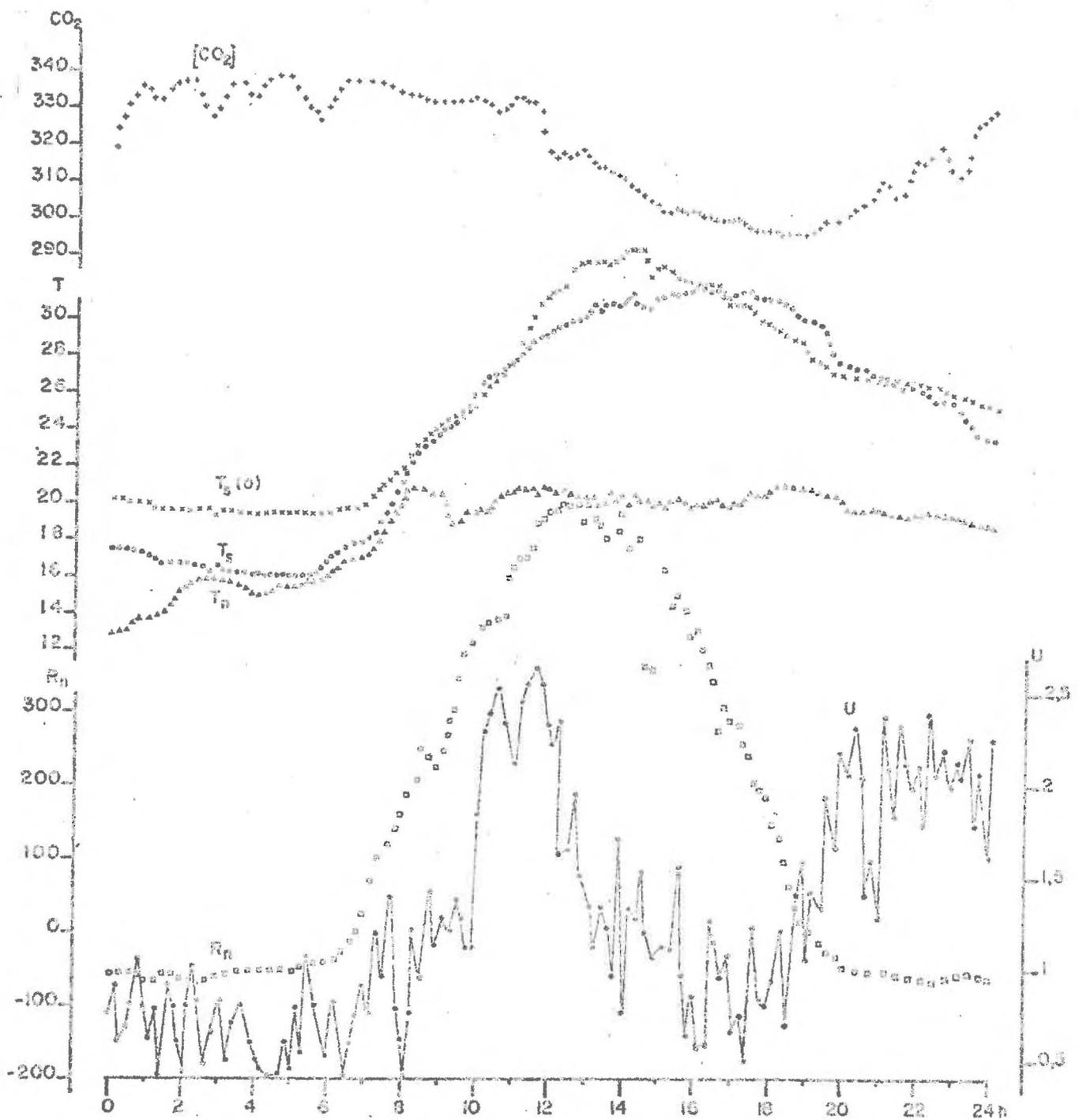


Fig.3 - Variation journalière typique des grandeurs climatiques à 3 m surdessus d'un couvert de maïs non couvrant d'environ 1,2 m de hauteur : gaz carbonique CO₂, température sèche T, et humide T_s, vitesse du vent U, rayonnement net R_n et température de surface du sol (T_sⁿ(0)).

pratiquement atteint à chaque instant et que sur une période de 15 mn, tout écart, par rapport à cette condition théorique, reste faible. Ce problème est certainement un des points très importants et peu connus concernant les couverts. Sous conditions fluctuantes, très fréquentes en climat tempéré et consécutives aux nombreux passages nuageux qui provoquent un perpétuel balancement entre des périodes d'ombre et de plein soleil, les phénomènes sont probablement liés à des séries de régime transitoire. Pour une analyse suivie, avec intégration dans le temps des échanges au niveau d'un couvert, une étude de ces constantes de temps, et aussi des types de temps, de leur séquence et de leur fréquence serait alors nécessaire. En effet, une poursuite de la modélisation sur des périodes plus longues pour atteindre l'échelle de la journée ou de toute une période de croissance nécessite ce type d'analyses et de résultats.

1.2.4. Schéma général et conditions aux limites admissibles

Le problème posé est donc d'analyser au-dessus et au sein d'un couvert en zone de plaine (surface horizontale) l'ensemble des échanges de masse et d'énergie ainsi que les grandeurs qui les caractérisent : rayonnement, vitesses, températures, concentration. L'étude de la répartition verticale de ces grandeurs s'effectuera donc pour un couvert de caractéristiques données, présentant une homogénéité horizontale à chaque niveau et pour des conditions voisines de celles du régime permanent (cf. par. précédent). Les données du problème sont, d'une part, les grandeurs climatiques indépendantes du système étudié avec bien entendu leur évolution, et, d'autre part, la culture avec ses propres paramètres (physiques et biologiques) (fig.4). Entre cette contrainte climatique et l'adaptation biologique du couvert aux conditions ambiantes, l'ensemble des flux et des profils s'ajuste et conduit à un état particulier du système végétation-air que l'on cherche à décrire le plus complètement possible.

a) Description globale : L'advection

En toute rigueur, les grandeurs climatiques indépendantes du couvert analysé sont, en dehors des caractéristiques radiatives (rayonnement solaire et atmosphérique), celles de l'air en amont du couvert dans le sens du déplacement de la masse d'air (fig.4).

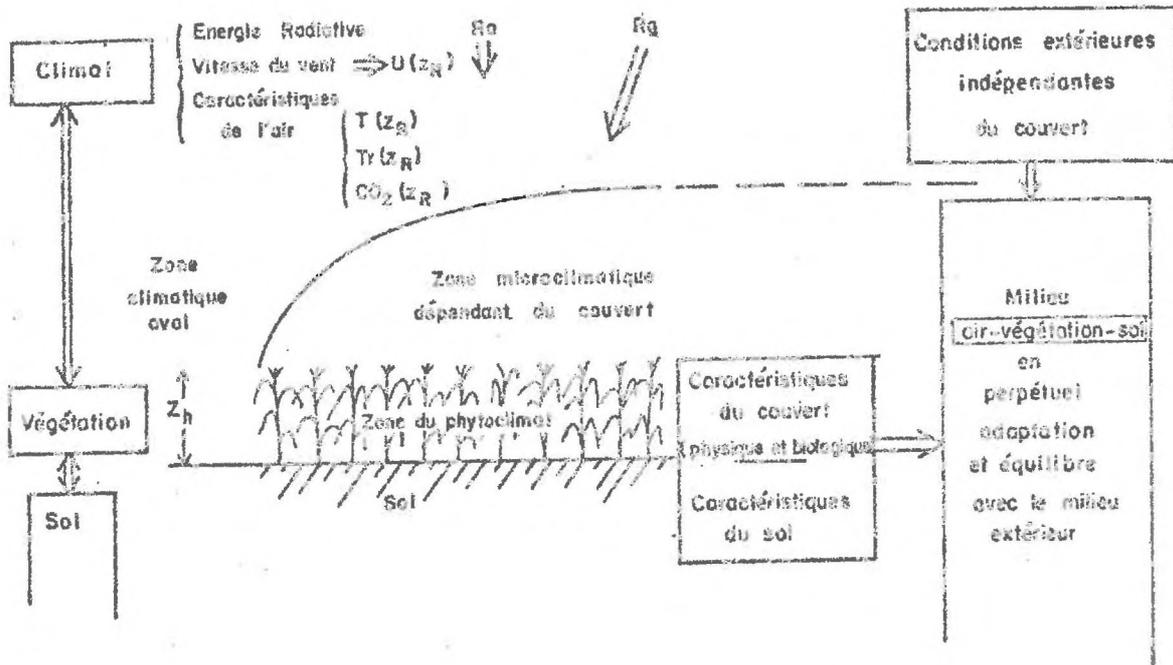


Fig.4 - Schéma descriptif du milieu air-végétation-sol et de ses interactions (R_a rayonnement atmosphérique et R_g rayonnement global).

Lorsque la masse d'air aborde le couvert, les échanges de masse et d'énergie avec le couvert entraîne des modifications progressives qui intéressent des niveaux de plus en plus élevés. C'est un problème de développement de "couche limite" (TAYLOR 1970) typiquement bidirectionnel avec flux non conservatif et évolution à tous les niveaux des grandeurs climatiques concernant la description de la masse d'air. Aussi, lorsqu'on analyse un couvert, la définition de ces grandeurs climatiques pose-t-elle une difficulté sauf si l'on se place suffisamment haut pour être hors de la couche limite (fig.5).

b) Choix du flux conservatif

Il a cependant toujours été admis que pour des dimensions horizontales de parcelles suffisantes et pour une bonne homogénéité horizontale (cf. par. 1.2.1) l'équilibre des masses d'air avec le couvert conduisait prati-

quement à des flux conservatifs (LEMON 1960, WEBB 1965, PERRIER et SEGULIN 1970). En réalité, il est simplement possible de préciser le développement d'une "couche limite" au sein de laquelle il serait possible de fixer une variation de flux inférieur à 5 % par exemple (fig.5)

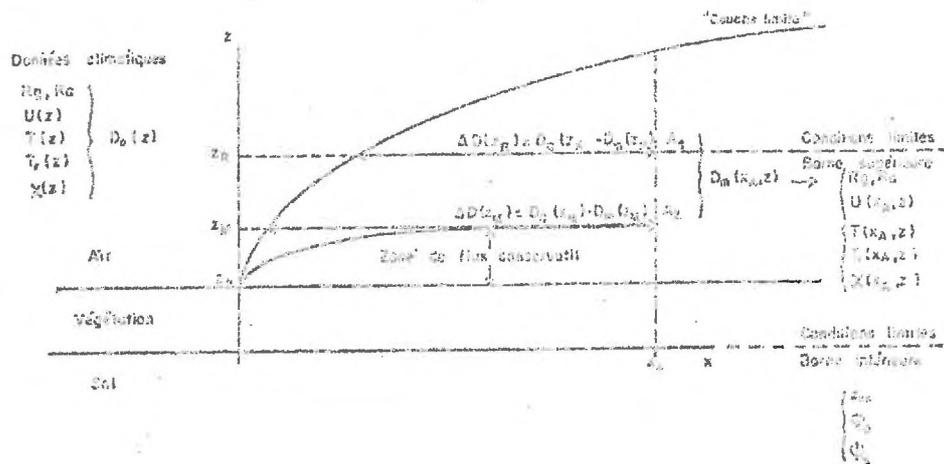


Fig.5 - Evolution des données climatiques au sein d'une "couche limite".
 $D_c(z)$ valeurs climatiques mesurées au niveau z
 $D_n(z)$ valeurs mesurées au niveau z au sein de la couche limite et pour une abscisse x_M
 ΔD écart climatique entre valeur vraie et valeur mesurée
 z_M niveau maximum de la zone à flux conservatif à mieux de 5 %
 z_R niveau de référence choisi
 z_{0s} paramètre de rugosité de la surface du sol
 ϕ_c flux conductif de chaleur à la surface du sol
 ψ_s potentiel hydrique à la surface du sol (PIER et PERRIER 1977).

D'après PIER et PERRIER (1976a), la limite z_M de la zone de flux conservatif à 5% près évoluerait en fonction de la distance x au bord d'attaque et de la rugosité z_0 de la surface selon une loi approchée :

$$z_M(x) = 0,1 \cdot z_0^{1/4} \cdot x^{3/4} \quad (I 2)$$

Rappelons que l'homogénéité horizontale à chaque niveau du couvert ainsi que les faibles vitesses de déplacement des masses d'air au sein du couvert permettent de considérer que pour des distances x petites (supérieures à quelques mètres) et dépendant bien sûr de la densité du couvert

végétal, les flux latéraux d'entraînement par la masse d'air sont négligeables.

Ainsi, on pourra considérer que la densité de flux $\phi(x, z)$ est constante au-dessus du couvert et pour z inférieur à la limite z_M :

$$\phi(x, z) = \phi(x, z_h) \quad z_h < z < z_M \quad (I 3)$$

Par contre, à l'exception des premiers mètres au voisinage du bord d'attaque, la différence de densité de flux entre deux niveaux au sein du couvert représente la source ou le puits $S(x, z)$ de la grandeur considérée pour le volume de surface unité compris entre ces deux niveaux :

$$\phi(x, z_1) - \phi(x, z_2) = S(x, z) \cdot \Delta z \quad (I 4)$$

Le choix d'une modélisation comprenant uniquement des flux verticaux se justifie donc dans la mesure où les hauteurs considérées ne dépassent pas la valeur maximum z_M définie ci-dessus compte tenu de la précision souhaitée. Cependant, pour appliquer la modélisation à partir de cette hauteur z_M , faut-il encore que les grandeurs climatiques indépendantes du couvert que l'on désire utiliser $D_c(z)$ (fig.5) puissent être représentatives des valeurs réelles $D_m(z)$ mesurées en point d'abscisse x et de côte z_M . Bien évidemment, ces valeurs climatiques n'étant atteintes quelque soit x qu'à partir du sommet de la couche limite, il existera au niveau z_M un écart systématique $\Delta D(z_M)$ fonction de l'abscisse x entre les grandeurs climatiques $D_c(z_M)$ et celles mesurées $D_m(z_M)$. Il faudra, par conséquent, minimiser cet écart pour que les valeurs climatiques puissent être utilisées comme valeurs au niveau z_M sans conduire à des valeurs de flux trop erronées.

c) Choix de la hauteur de référence z_R

A partir du modèle d'advection présenté (JULLIER et PERRIER 1976a, b) il est possible de calculer pour toute hauteur z l'erreur que l'on commettrait sur la détermination des flux et des profils, d'une part en admettant l'hypothèse de la conservativité des flux et, d'autre part, en

prenant pour données de base celles mesurées à la hauteur z au point d'abscisse x où se fait la mesure (erreur négligeable pour $z < z_M$). L'erreur sur les flux comme sur les profils calculés est d'autant plus faible que les hauteurs z sont plus petites pour des abscisses x plus grandes. Par contre, les grandeurs de base mesurées au niveau z sont d'autant plus éloignées des vraies valeurs climatiques ($\Delta D(z)$) (fig.5) que z est plus petit pour des x plus grands. Ainsi, dans le but d'une modélisation intégrale, pour laquelle les grandeurs introduites au niveau de référence doivent être significatives du climat et par conséquent indépendantes de la surface considérée, une opposition nette apparaît entre les deux choix permettant de définir le meilleur niveau de référence.

Une analyse de ce problème a conduit IPIER et PERRIER (1977) au schéma de la figure 6 qui souligne bien la décroissance des erreurs relatives sur le flux et sur l'écart maximum entre profils, vrais et calculés, en fonction de la décroissance du niveau de référence pour une même distance x au bord d'attaque (courbes en tirets). Mais ce graphique permet aussi de déterminer autour de quelle valeur (zone hachurée) doit se situer cette hauteur de référence z_R en fonction des valeurs de l'abscisse x pour que l'écart climatique soit acceptable ($< 10\%$ par exemple) ainsi que ceux sur les flux et les profils (< 2 à 5%). A titre d'exemple, pour des distances habituelles x situées autour de 100 m , (x/z_0 d'environ 10^4), une hauteur de référence d'environ 3 à 5 m permet d'obtenir pour une erreur climatique de l'ordre de $2,5\%$ des erreurs sur les flux et les profils de quelques pour cent (respectivement de l'ordre de 2% et 5%).

a) Définition des bornes du système Air-végétation

Ces considérations simplificatrices étant admises, le système étudié qui comprend la végétation et une partie de l'air qui la surmonte aura pour limite supérieure le niveau de référence z_R . A ce niveau, le climat général impose les valeurs aux différents flux radiatifs incidents. Il impose aussi, mais compte tenu du milieu environnant du système étudié, certaines caractéristiques de la masse d'air (climat local) qui seront

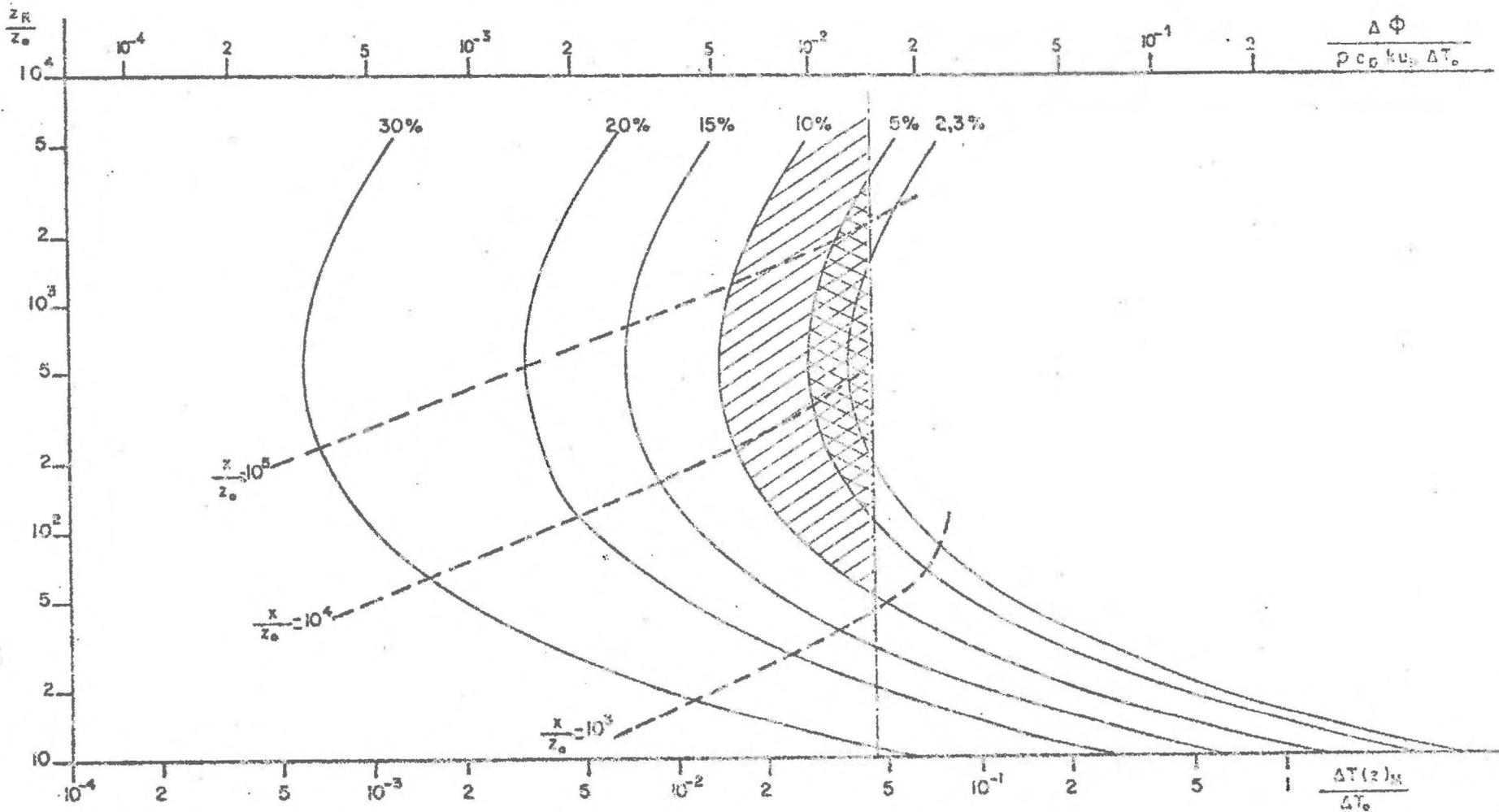


Fig.6 - Diagramme donnant en fonction du niveau de référence z_R et de la vitesse au bord d'attaque x :

- l'erreur commise sur le flux (ordonnée supérieure) - erreur par rapport à un flux de référence $\rho c_p k U_* \Delta T_0$ correspondant à l'écart ΔT_0 de conditions de surface entre la zone amont et aval (U_* vitesse de frottement)
- l'erreur maximale commise sur le profil (ordonnée inférieure) - erreur par rapport à ce même écart ΔT_0
- l'erreur ΔD_c sur les grandeurs climatiques (courbes en trait plein).

assimilées à celles mesurées au niveau de référence z_p . L'ensemble de ces valeurs constitue la liste des conditions limites de la borne supérieure du système (fig.5) ; elles fixent aussi de façon univoque, au niveau et à l'intérieur du couvert, les conditions générales qui vont intervenir pour déterminer la valeur des flux et des tensions dans la mesure où la connaissance physique du milieu sol, sous-jacent à la culture, permet de préciser ce qui se produira à sa surface. Afin de ne pas compliquer outre mesure cette première analyse, le milieu sol ne sera envisagé que comme seconde limite, indépendante de la première.

Cette borne inférieure ne joue d'ailleurs qu'un rôle secondaire sous couvert dense et très développé verticalement et pourrait donc être négligée dans une première approche des échanges (5 à 10% des échanges énergétiques et souvent moins de 5%). Cependant sous l'angle hydrique (surface très humide) le flux de chaleur latente à la surface du sol peut atteindre des valeurs plus élevées (5 à 20 %), le négliger devient alors plus difficile. Enfin, sous l'angle des échanges de gaz carbonique, le flux à la surface du sol ne peut généralement pas être négligé car il représente souvent 10 à 30 % des apports de CO_2 pour le couvert. Aussi quelques conditions simples seront choisies pour parfaire la définition du système décrit et pouvoir, en particulier pour les cultures, préciser le rôle de la borne sol dans les échanges globaux du couvert (fig.5).

Dans un troisième temps qui ne sera pas abordé ici, le milieu sol pourrait être défini comme un milieu semi-infini faisant suite au milieu air-végétation qui, par conséquent, compte tenu de ses propriétés thermiques, hydriques et biologiques (production de CO_2) évoluerait en fonction des évolutions du milieu sus-jacent (milieu air - végétation). Ainsi les seules conditions limites seraient réduites à celles de l'air, au niveau de référence, mais dans ce cas, au modèle air - végétation qui fait l'objet de ce mémoire, il faudrait adjoindre un modèle général sol.

Malheureusement, si les sous-modèles thermiques (DE VRIES 1963a, VAN WILK 1963), ainsi que les sous-modèles hydriques (PHILIP 1958) peuvent être, en première approximation, adaptés au problème, les sous-modèles biologiques (absorption de l'eau et respiration des racines, production bactérienne de CO_2 etc...) sont encore trop peu connus pour être

introduites dans un schéma plus général. En effet, le milieu sol, et particulièrement le domaine racinaire, est encore trop peu maîtrisé, malgré de très nombreux travaux entrepris depuis des décades.

Aussi, le modèle considéré comprendra-t'il seulement l'étude du milieu air et du milieu air-végétation dont les variations seront induites principalement par les variations du milieu climatique au niveau de référence z_R (premières conditions limites) et par les caractéristiques de la borne sol (niveau $z = 0$) qui déterminent les secondes conditions limites. Complémentairement, une certaine connaissance physique et biologique du milieu air-végétation sera indispensable et, en dehors de la description spatiale de la végétation qui va suivre, les études particulières du modèle souligneront au fur et à mesure de l'analyse, les paramètres physiques et biologiques qu'il sera nécessaire de considérer pour décrire complètement le système air-végétation choisi, sous l'angle ici présenté : échanges de masse (H_2O , CO_2), d'énergie (flux radiatif et de chaleur sensible) et étude des profils microclimatiques (température de l'air, température de surface, température du point de rosée, concentration en CO_2).

I.3. DESCRIPTION DES GRANDEURS NECESSAIRES A CETTE MODELISATION

L'ensemble des données de ce paragraphe sont résumées dans le diagramme de la figure 7.

I.3.1. Paramètres caractéristiques du couvert

La modélisation passe naturellement par la définition spatiale des surfaces élémentaires d'échanges et de leurs caractéristiques sous l'angle des transferts. Comme seule la variation verticale est retenue comme variation dominante, il est nécessaire de se donner les éléments de base de la description des différents niveaux horizontaux du couvert considéré.

a) Les surfaces d'échange et leur description : surface foliaire et densité de surface foliaire

L'objet de cette étude n'étant pas centré sur la modélisation du développement et des surfaces foliaires, on ne fera que rappeler certaines

descriptions déjà réalisées par de nombreux auteurs dans le but généralement de traiter le problème des échanges radiatifs au sein du couvert (PHILIP 1965, ANDERSON 1966a et b, CHARTIER 1966b, NORMAN 1971a). On citera aussi les quelques éléments majeurs utiles pour résoudre certains points cruciaux de cette analyse des échanges.

Rappelons tout d'abord qu'un couvert peut être décomposé en différentes classes d'éléments en fonction de leur nature qui joue, le plus souvent de façon très marquée, sur les échanges. Les éléments principaux sont constitués par :

- . les feuilles, éléments de faible épaisseur (quelques dixièmes de millimètre) et de grande surface (plusieurs cm^2 à quelques dm^2) qui jouent un rôle dominant sur les échanges d'eau et de gaz carbonique ; ces éléments, par ailleurs, représentent le plus souvent 80 à 90 % des surfaces d'échange,
- . les tiges ou les troncs, éléments cylindriques de diamètre très variable qui très souvent présentent peu ou très peu d'échange d'eau et de gaz carbonique et une surface développée ne dépassant guère 10 % des surfaces totales,
- . enfin, les organes de reproduction (fleurs, épis, épillets ...) qui généralement ne seront pas pris en considération dans cette étude sauf quand des effets non négligeables apparaissent en particulier du fait des surfaces momentanées non négligeables qu'ils représentent.

Les classes d'éléments

Chaque classe d'éléments sera caractérisée niveau par niveau par (tableau I) :

- . le nombre des éléments rapportés à l'unité de volume
- . les dimensions géométriques moyennes de ces éléments
- . l'orientation spatiale de chacun de ces éléments .

Il est nécessaire de souligner que certains éléments ne peuvent pas toujours être définis simplement car ils peuvent présenter une dimension très grande dans une direction donnée : c'est le cas, par exemple,

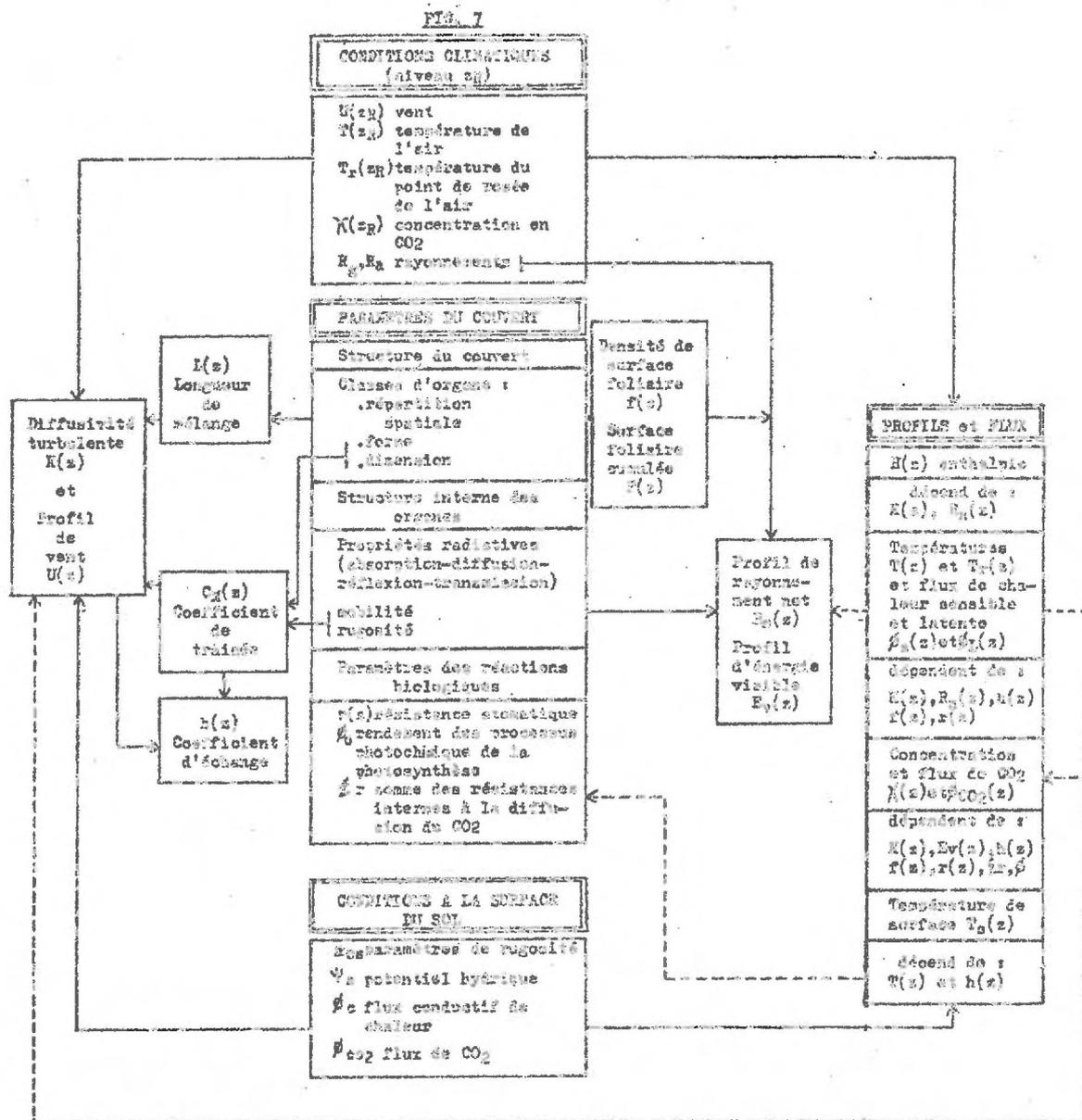


Fig. 7 - Diagramme général des actions et interactions entre conditions limites du modèle, paramètres du couvert et flux et profils recherchés.

des tiges ou des feuilles très longues (cas des graminées). Ces éléments se prolongent généralement dans différents niveaux et doivent dans la mesure du possible être ramenés à une série d'éléments propres à chaque niveau (tronçonnage virtuel des tiges par exemple). Cette transformation artificielle du milieu s'effectuera sans difficulté chaque fois qu'elle n'introduit pas de perturbations notables au niveau de l'analyse, en particulier sous l'angle des échanges convectifs pour lesquels les dimensions et la forme interviennent. Dans le cas des tiges, la dimension caractéristique ou diamètre ne se trouvant pas modifiée, aucune difficulté ne se présente. Pour les feuilles, un tel découpage est aussi possible, en fonction des portions d'inclinaisons différentes, dans la mesure où les longueurs des morceaux de feuilles ainsi obtenus ne diffèrent pas trop de leur largeur (2 à 3 fois au maximum) (fig.8). En effet, toujours sous l'angle aérodynamique, dans les conditions naturelles où le vent peut souffler dans n'importe quelle direction, la dimension sous le vent d'une feuille ne peut pas, en moyenne pour une couche, sauf agencement très particulier, dépasser deux ou trois fois sa plus petite dimension (largeur l_1). Ainsi, une certaine concordance existe entre la découpe artificielle des feuilles (largeur l_1 et longueur 2 à 3 l_1) et la dimension caractéristique L_0 (GATES et al 1963) à prendre généralement en considération pour traduire les échanges au niveau des feuilles (cf. chap. II et III) :

$$1/L_0 = 1/l_1 + 1/3.l_1 \quad (L_0 \sim 0,75 l_1)$$

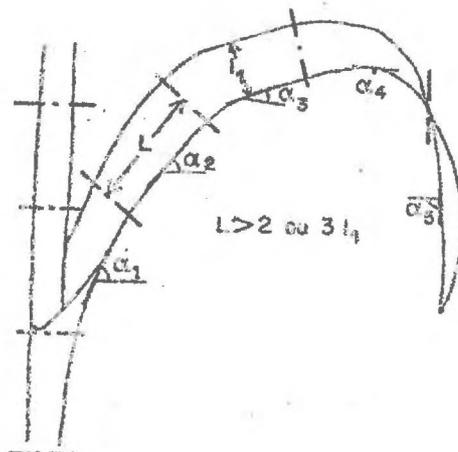


Fig. 8 - Illustration de la segmentation d'une feuille de maïs en fonction de diverses inclinaisons (l_1 largeur de la feuille, L longueur moyenne des éléments, α_1 angle d'inclinaison).

TABLEAU I : Répartition des densités moyennes de surface foliaire (m² de feuille/m³) pour chaque tranche et pour chaque classe d'inclinaison (Maïs F7EP1 - LA MINIERE)

| Inclinaison Tranche considérée | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | Total |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 0 - 30 | 0,013 | 0,016 | 0,037 | 0,011 | 0,003 | 0,006 | 0,005 | 0,008 | 0,010 | 0,109 |
| 30 - 60 | 0,035 | 0,040 | 0,010 | 0,037 | 0,055 | 0,070 | 0,047 | 0,010 | 0,028 | 0,332 |
| 60 - 90 | 0,042 | 0,016 | 0,021 | 0,037 | 0,103 | 0,136 | 0,082 | 0,068 | 0,042 | 0,547 |
| 90 - 120 | 0,062 | 0,040 | 0,026 | 0,101 | 0,041 | 0,159 | 0,103 | 0,022 | 0,024 | 0,578 |
| 120 - 150 | 0,107 | 0,041 | 0,106 | 0,083 | 0,036 | 0,118 | 0,094 | 0,051 | 0,008 | 0,644 |
| 150 - 180 | 0,067 | 0,057 | 0,113 | 0,046 | 0,127 | 0,135 | 0,074 | 0,056 | 0,021 | 0,696 |
| 180 - 200 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,033 |
| T O T A L | 0,329 | 0,212 | 0,316 | 0,319 | 0,371 | 0,632 | 0,409 | 0,217 | 0,134 | 2,939 |

- La densité de surface foliaire (fig.9)

Le plus souvent, comme on l'a dit, la très grande surface développée des feuilles par rapport à celle des autres organes, permet sous l'angle des échanges de masse ou d'énergie, de réduire l'ensemble de la description précédente au seul facteur de densité de surface foliaire $f(z)$ ou surface de feuilles par unité de volume. A tout niveau, on écrit alors que les échanges élémentaires $\Delta\phi(z)$ pour une tranche Δz seront toujours proportionnels à ce terme de densité de surface foliaire et à la densité de flux $\phi_e(z)$, si l'on ne suppose pas au sein de la tranche une hétérogénéité biologique (par exemple, la présence de feuilles d'âges différents) :

$$\Delta\phi(z) = \phi_e(z) \cdot f(z) \cdot \Delta z$$

- La surface foliaire (fig.9)

La surface foliaire $F(z)$, ou surface totale comprise entre le sommet du couvert z_h et le niveau z considéré :

$$F(z) = \int_z^{z_h} f(z) \cdot dz \quad (I 5)$$

est aussi une donnée souvent utile pour caractériser globalement la tranche supérieure (z à z_h) d'un couvert ou le couvert tout entier (tranche $0 - z_h$) ; dans ce cas on obtient le terme de surface foliaire totale d'un couvert ou Leaf Area Index :

$$L.A.I. = \int_{z=0}^{z_h} f(z) \cdot dz \quad (I 5bis)$$

On ne reviendra pas sur ces deux paramètres de structure qui seront le plus souvent utilisés dans la modélisation du couvert ; ils serviront de paramètres de base chaque fois que le rôle de cette structure voudra être souligné et analysé (fig.7). Cependant, cette structure, considérée comme une donnée du problème à un instant particulier, est évidemment une caractéristique variable dans le temps, puisqu'elle reflète sur une période de plusieurs jours le développement biologique de la culture

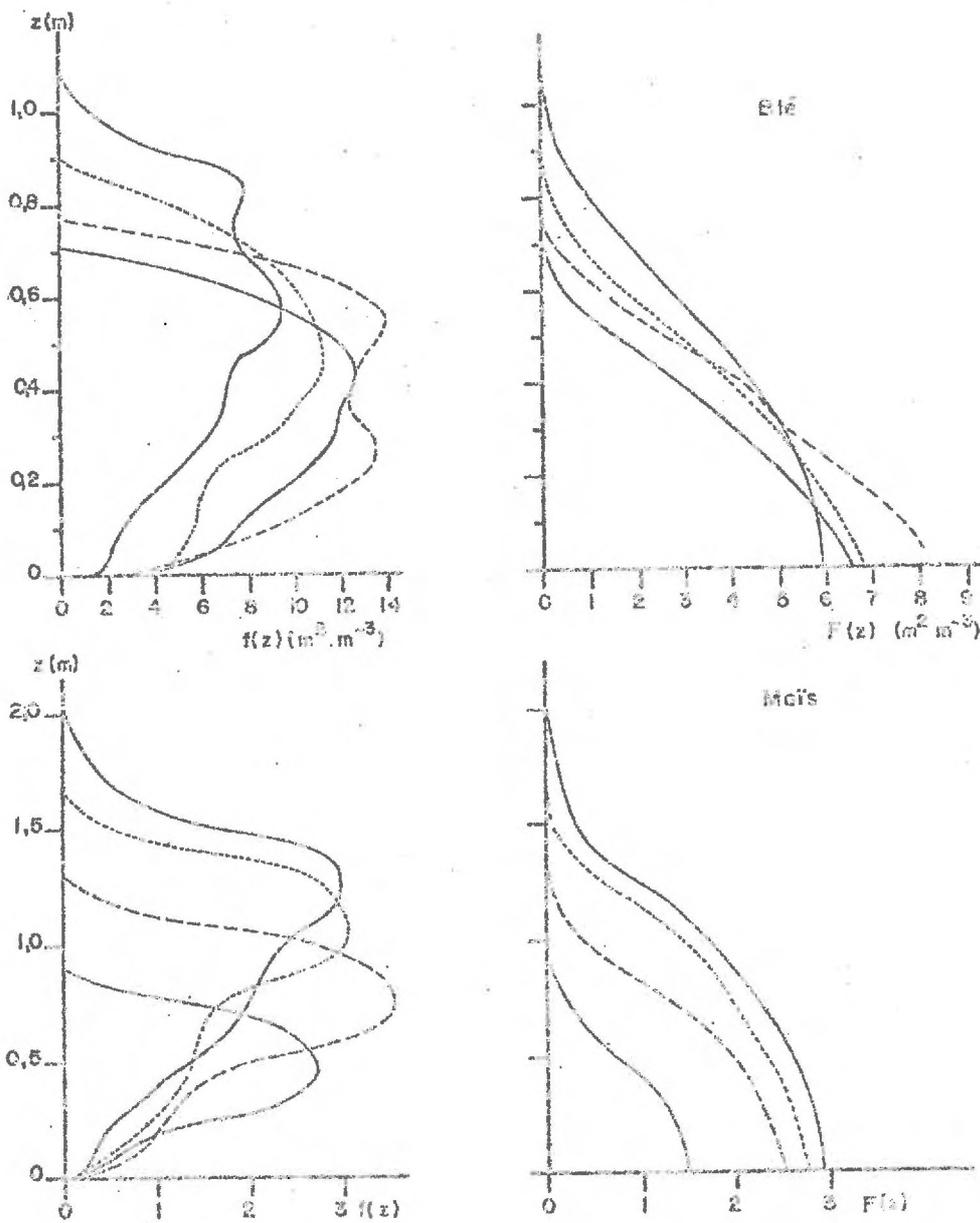


Fig.9 - Evolution en fonction du temps des densités de surface foliaire et des surfaces foliaires cumulées pour un blé (SUNGENDORF - CANNIERA) et un maïs (LA MINIERE - VERSAILLES)

| | | | | | | | |
|-----|---|---|----------|------|---|---|---------|
| Blé | { | X | 15.10.73 | Maïs | { | X | 17.7.72 |
| | | O | 18.10.73 | | | O | 24.7.72 |
| | | Δ | 25.10.73 | | | Δ | 3.8.72 |
| | | □ | 9.11.73 | | | □ | 21.9.72 |

qui résulte d'une intégration complexe, réalisée par les plantes considérées en fonction de leur code génétique, de l'ensemble de tous les facteurs du milieu et de certaines fonctions qui en résultent. Or ces facteurs (température, humidité ...) et certaines de ces fonctions (photosynthèse - évaporation) sont précisément les grandeurs qu'on cherche à déterminer à un instant donné ; il y a donc interaction dans le temps entre certaines données du modèle et les grandeurs qui en découlent. Le modèle ne pourra donc être extrapolé dans le temps que si ces nouvelles liaisons d'ordre biologique sont connues.

b) Les propriétés physiques et biologiques des surfaces

Pour des raisons de simplification, ces quelques considérations seront précisées au niveau des feuilles, mais elles s'appliquent aux différentes classes d'éléments (par. précédent).

La structure interne et superficielle des feuilles ainsi que leur mode de fixation (flexibilité et mobilité de la feuille) vont intervenir, d'une part, pour fixer les valeurs des coefficients de traînée C_e (cf. II, 3) qui conduisent au coefficient moyen $C_M(z)$ pour une couche et, d'autre part, pour déterminer les propriétés radiatives des feuilles (absorption, diffusion, réflexion, transmission). Ces propriétés radiatives seront introduites de façon globale à travers, d'une part, les coefficients α_0 et β_0 qui déterminent le profil de rayonnement net ou bilan net d'énergie radiative (cf. III 1.6), et, d'autre part α_1 et α_2 (cf. IV 2) qui fixent les profils d'énergie radiative visible sous forme diffuse et directe et dont l'absorption par la feuille est un des facteurs dominants de la photosynthèse.

Les caractéristiques biologiques de la feuille fixent aussi un certain nombre d'autres paramètres importants pour la photosynthèse (cf. chap. IV), tels que les résistances internes à la diffusion du gaz carbonique CO_2 r_i , le rendement ϕ_0 des processus photochimiques de la photosynthèse, et d'autres paramètres concernant la respiration et la photosynthèse maximale (Fig. 7).

Enfin, la structure des stomates (pores à la surface des feuilles)

leur répartition et leur degré d'ouverture, fonction d'une régulation d'ordre biologique, conduit évidemment à des variations considérables dans les échanges d'eau et de gaz carbonique. Cette fonction de première importance pour l'analyse des transferts, globalement décrite sous le nom de régulation stomatique, sera traduite par un terme de résistance stomatique (cf. III, 1.4.) et par un paramètre $r(z)$ correspondant à une valeur moyenne pour une couche de végétation.

1.3.2 . Grandeurs caractéristiques aux bornes

Les valeurs, à la borne supérieure ou niveau de référence z_R dans l'air (cf. I.2.4c) et à la borne inférieure sol, se limitent au nombre minimal de grandeurs nécessaires pour résoudre les équations établies aux chapitres suivants, concernant les trois grands types de transfert : mécanique (ch.II), énergétique (ch.III) et de CO_2 (ch. IV).

1.3.2.1. Grandeurs aux bornes relatives au transfert mécanique

Compte tenu des hypothèses admissibles (cf. I.2.), surface plane, homogénéité horizontale, régime établi, et flux conservatif qui nécessite une analyse faite à une distance suffisante du bord d'attaque de la culture, le problème unidirectionnel du transfert mécanique se résout en une analyse de la turbulence au niveau de référence et à une des grandeurs résultantes, la composante horizontale de la vitesse moyenne $U(z)$.

Les données de base ou conditions limites sont alors uniquement celles des caractéristiques de la turbulence au niveau de référence z_R (taux de turbulence, courbe de répartition spectrale), celles de la vitesse du vent aux deux bornes du système ($z = 0$ et $z = z_R$), avec en plus, la valeur de la rugosité z_{0g} à la surface du sol ($z = 0$) : la structure de la turbulence qu'on ne fera qu'évoquer (ch.II), n'intervient pas directement dans cette première étude, seules les trois conditions $U(z_R), U(0) = 0, z_{0g}$ serviront, compte tenu de la structure de la végétation et de ses propriétés mécaniques (coefficient de traînée des feuilles par exemple), à résoudre le problème mécanique des couverts (chap. II).

a) Au niveau de référence (z_R), on ne mesurera donc que la vitesse

horizontale moyenne du vent $U(z_R)$ supposée pratiquement indépendante du couvert dont on analyse le comportement et indépendante du milieu extérieur au champ considéré (caractéristiques de la région et de son environnement, cf. I.2.4.).

b) Au niveau du sol la valeur de la vitesse du vent $U(z=0)$ est naturellement nulle. La surface du sol se caractérisera simplement par une certaine rugosité z_{0s} définie par ses propriétés géométriques.

I.3.2.2. Grandeurs aux bornes relatives au transfert d'énergie

Le bilan d'énergie est plus complexe à formuler puisqu'il se compose de nombreux termes :

- le bilan des énergies radiatives
- le bilan des flux de chaleur sensible
- le bilan des flux de chaleur latente due à la vaporisation ou à la condensation de l'eau au niveau de toutes les surfaces
- le bilan des énergies stockées.

Pour établir ces bilans (chap. III) les grandeurs nécessaires aux bornes du système sont de nature radiative, thermique et hydrique.

a) Borne supérieure ou niveau z_R

Comme précédemment, les données au niveau de référence seront essentiellement des données de type climatique ou mésoclimatique, quasi indépendantes de la surface analysée. Ces données sont, d'une part, le bilan radiatif, R_a , et d'autre part, une forme de l'enthalpie de l'air, H_a

- Le bilan radiatif ou rayonnement net dépend essentiellement de l'énergie radiative incidente d'origine solaire et des propriétés d'absorption et de réflexion du couvert, mais aussi, secondairement, du bilan radiatif de grandes longueurs d'onde entre le couvert et la voûte céleste. Ce terme n'est donc indépendant du couvert qu'en première approximation puisqu'il dépend aussi de la température moyenne de surface du couvert qui résulte du bilan d'énergie global du couvert :

$$R_n = (1 - a)R_g + \epsilon.R_a - \epsilon\sigma T_s^4 \quad (16)$$

- a = albedo du couvert ou coefficient de réflexion diffusion
 R_G = rayonnement global de courtes longueurs d'onde ($< 3 \mu m$)
 R_a = rayonnement atmosphérique (grandes longueurs d'onde $> 3 \mu m$)
 ϵ = émissivité du couvert
 T_s = température de surface du couvert
 σ = constante de Stefan Boltzman

En réalité, il est possible d'introduire le rayonnement net R_{n*} de type purement climatique et réellement indépendant du bilan d'énergie du couvert (PERRIER 1975a) :

$$R_{n*} = (1 - a)R_G + \epsilon.R_a - \epsilon\sigma T(z_R)^4 \quad (I \text{ bis})$$

$T(z_R)$ = température de l'air au niveau de référence (donnée climatique).

Cependant on utilisera toujours par la suite et pour des raisons de simplicité, la valeur du rayonnement net réel qu'il est possible de mesurer directement dans toute expérience (cf. par. I.4.2.2a), mais qui par nature intégrera l'effet du bilan thermique du couvert sur le bilan radiatif net. Au cours de l'analyse qui va suivre, si l'on considère le bilan radiatif donné par R_n plutôt que le terme du bilan radiatif climatique indépendant du couvert, R_n (terme dont la différence par rapport à R_a n'atteint généralement que quelques pour cent (fig.10), on introduit naturellement une certaine imprécision dans toute comparaison éventuelle de résultats. En effet, pour une même valeur de rayonnement net R_n , des résultats différents dans le bilan d'énergie (flux de chaleur sensible et latente différents) ne proviendront pas, en réalité, d'un rayonnement incident climatique identique. Cette erreur éventuelle d'interprétation peut d'ailleurs être évitée en calculant à posteriori, à partir des valeurs de température du couvert données par l'analyse, la vraie valeur du rayonnement net climatique qui avait conduit à l'ensemble des équilibres et valeurs obtenus (cf. chap. III),

- l'enthalpie de l'air H_a au niveau de référence, s'écrira :

$$H_a = H(z_R) = L.C(z_R) + \rho.c_p.T(z_R) \quad (I 7)$$

avec L = chaleur latente de vaporisation de l'eau,

ρ = masse volumique de l'air

et c_p = chaleur massique de l'air.

Cette relation est définie par la connaissance de la température de l'air $T(z_R)$ au niveau de référence et par celle de la concentration en vapeur d'eau $C(z_R)$ ou de la pression partielle de vapeur d'eau p_a ou encore de la température du point de rosée de l'air $T_r(z_R)$:

$$p_a = P(T_r) = \frac{M}{R \cdot T(z_R)} \cdot C(z_R)$$

avec M la masse molaire de l'eau et R la constante des gaz parfaits.

Les trois conditions limites énergétiques au niveau de référence z_R , utiles pour définir la borne supérieure du domaine, sont donc R_n , $T(z_R)$, $C(z_R)$.

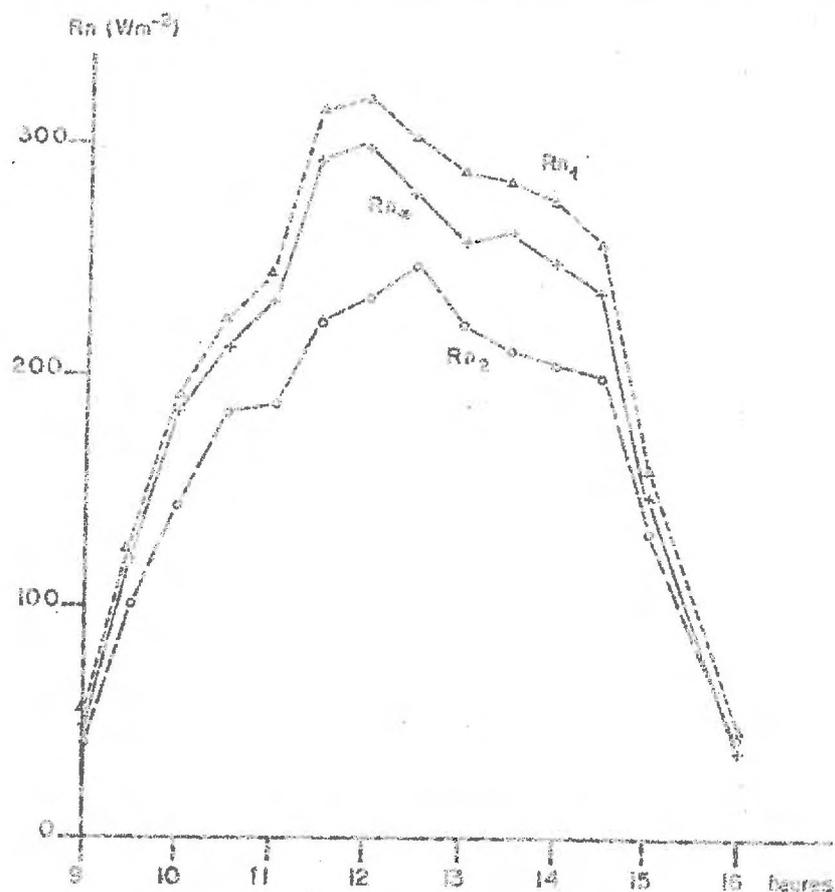


Fig. 10. - Comparaison entre l'évolution diurne du rayonnement net climatique R_{ncl} d'un sol nu et le rayonnement net vrai du même sol humide R_{n1} et sec R_{n2} . L'écart entre ces trois grandeurs est dû aux écarts entre les températures de surface résultant du bilan d'énergie (une correction due à la différence d'albedo ayant été faite).

b) Borne inférieure au niveau de la surface du sol

Les trois grandeurs précédentes n'y sont plus indépendantes puisque reliées (cf. chap. III.2.2.) à deux paramètres de nature différente et qui constitueront les deux conditions limites imposées au système étudié au niveau $z = 0$:

- la densité de flux conductif ϕ_0 à la surface du sol qui exprime l'énergie gagnée ou perdue à la borne inférieure du système,
- le potentiel hydrique à la surface du sol ψ_0 qui résulte du bilan hydrique du milieu sol et impose à la surface une relation entre la température de l'air à la surface et la pression partielle de vapeur d'eau à la surface (PERRIER 1975b et d).

1.3.2.3. Grandeurs aux bornes relatives au transfert de CO₂

La photosynthèse des couverts est très largement dominée par les potentialités photosynthétiques des feuilles dont une paramétrisation de type physique a été fournie par de nombreux auteurs (RABELOVITCH 1951, MORTELET 1963a, CHARRIER 1966a, etc...) (cf. IV). Dans cette analyse physique du milieu extérieur à la plante, le but poursuivi au niveau photosynthétique est simplement d'analyser le rôle des facteurs physiques externes sur la photosynthèse locale ou totale du couvert, compte tenu de ses potentialités supposées connues et, par conséquent, de déterminer les flux de gaz carbonique (photosynthèse nette du végétal) et le profil de concentration en gaz carbonique qui s'établissent entre le sol et le niveau de référence z_R .

Les conditions limites imposées au système sont alors simples :

- d'une part, la concentration en gaz carbonique de l'air $\chi(z_R)$ au niveau de référence z_R , valeur qui définit la caractéristique climatique de concentration en gaz carbonique de la masse d'air,
- d'autre part, la source de CO₂ à la surface du sol, $\phi_{CO_2}(z = 0)$ qui provient de l'activité des microorganismes du sol et, pour une petite part, de la respiration de la partie souterraine de la plante : son système racinaire.

I.4. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Dans le cadre de ce travail, les buts d'un dispositif expérimental placé dans les conditions requises pour satisfaire aux hypothèses de départ sont, d'une part, d'apporter les éléments de base nécessaires à l'étude du schéma de modélisation qui vient d'être tracé et, d'autre part, d'avoir suffisamment d'éléments de mesures pour tester au mieux dans ces diverses parties la modélisation des échanges de masse et d'énergie des couverts végétaux. Ceci conduit à déterminer non seulement les grandeurs nécessaires à la définition des conditions limites (cf. par. I.3.2.), mais aussi l'ensemble des flux et des profils microclimatiques dont les valeurs pourront servir à vérifier les calculs et, bien entendu, l'ensemble des caractéristiques qui sont nécessaires pour définir les propriétés physiques et biologiques du couvert.

En réalité, le dispositif général de La Minière (Bioclimatologie, C.N.R.A.) dans lequel s'insère ce travail et qui fut élaboré à partir d'études théoriques préliminaires concernant l'assimilation nette des feuilles et d'une culture (CHARTIER 1966a et 1970a) et les échanges turbulents de masse et d'énergie (PERRIER 1967), poursuit depuis 1969 des objectifs qui débordent très largement ce cadre ; une présentation très générale de ce dispositif a été réalisée par CHARTIER, PERRIER et VERBRUGGHE (1971).

I.4.1. Les objectifs généraux du dispositif

Il ne sera rappelé ici que les objectifs du dispositif qui sont orientés vers le but poursuivi : étude et modélisation des échanges de masse et d'énergie.

a) Objectif d'ordre méthodologique

Le choix fondamental a été celui d'une expérimentation dans les conditions naturelles, sur champ de grande culture en région dégagée de plaine afin de satisfaire certaines hypothèses de base concernant les échanges (surface plane, homogénéité horizontale, régime établi...). Si l'étude des échanges en conditions contrôlées, soit en vaste phytotron, soit par modélisation en soufflerie, n'a pas été retenue de prime abord, c'est d'une part à cause de la très grande difficulté à simuler

l'ensemble des facteurs de l'environnement naturel, ainsi que leur variation et fluctuation et, d'autre part, de la quasi impossibilité de respecter sur modèle réduit la similitude pour l'ensemble des échanges concernant un couvert végétal : quantité de mouvement, chaleur, masse et radiation. A cette difficulté physique se joint une quasi impossibilité à simuler le milieu biologique et ses réactions en fonction du milieu. Ainsi, le choix d'une expérimentation dans les conditions naturelles, quel que soit le type de temps et pendant l'ensemble de la croissance d'un couvert, devait orienter d'une façon précise le choix des méthodes, et celui des techniques d'investigation.

La complexité des réactions biologiques et des interactions multiples entre la plante et l'ensemble des facteurs du milieu nécessite aussi de concentrer, en un même lieu et pendant la même période de temps, l'ensemble des investigations, afin d'avoir la possibilité d'obtenir pour chaque analyse la panoplie des grandeurs et paramètres qui interviennent, tant au niveau physique que biologique. Ce travail, nécessairement d'équipe, ne peut être réalisé qu'en regroupant le maximum de personnes et de moyens autour des problèmes tant physiques que biologiques qui concernent le couvert étudié.

Devant la difficulté de certaines mesures biologiques et physiques du milieu, dans les conditions naturelles, un dernier objectif a été de concentrer autour d'une même grandeur à mesurer le maximum de techniques et de méthodes afin d'avoir confrontation et recoupement des résultats en vue d'asseoir plus solidement nos bases expérimentales. Cet aspect du dispositif expérimental représente évidemment une part importante du travail effectué (Techniques de mesures des facteurs physiques de la Biosphère - INRA ed. Hallaire 1970).

b) Détermination des profils microclimatiques

Dans les conditions naturelles, toute surface échange au moins de l'énergie radiative et convective ; elle se comporte donc comme un échangeur. Il est bien connu qu'au voisinage de la surface, il existe toujours une zone de perturbation appelée couche limite propre à la surface au sein de laquelle les grandeurs concernées par le type d'échange

varient. Les variations maximales se trouvent donc toujours au voisinage des surfaces. (PERRIER 1973a et b).

La végétation n'est rien d'autre qu'un échangeur complexe qui modifie donc l'ensemble des caractéristiques climatiques de façon prononcée au sein du couvert et de façon moindre au-dessus du couvert dans la couche limite qu'il développe (fig.11). Ainsi, l'interception du rayonnement solaire, le freinage mécanique des mouvements de l'air, les échanges de chaleur sensible et la transpiration du feuillage sont autant de modifications qui vont agir sur les profils microclimatiques en général.

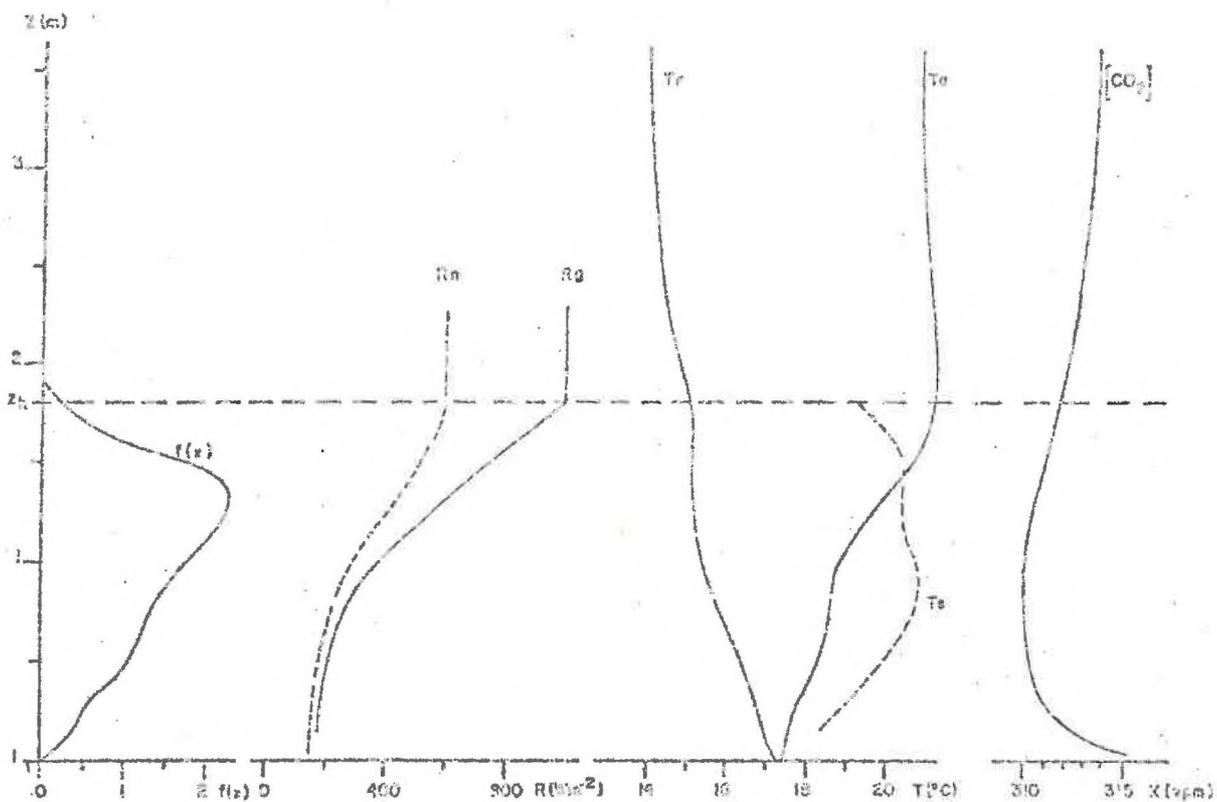


Fig.11. - Exemple de profils climatiques pour une culture de maïs de densité de surface foliaire $f(z)$.

R_n rayonnement net.

R_g rayonnement global.

T_a et T_d , la température de l'air et de son point de rosée.

T_l la température des feuilles.

X la concentration en CO_2 .

La mesure de l'ensemble de ces profils microclimatiques et leur description ou prédiction dépassent donc le cadre de l'analyse instantanée des échanges et de l'assimilation nette d'un couvert puisque les méristèmes de la plante sont sensibles à ces profils et que l'ensemble du développement futur du couvert et de ses caractéristiques biologiques en dépend.

Enfin, cette caractérisation du microclimat est une donnée écologique de base de première importance, puisqu'elle conditionne la vie et le développement de l'ensemble des macro et microorganismes qui peuvent vivre en liaison avec le couvert. C'est pourquoi, la mesure et la connaissance des profils de vitesse du vent et de turbulence, de rayonnement (net, visible, proche infra-rouge, etc...) de température de l'air et des surfaces, et de concentration en vapeur d'eau et en gaz carbonique, ont été parmi les objectifs expérimentaux principaux dont la réalisation progressive depuis 1969 à La Minière a fait l'objet de mises au point et de publications ; à présent, leur modélisation est l'objet de nos travaux et sera décrite aux différents chapitres.

c) Évapotranspiration ou flux de chaleur latente

L'eau est un facteur essentiel de la production, qui devient un facteur dominant lorsque les quantités présentes (réserve en eau du sol, pluie, irrigation) sont faibles devant la demande climatique : régions sèches. Elle prend de plus en plus, même en région plus humide, une importance croissante, car son utilisation à des fins agricoles est de plus en plus concurrencée par les besoins industriels et ménagers.

En dehors du problème très certainement de plus en plus crucial de l'efficacité de l'eau, l'eau et sa consommation par le couvert végétal interviennent de façon complexe et variée sur la physiologie de la plante. Rappelons principalement que : son transfert en phase liquide, du sol vers les feuilles, assure l'apport des matières minérales nécessaires aux réactions physiologiques qui, d'autre part, dépendent toutes plus ou moins de la teneur en eau des tissus (bilan entre l'absorption racinaire et la transpiration). De plus, cette teneur en eau des tissus, et principalement la variation de turgescence des divers types de cellules, est

un des facteurs qui détermine l'ouverture et la fermeture de l'ostiole des stomates. La variation d'ouverture des stomates est le facteur biologique de régulation de la transpiration (régulation stomatique) qui va aussi influencer les échanges de gaz carbonique, c'est-à-dire, l'assimilation de la plante. Enfin, la vaporisation de l'eau au sein des feuilles est le terme énergétique qui, compte tenu de l'énergie radiative et de l'ouverture des stomates, va déterminer la température de surface des organes.

L'étude entreprise ici étant purement physique, ce n'est pas le schéma général du transfert de l'eau depuis le sol jusqu'à l'atmosphère qui nous intéresse, mais uniquement la vaporisation de l'eau et son transfert sous forme de vapeur depuis les cavités sous-stomatiques, où l'air se trouve pratiquement saturé, jusqu'au milieu aérien environnant. La détermination de ces transferts en fonction des caractéristiques climatiques, de la structure de la végétation et de la régulation stomatique, est le point essentiel de la compréhension et de l'interprétation des valeurs d'évapotranspiration mesurées ou à prévoir. Ces valeurs permettent aussi de tester globalement le modèle à l'échelle du couvert (flux de chaleur latente ou évapotranspiration) et d'interpréter l'impact de la régulation biologique au niveau des résistances stomatiques sur l'évapotranspiration, en fonction du profil de résistance stomatique $r(z)$ (cf. par. I.4.2.1 b) et de la répartition des densités de surface foliaire pour des conditions climatiques identiques. Une analyse plus simple, à partir du terme plus vague de résistance moyenne du couvert r_c (PERRIER 1975c) qui se superpose aux résistances de transfert à travers la masse végétale r_0 , puis dans l'air au-dessus du couvert r_a , sera aussi envisagée (cf. par. III 6 et 7).

Une fois de plus, le rôle biologique des régulations stomatiques sur les transferts de masse et d'énergie est mis en évidence et sera un des points qui dominera l'exploitation du modèle. Toutefois, on ne cherchera pas à traiter le déterminisme de cette régulation, bien qu'un certain nombre de liens avec l'énergie radiative incidente et avec le facteur hydrique soient connus (DJAVANCHER 1970, BERGER 1973, LEMON et al. 1973) ; dans ce cas, un système par itération à partir d'un profil probable pourrait d'ailleurs être adapté pour définir le meilleur profil stomatique du couvert, compte tenu de ce type de liens.

d) Photosynthèse nette.

L'absorption de gaz carbonique par le couvert représente à chaque instant l'assimilation nette du couvert et par conséquent, grâce à la synthèse chlorophyllienne, une production instantanée (10 à 15 mg) de matière sèche. La connaissance de ce terme de production jointe à celle de l'évapotranspiration et du microclimat du couvert permet de définir les conditions de production d'un couvert et d'en rechercher une certaine optimisation, de même qu'une meilleure efficacité de l'eau.

Les mesures entreprises concernent, d'une part, les mesures en plein champ du flux de CO_2 (PERRIER et al. 1976) et, d'autre part, des mesures sur la réponse photosynthétique des feuilles en chambre d'assimilation (CHARTIER 1975). Le schéma utilisé (cf. chap. IV) pour la modélisation permet donc, en fonction des propriétés photosynthétiques des feuilles, d'analyser la photosynthèse -comme pour l'analyse des transferts d'eau (paragraphe précédent)- en fonction du profil de résistances stomatiques $r(z)$ et de la répartition des densités de surface foliaire pour les mêmes données climatiques. Une analyse plus schématique à partir de la notion de résistance stomatique moyenne du couvert r_c peut aussi être faite. Les valeurs de résistances stomatiques, à chaque niveau, sont évidemment identiques à celles fixées pour l'évapotranspiration à un coefficient près, fonction du rapport entre les diffusions de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

1.4.2. Les investigations expérimentales.

Afin de réaliser ces différents objectifs, l'ensemble des investigations a donc été concentré sur le dispositif de La Minière et principalement sur une parcelle (1 ha), dont les réserves en eau du sol peuvent être maintenues à leur maximum grâce à une irrigation nocturne par aspersion commandée automatiquement par un évapotranspiromètre. Il est nécessaire de séparer les investigations de type biologique qui ne sont généralement pas automatisées, souvent longues et fastidieuses et dont la fréquence et le nombre de répétitions sont naturellement faibles, des investigations de type physique qui forment un ensemble unique géré par une acquisition à bandes perforées et magnétiques.

1.4.2.1. Investigations d'ordre biologique

Les mesures ont porté uniquement sur deux types de culture : un maïs (La Minière) et un blé (Candarra).

a) Mesures des caractéristiques du couvert

Ces mesures font essentiellement appel à des méthodes destructrices d'échantillonnages qui consistent, selon une distribution au hasard qui ne perturbe pas les zones homogènes de mesure, à prélever en plusieurs points sur une surface donnée l'ensemble des organes du couvert, tranche par tranche (épaisseur de 10 à 40 cm) et de les classer d'une part, par type (organe de reproduction, tige, feuille) et, pour les feuilles, par angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale (CHARTIER 1970a). Ce type de prélèvement associé à une mesure des surfaces des organes pour chaque classe conduit à donner :

- la densité de surface des tiges (section droite)
- la densité de surface des organes reproducteurs (section droite)
- la densité de surface des feuilles (une seule face)
- la densité de surface des feuilles pour chaque classe d'inclinaison (neuf classes de 10 degrés - cf. tableau p)
- les dimensions moyennes des feuilles dans chaque tranche.

La figure 12 donne une illustration de ces résultats pour une culture de blé et de maïs. Il est inutile de rappeler le rôle primordial de ces termes dans la modélisation des échanges (cf. chap. II, III, IV).

D'autres méthodes sont utilisées pour définir ces densités de surface foliaire, je ne ferai que citer les photographies hémisphériques (BONHOMME 1973) et m'étendrai un peu plus sur une technique de détermination directe par photographie de la projection horizontale de la surface foliaire, mise au point par nous-mêmes et permettant une meilleure précision sous éclairage diffus, pour éviter les taches d'ombre et de soleil, et en présence d'un grand contraste entre la surface du sol (blanchie artificiellement avec du plâtre) et l'ensemble du végétal (recouvert par pulvérisation d'une peinture noire mate) une photographie du couvert avec film très sensible et contrasté, petit angle d'ouverture, et hauteur assez grande, donne directement une mesure de la proportion de surface de végétal par rapport au sol.

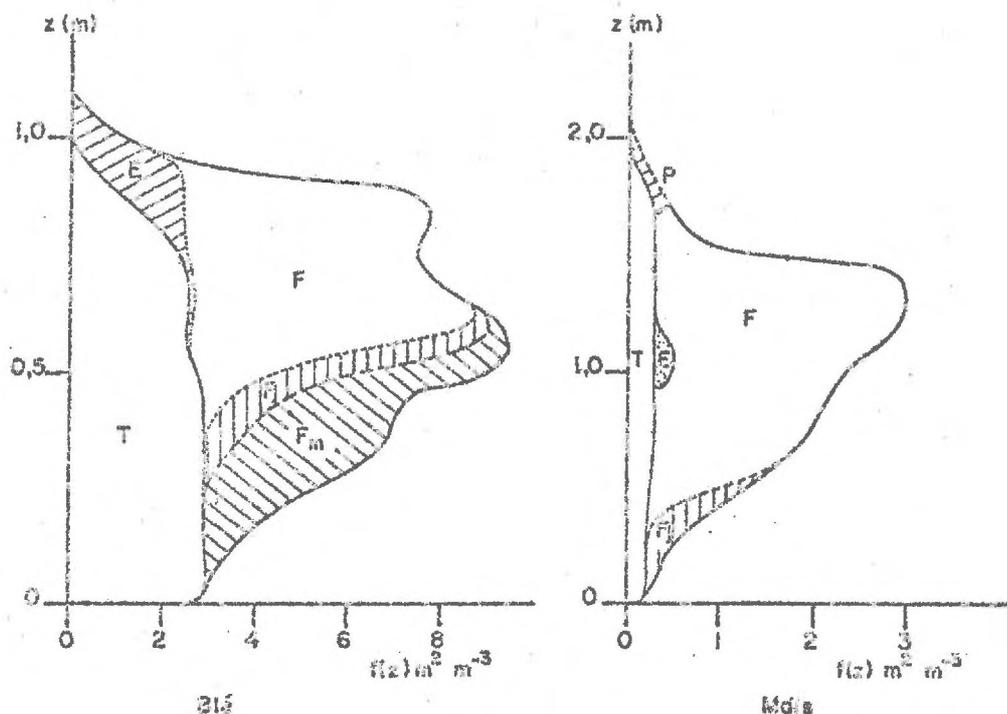


Fig.12- Illustration donnant les différentes classes d'organes intervenant dans le profil de densité de surface foliaire (blé le 9.11.73 à BUNGENDORE - CARRISERA et maïs le 9.9.71 à La Minière - VERSAILLES).
 E : épis ; P : panicule ; F : feuille ; Fj : feuille jaune
 Fm : feuille morte et sèche.

Une série de photographies prises de cette manière afin d'obtenir une portion suffisante de la surface du couvert est réalisée, puis recommencée après avoir prélevé la tranche supérieure (10 cm environ) ; cette opération est reproduite jusqu'à la dernière tranche au voisinage du sol. Cette technique permet de déterminer la projection horizontale des surfaces foliaires cumulées entre le sol et une hauteur z donnée (positif des photographies) et par différence entre deux niveaux (négatif pour la tranche $0, Z + \Delta z$ et positif de la tranche $0, Z$), on obtient la projection horizontale de surface foliaire de la couche considérée ; quelques corrections dues au recouvrement des parties supérieures sur les parties inférieures doivent alors être portées en fonction de la comparaison des photographies normales (noir et blanc de deux tranches successives).

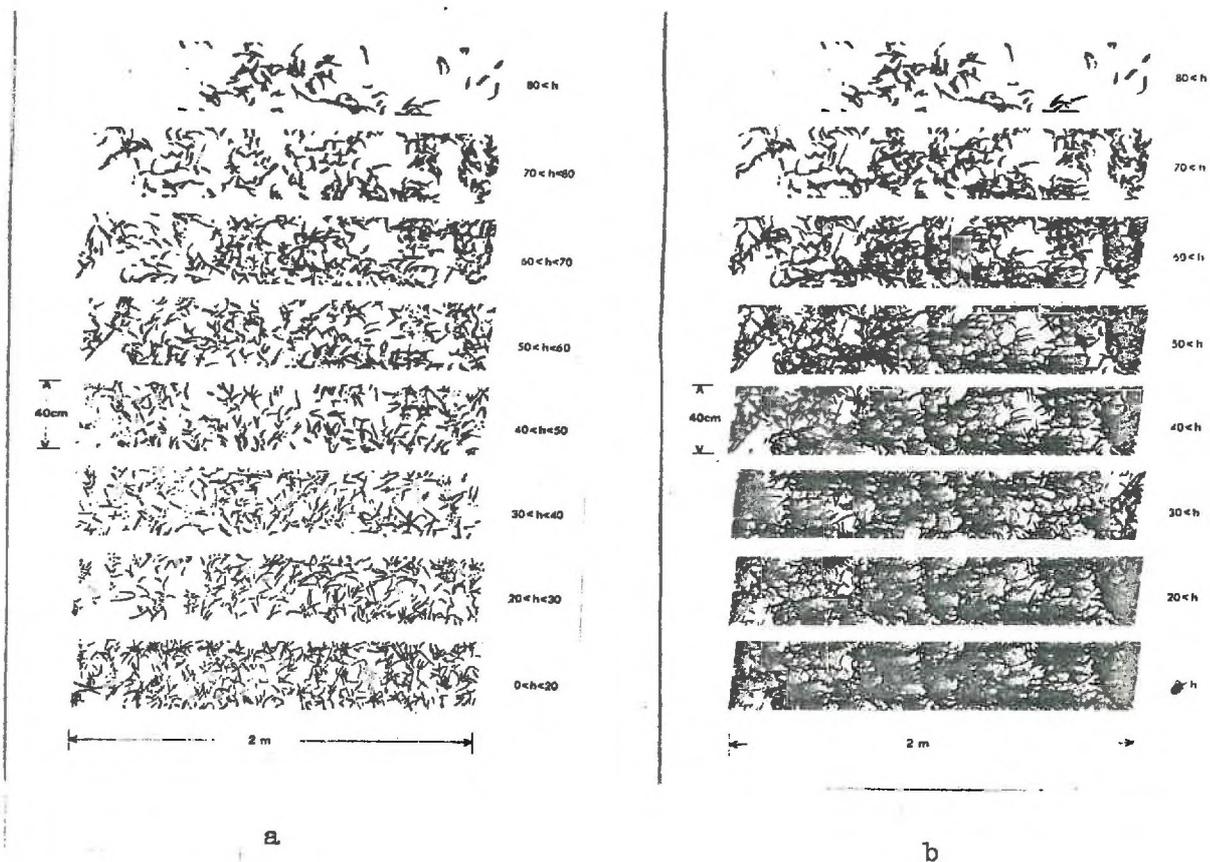


Fig.13 - a) Densité de surface foliaire en projection horizontale par tranche de 10 cm pour un blé (EUNGENDORE - CANBERRA).
 b) Reconstitution à partir des valeurs précédentes des surfaces foliaires cumulées, à partir du sommet jusqu'à un niveau Z variant de 10 en 10 cm.

La reconstitution des différentes tranches (photographies positives) (fig.13. a) permet de cumuler, à partir du sommet, l'ensemble des surfaces horizontales (fig.13 b).

b) Mesure des résistances stomatiques.

Cette détermination présente deux types de difficultés :

- l'un dû à la variabilité assez grande de la valeur de la résistance pour chaque niveau considéré,
- l'autre, à des techniques de mesures longues, perturbatrices et peu précises.

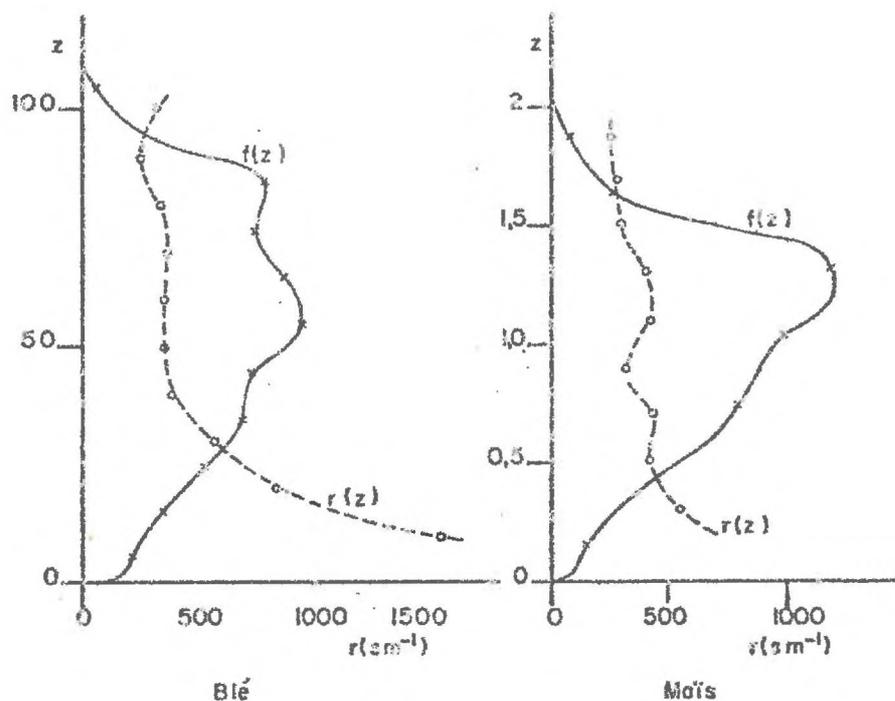


Fig.14 - Exemple de profils moyens de résistance stomatique (pris entre 11h et 15h) pour les deux cultures étudiées : un blé et un maïs.

Actuellement, la technique la plus utilisée, car la mieux standardisée et la plus facile à mettre en oeuvre, est une mesure par poromètre à diffusion type Van Bavel (1964). Il a été largement employé après certaines mises au point (DJAVANCHER 1971), ainsi qu'une technique de cinétique de température (de PARCEVAUX et FERRIER 1973). Ce type de mesure nécessite donc pour chaque tranche un nombre assez important de répétitions, et il est difficile d'établir de nombreux profils (fig.14). Aussi, une grande partie de la modélisation faite utilisera des profils moyens basés sur de nombreuses mesures, mais relatives à différents jours et à différents moments de la journée (matin ou après-midi), tout en se rapportant à un même stade du couvert. Seuls quelques profils instantanés réels ont été testés bien que leur représentativité reste faible, car toujours basée sur trop peu de répétitions.

c) Mesure des potentialités photosynthétiques des feuilles

Cette étude est poursuivie depuis de nombreuses années et de façon assez systématique (CHARTIER 1970b) en laboratoire, à l'aide de chambres d'assimilation. Elle s'effectue aussi bien sur différentes parties de la

feuille que sur des feuilles de différents niveaux, sur des organes de reproduction et sur des tiges. Pour une même variété de maïs, une assez grande constance des paramètres, en fonction des différentes parties du couvert permet d'utiliser pour l'ensemble du couvert des valeurs identiques (CHARTIER 1975) à l'exception des feuilles en voie de dessèchement (jaunissement cf. chap. IV).

1.4.2.2. Investigation d'ordre physique

Cette investigation s'est toujours faite sur une période d'environ douze minutes (cf. par. 1.2.2) pour l'ensemble des facteurs mesurés, avec des répétitions au cours de la journée à des intervalles d'une demi-heure ou d'une heure. La mesure de ces facteurs centralisés sur une acquisition de données de 100 voies (type Vidar) s'effectuait à une séquence de scrutation d'environ 4 à 7 voies par seconde permettant environ 30 à 50 scrutations de chaque voie. La caractéristique turbulente de l'ensemble des grandeurs relatives à la masse d'air et aussi la grande variation spatiale du rayonnement justifiaient le calcul de la moyenne de chaque grandeur sur un nombre tel de scrutations.

Cependant, d'un point de vue technique, une adaptation de certaines mesures fut nécessaire, soit afin de répondre à une mesure quasi instantanée (transformation des anémomètres totalisateurs en anémomètres instantanés par mesure de fréquence), soit au contraire, afin d'obtenir automatiquement une valeur moyenne de la grandeur recherchée (cas des concentrations en gaz carbonique qui nécessitaient de pouvoir échelonner la mesure des dix niveaux de prélèvement de gaz carbonique pendant l'interpériode de non mesure sur un seul analyseur différentiel à gaz) (I.R.).

Enfin, il faut souligner la séparation qu'il y a entre la mesure directe de tous les profils microclimatiques effectués sur acquisition de données et la mesure particulière de certains flux qui nécessitent des méthodes particulières le plus souvent accompagnées d'enregistrement séparé.

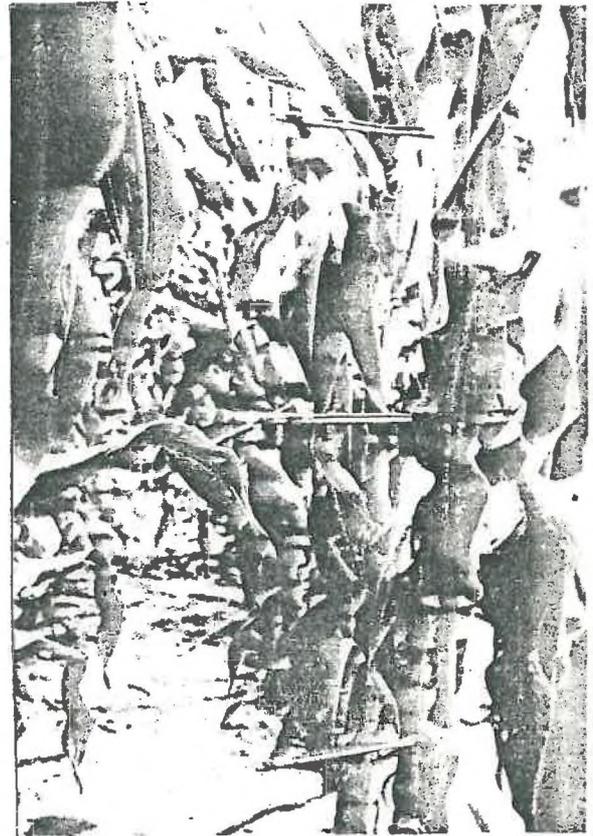
a) Mesure des profils microclimatiques

Ces profils ont été établis sur la base de mesures à cinq niveaux

équidistants répartis entre la surface du sol et le sommet du couvert et cinq niveaux situés au-dessus du couvert à des intervalles logarithmiques.



a



b

Fig.15. - a) Système de mesure du profil de vent au-dessus d'un maïs, 10 niveaux (anémomètres Casella transformés pour obtenir 180 impulsions par tour).

b) Système de mesure du profil de vent au voisinage et au sein de la culture, 7 niveaux (fils chauds - Thermosystème).

- Mesure de la vitesse horizontale du vent (fig.15a, b)

Ces mesures furent réalisées, d'une part, avec des anémomètres sensibles à coupelle (type Casella - seuil de démarrage de 0.1 à 0.15 ms^{-1}) qui ont été transformés par nos soins pour passer d'une impulsion par tour à 180 impulsions par tour et pouvoir réaliser leur enregistrement directement sur acquisition en faisant une mesure directe de période sur 10 impulsions (très grande fiabilité dans le temps et précision de $0,1$ à $0,15 \text{ ms}^{-1}$).

Leur seuil de démarrage et leur dimension ne permettaient cependant pas leur emploi au sein du couvert, sauf dans sa partie supérieure (huit au-dessus du couvert et deux dans le couvert). Pour palier cet inconvénient, des fils chauds très résistants (Thermosystème) furent utilisés pour les investigations au sein du couvert, avec toutes les difficultés d'emploi dues aux courbes d'étalonnages et à leur variation en fonction de la température de l'air. Là encore, une grande robustesse des sondes, jointe à une faible dérive (étalonnage annuel suffisant) a permis une utilisation plus aisée de ces capteurs avec une précision de $0,05 \text{ ms}^{-1}$ à basse vitesse ($< 1 \text{ m}$) et des valeurs d'environ $0,2 \text{ ms}^{-1}$ vers 3 ms^{-1} .

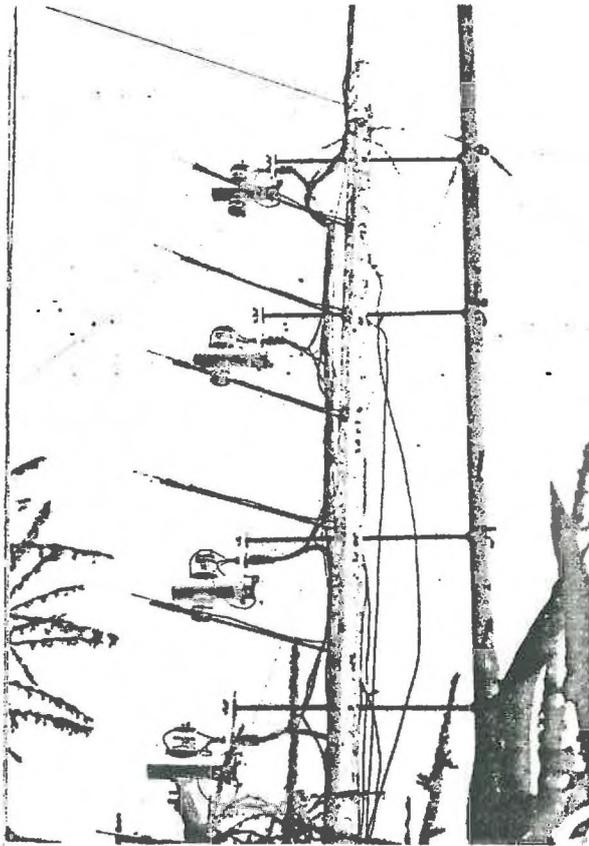


Fig.16 - Système de mesure des gradients de températures sèche et humide de l'air par psychrométrie (10 niveaux).

- Mesure des températures sèches et humides de l'air (fig.16)

Ces mesures simples, grâce aux capteurs thermo-électriques, étaient réalisées à l'aide d'un montage psychrométrique, (les difficultés ayant été surmontées (SECK et PERRIER 1970) qui donnait directement les gradients de

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.

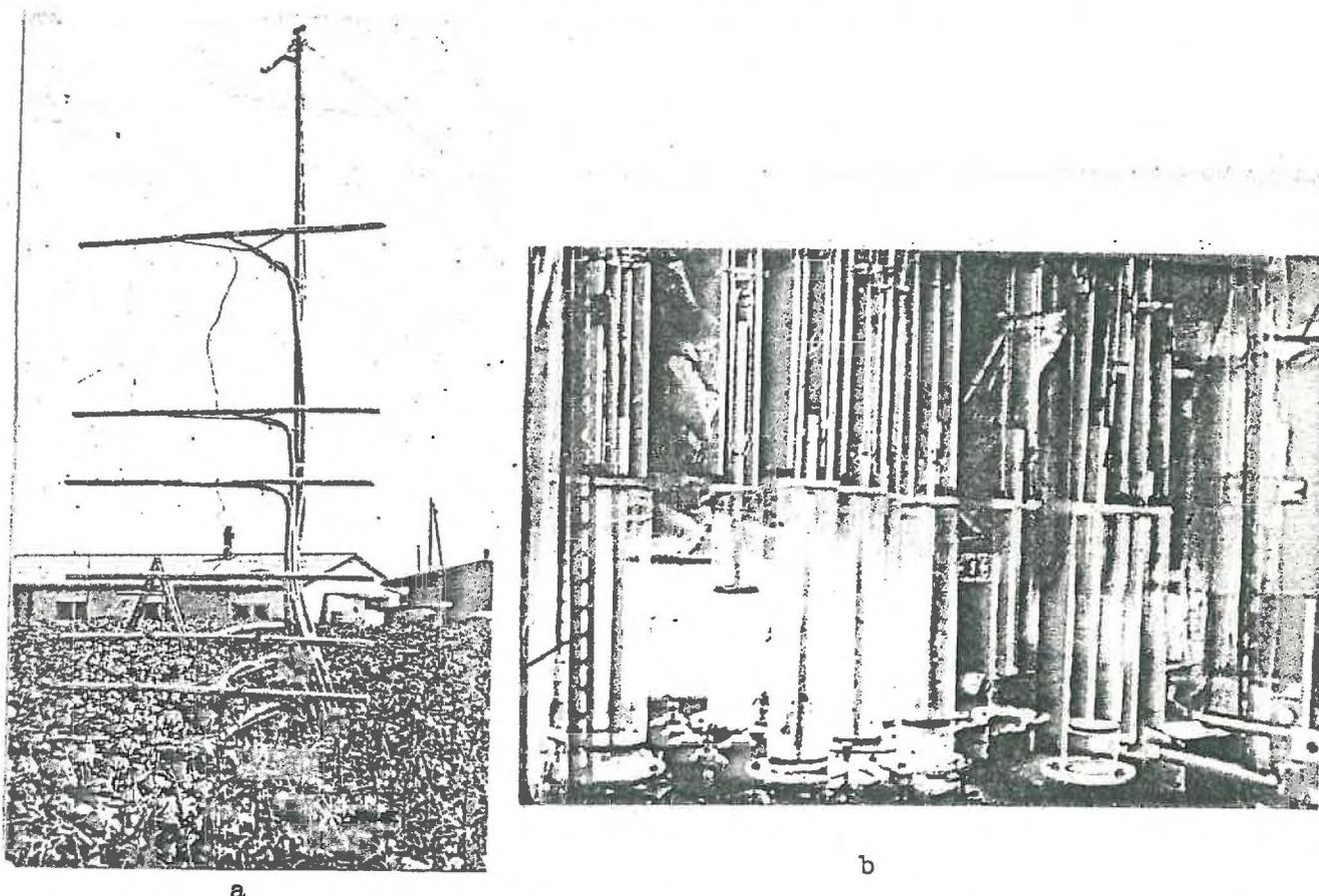


Fig.17. - a) Système linéaire de prélèvement de gaz pour l'analyse automatique des gradients de concentration en vapeur d'eau (analyseur à point de rosée) et de gaz carbonique (analyseur I.R 20 vpm pleine gamme).
 b) Système de pistons pour emmagasiner le gaz pendant la période de mesure.

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 CO_2 absolu, un analyseur de 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 ± 3 à 5 vppm pour la mesure absolue du 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.

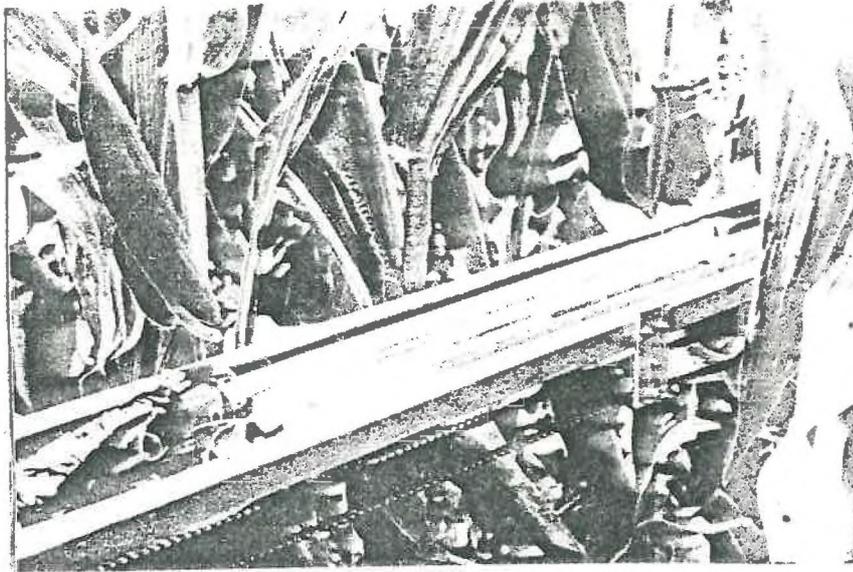


Fig. 18. - Système de chariot permettant l'analyse du rayonnement net (5 niveaux) à travers 6 m de végétation.

- 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, ϕ 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.

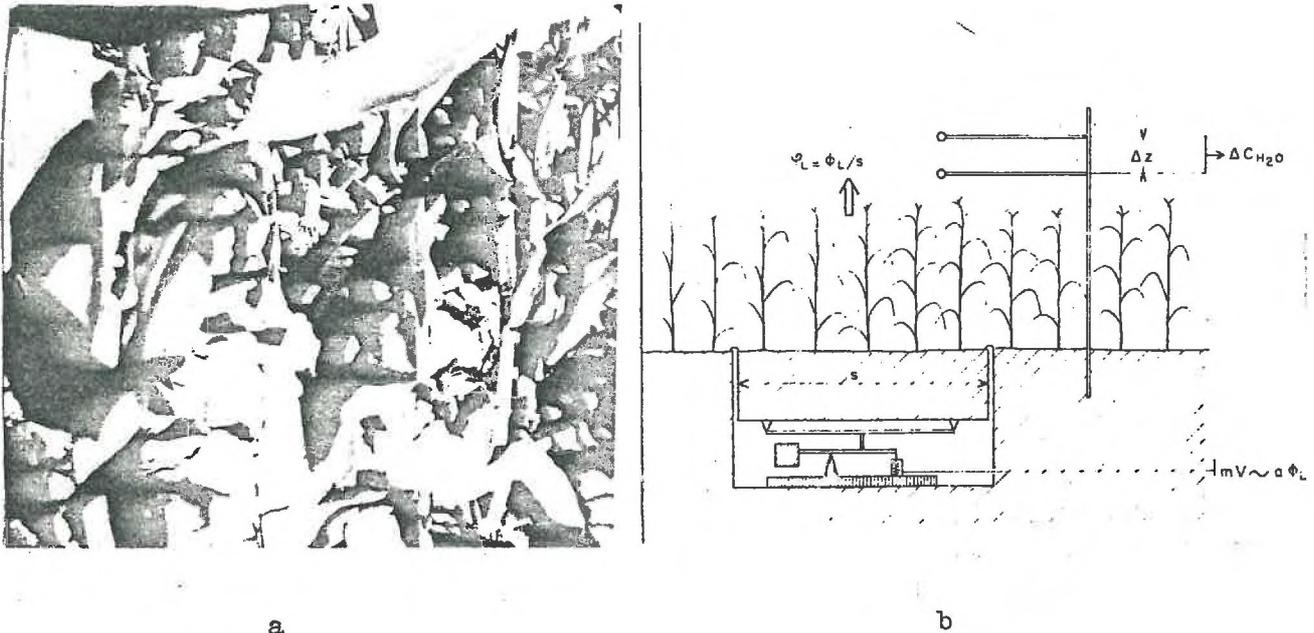


Fig. 19 - a) Evapotranspiromètre pesable de précision permettant la mesure directe du flux de vapeur d'eau (5 m² de surface, précision de 150 g, soit environ 40 Wm⁻² pour une demi-heure).
 b) Schéma descriptif du principe de mesure.

- 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 Wm^{-2} en travaillant à l'échelle de la demi-heure), afin de pouvoir comparer au mieux les différents résultats (fig. 20).

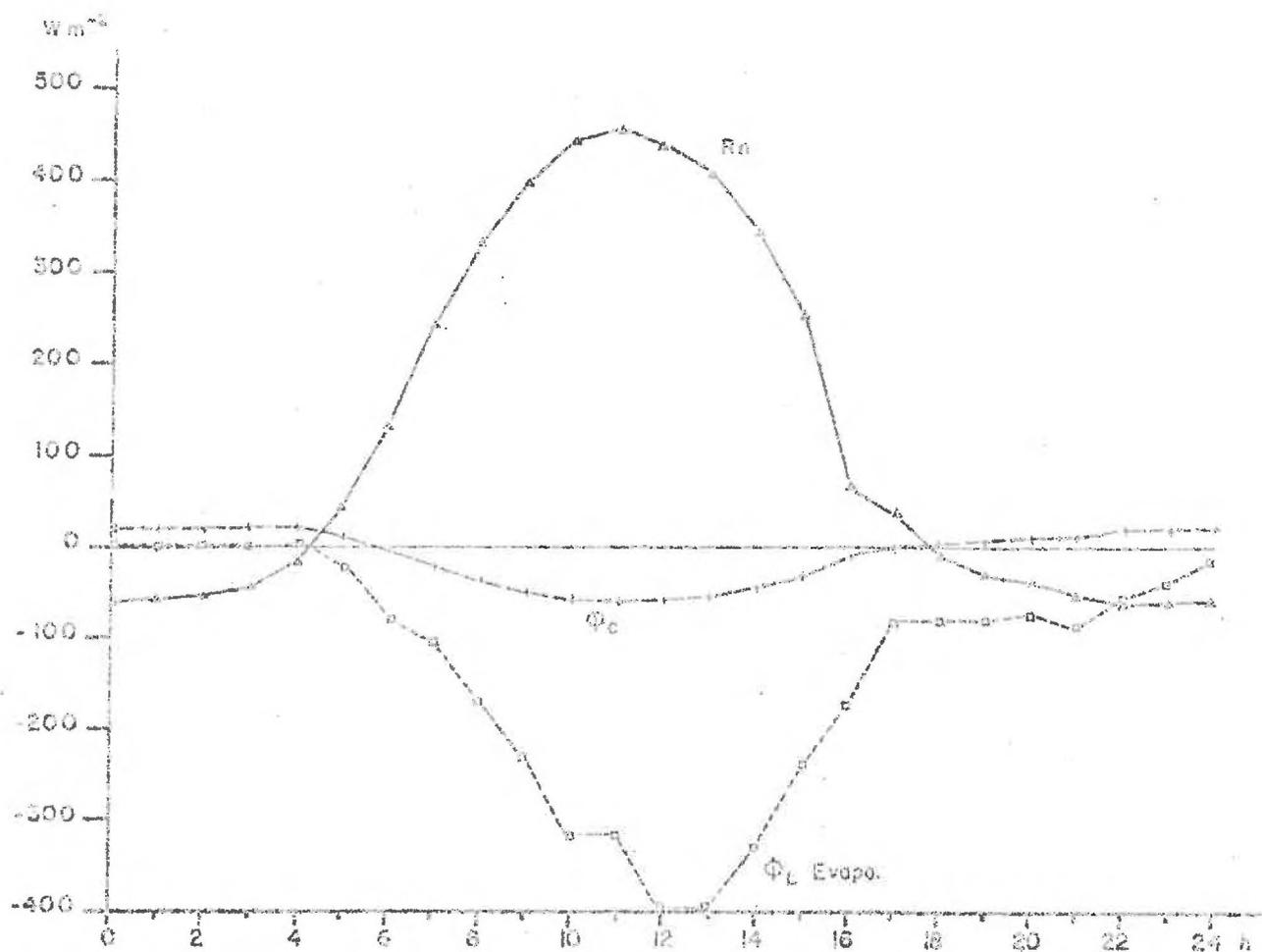


Fig. 20 - Exemple typique de l'évolution diurne du rayonnement net R_n , de l'évapotranspiration ou flux de chaleur latente ϕ_L et du flux conductif ϕ_c à la surface du sol pour une culture de maïs pleinement développée.

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

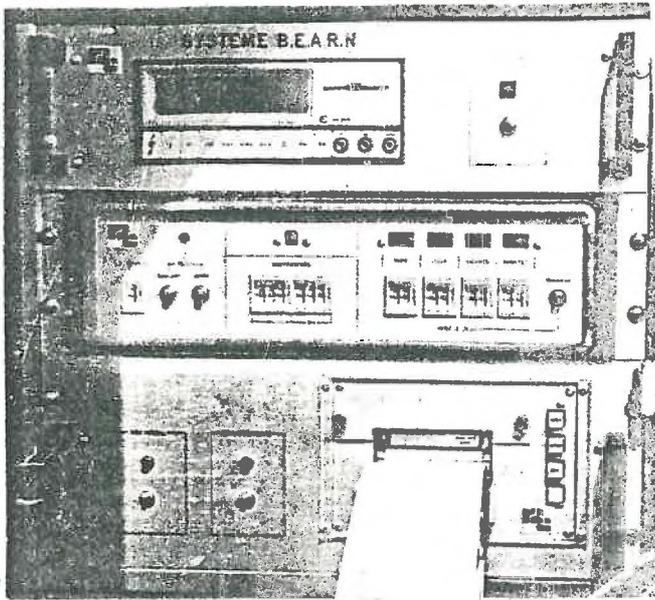
La mesure directe de ce flux par bilanmètre est devenue une mesure classique en micrométéorologie (cf. par. précédent sur le profil de rayonnement net). La fiabilité de l'instrument et sa précision (< 5%) offrent une base expérimentale sûre concernant ce terme énergétique de première importance puisqu'il 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

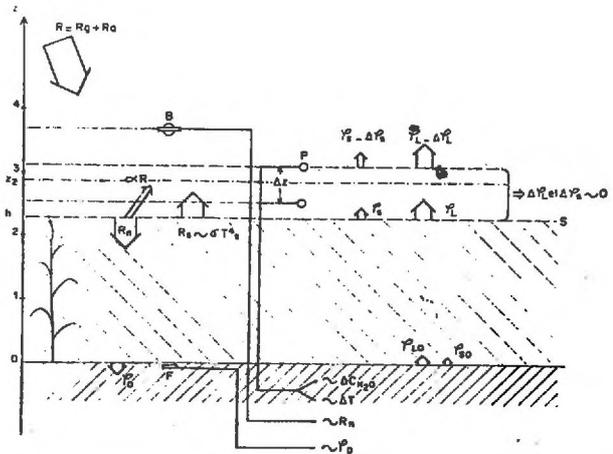
La mesure directe de ce flux est un des termes nécessaires à l'étude entreprise, puisque c'est une des conditions limites choisie (cf. par. I.3.2.2) pour la borne inférieure. Sa mesure directe, à l'aide de fluxmètres placés près de la surface du sol est aisée, bien que d'un point de vue thermique l'interprétation 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 E.T.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).



a



b

Fig.21 - a) Dispositif de mesure, de contrôle et de calcul du bilan d'énergie (B.E.A.R.N.) permettant d'obtenir les valeurs moyennes horaires du rayonnement net R_n , du flux conductif ϕ_c , du flux de chaleur latente ϕ_L et du flux de chaleur sensible ϕ_s (contrat D.G.R.S.T.)
 b) Schéma de principe de la méthode de mesure.
 B : bilanmètre ; F : fluxmètre ; P : psychromètres différentiels réversibles.

Cependant c'est une méthode délicate, de dépouillement fastidieux, dont une première tentative d'automatisation a été réalisée par Mc ILROY sous forme analogique (1971). Toujours par souci de recoupement et afin d'avoir un système de mesure mobile (contrairement à la mesure par évapotranspiromètres) un système automatique purement numérique a été élaboré (PERRIER et al. 1975) afin d'obtenir en vraie grandeur (Wm^{-2}) les moyennes horaires de ces flux à partir de trente mesures ponctuelles, ainsi que la valeur de la moyenne journalière. Cette mesure de base en bonne concordance avec les mesures précédentes (fig.22) est évidemment une des données expérimentales précieuses. En effet, les mesures indirectes par méthode aérodynamique (mesure des gradients de vitesse, de vapeur d'eau et de température) ou par la méthode générale des gradients (utilisation des gradients de Thoron, de vapeur d'eau et de température) ne permettent pas des mesures aussi fiables et précises.

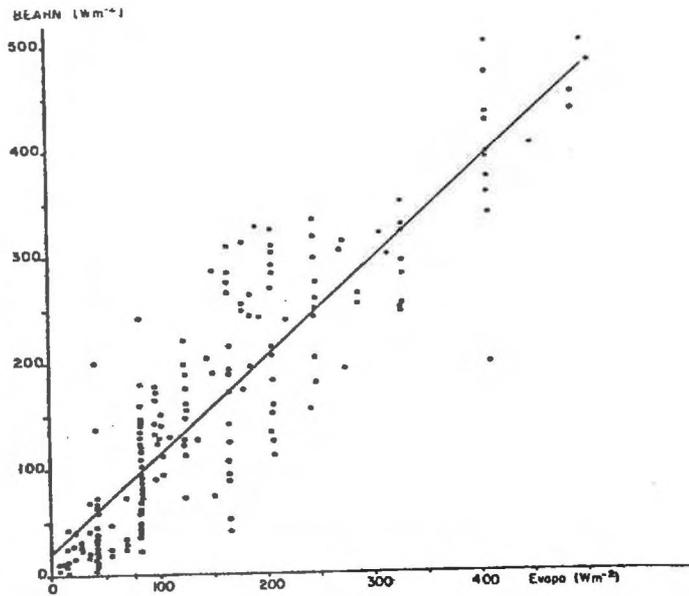
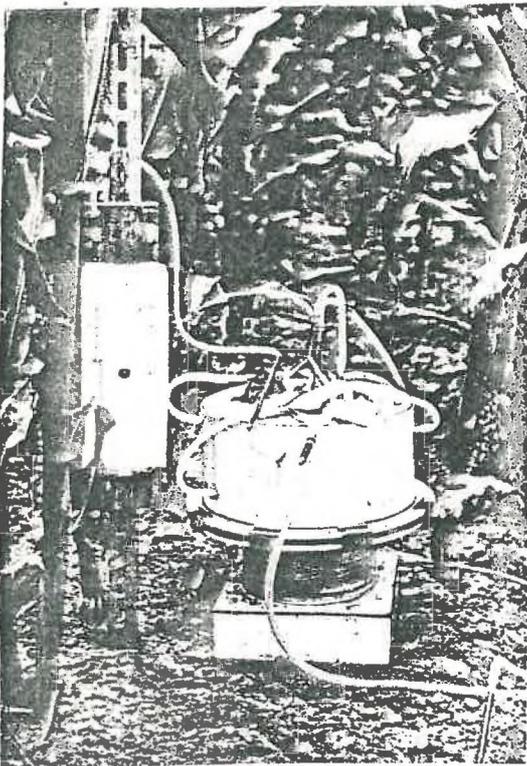
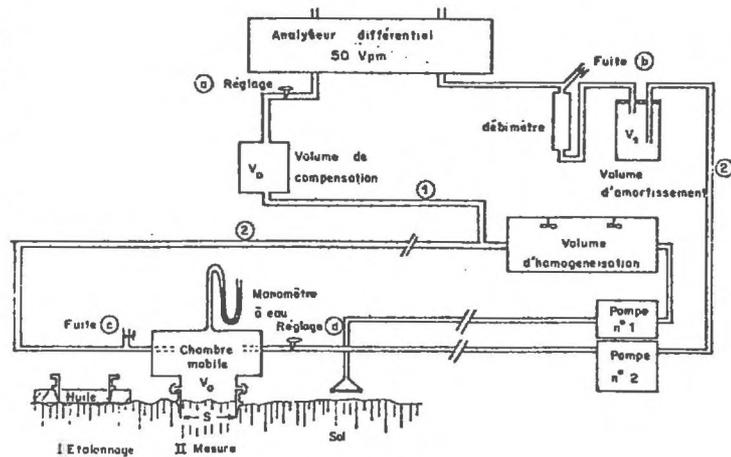


Fig. 22 - Comparaison des mesures horaires de flux de chaleur latente obtenues par évapotranspiromètre pesable (fig.19) et par B.E.A.R.N.(fig.21).



a

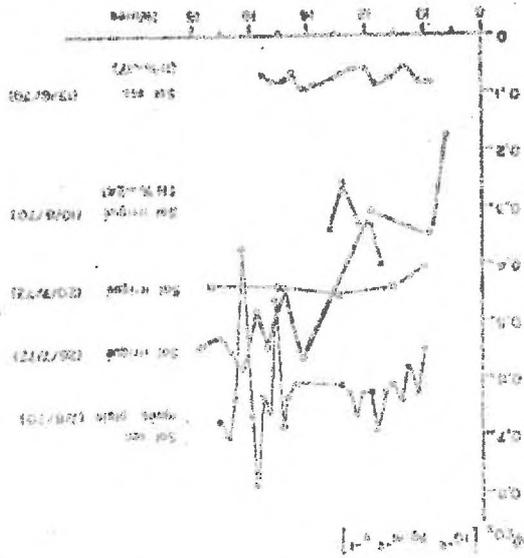


b

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 CO₂ 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 instrument
 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 CO₂
 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
 (MONTMAYE et al. 1964). Aussi, nous a-t-il fallu mettre au point une tech-
 staux jours) par rapport à notre intervalle de temps (12 m) sont connues
 étude. Enfin, quelques mesures sur de longues périodes (1 jour à plus
 de l'estimation nette du convert. 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 traînée 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 τ_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 τ_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 τ_0 à la surface du sol et l'intégration entre les niveaux 0 et z , plutôt que τ_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.

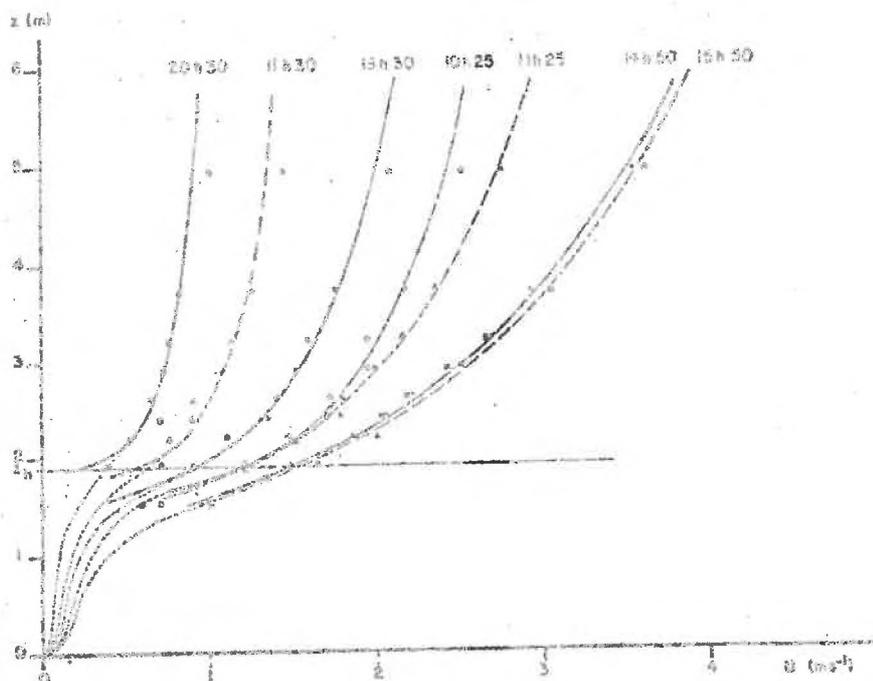


Fig.25 - Exemple d'évolution du profil de vent au-dessus d'un couvert de maïs (La Minière : 9.8.71) au cours de la journée.

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 .

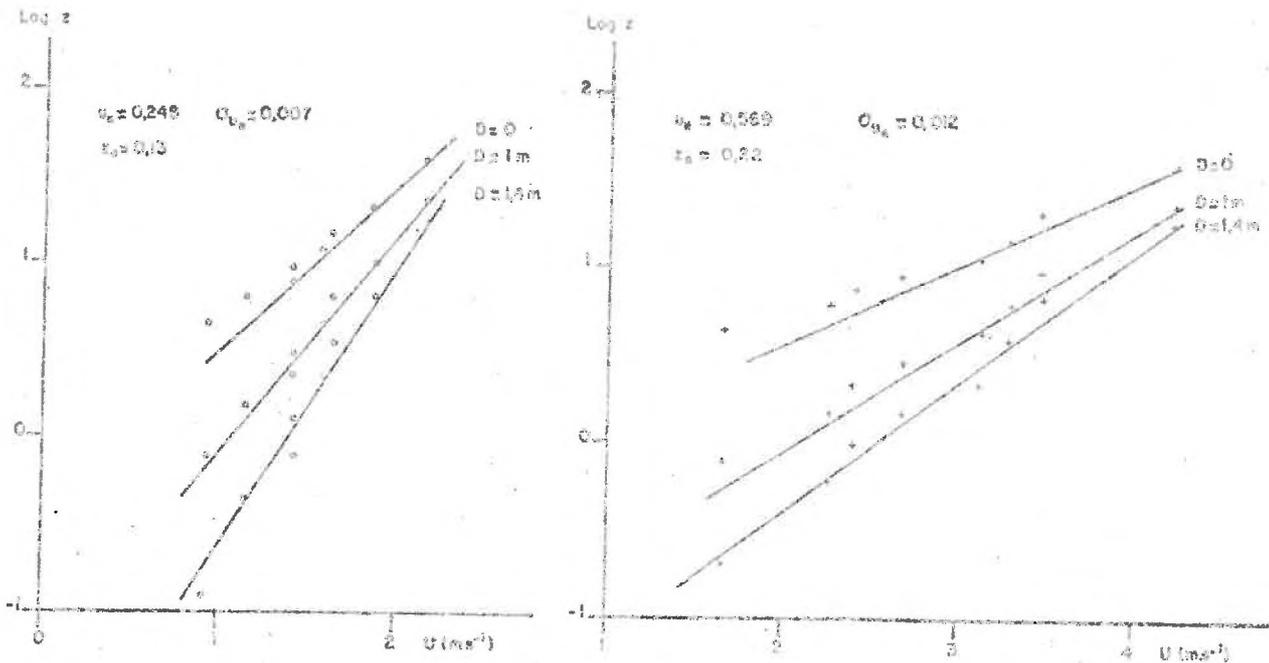


Fig.26 - Exemple de calcul des paramètres U_* , D et z_0 pour deux profils de vent à 14h10 et 16h55 (La Minière à 10.8.71°).

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).

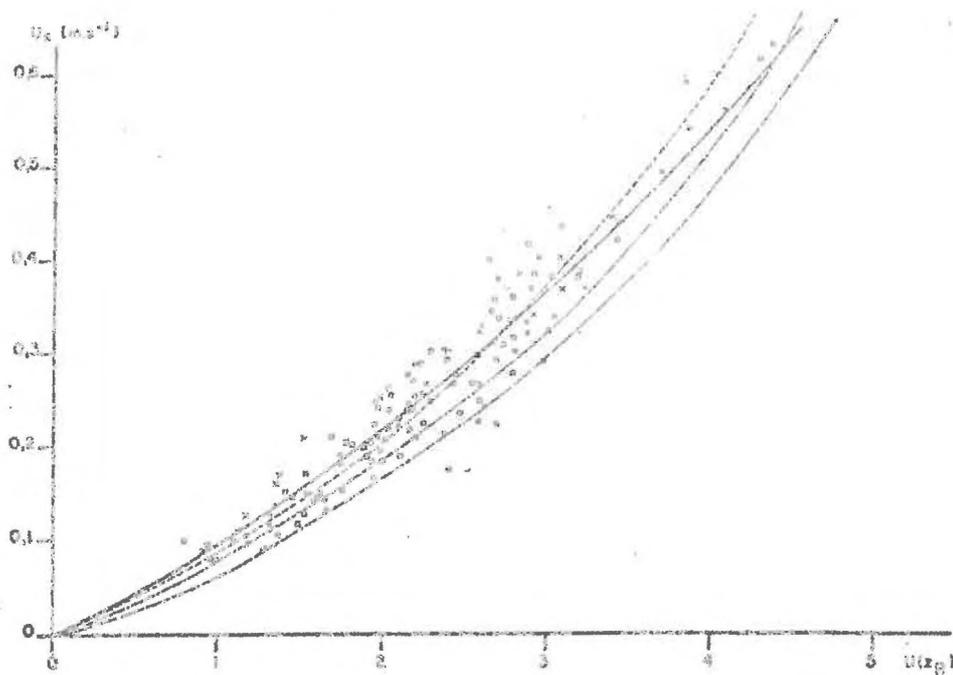
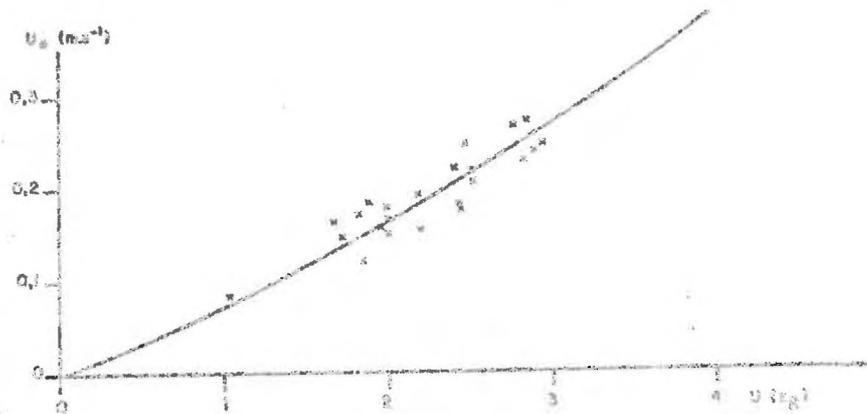
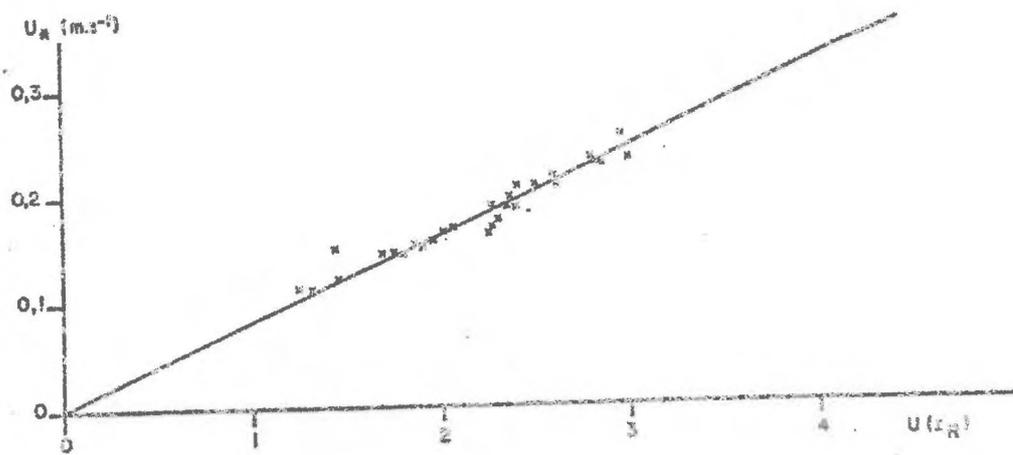


Fig. 27 : Evolution de la vitesse de frottement U_* en fonction de la vitesse de référence $U(z_R)$ (3 m au-dessus du couvert) :

- a) U_* pour un gazon
- b) U_* pour un maïs (0,6 à 1 m de hauteur)
- c) U_* pour un maïs (\approx 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 :

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

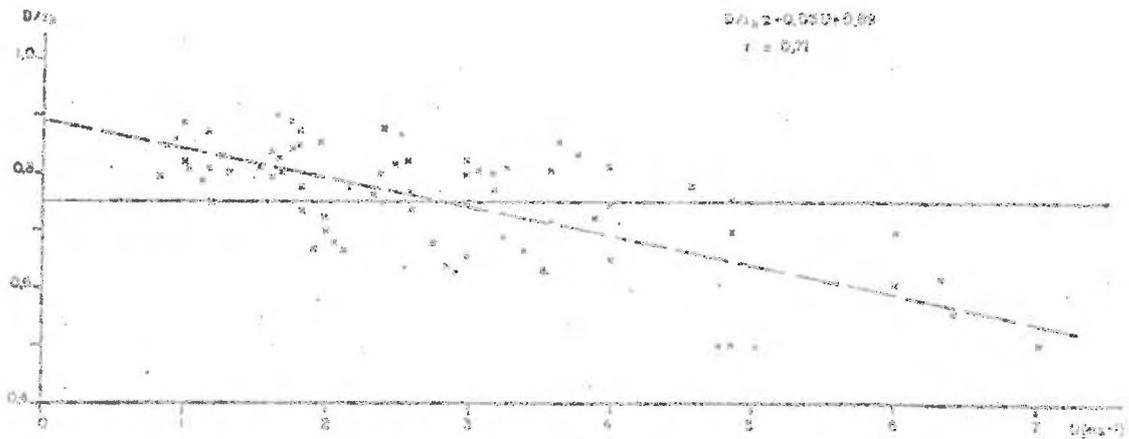
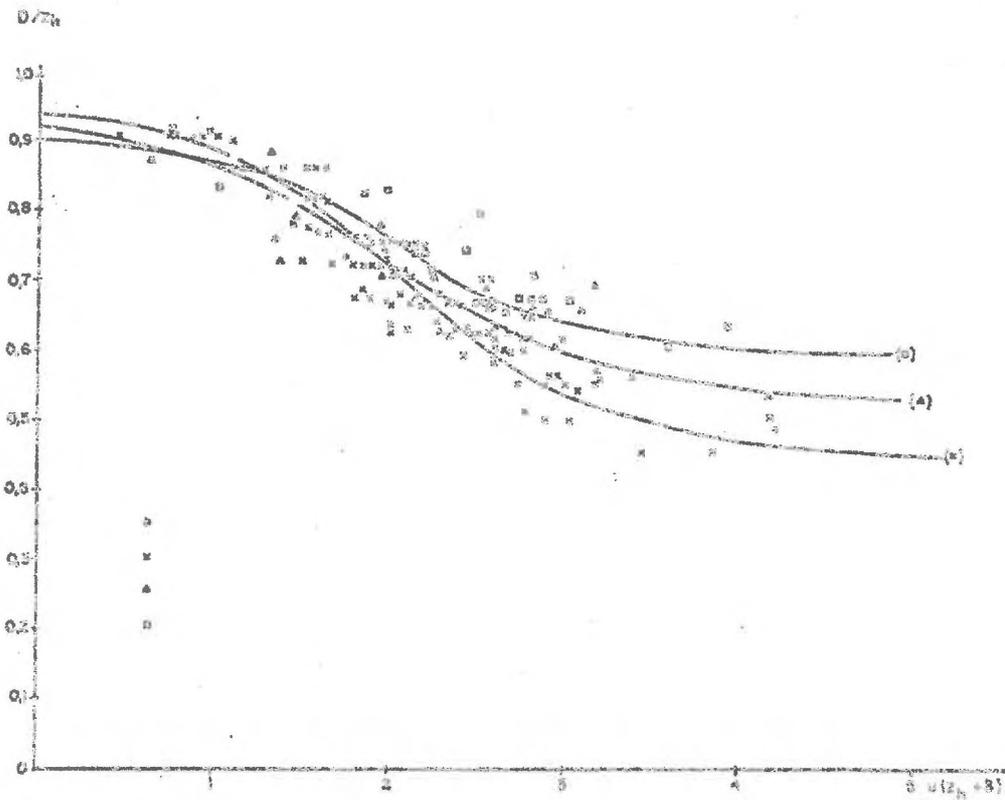


Fig. 28 : Evolution de la hauteur de déplacement D rapportée à la hauteur du couvert z_0 :

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, DENHRAD 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 (SZEJCE 1969) :

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

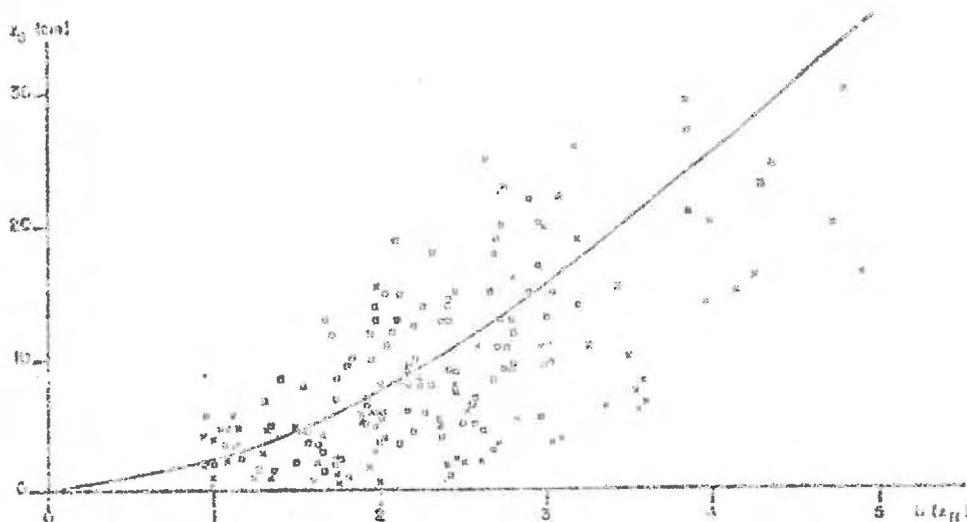


Fig.29 - Evolution du paramètre de rugosité pour un maïs
 □ 1969-1970
 × 1972

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 τ_p étant d'après II,3, II,9 et II,9 bis égale à ρU_*^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).

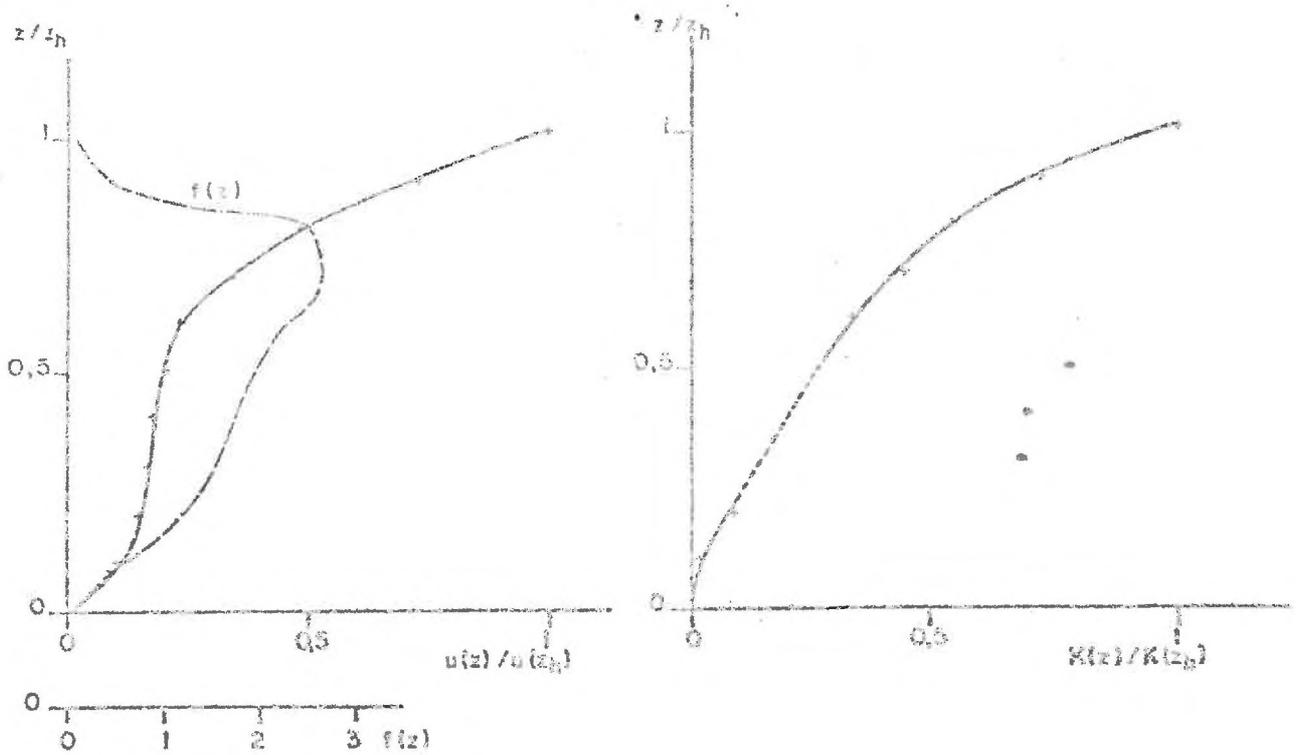


Fig. 30 : Calcul du profil de diffusivité au sein d'un couvert de maïs :

$f(z)$ profil mesuré

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

• points aberrants

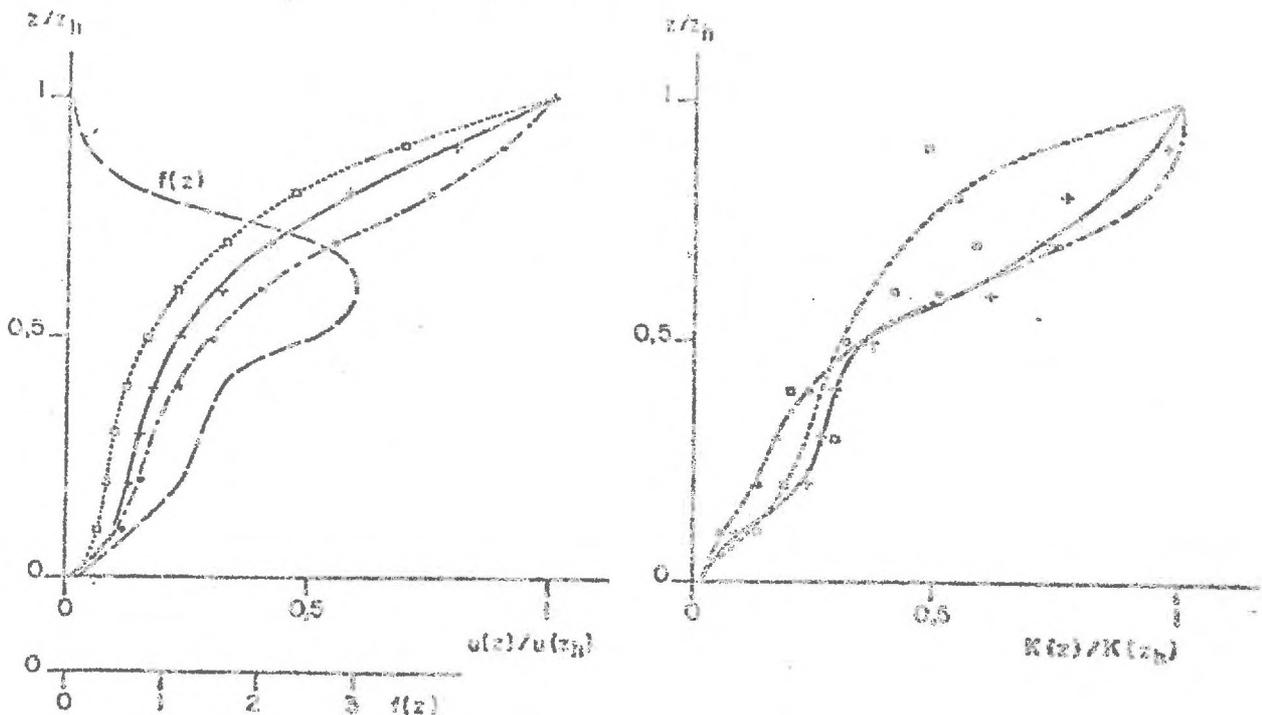


Fig. 31 : Calcul du profil de diffusivité à partir des profils de vitesse au sein du couvert (12.8.72) :

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

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

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

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

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

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

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).

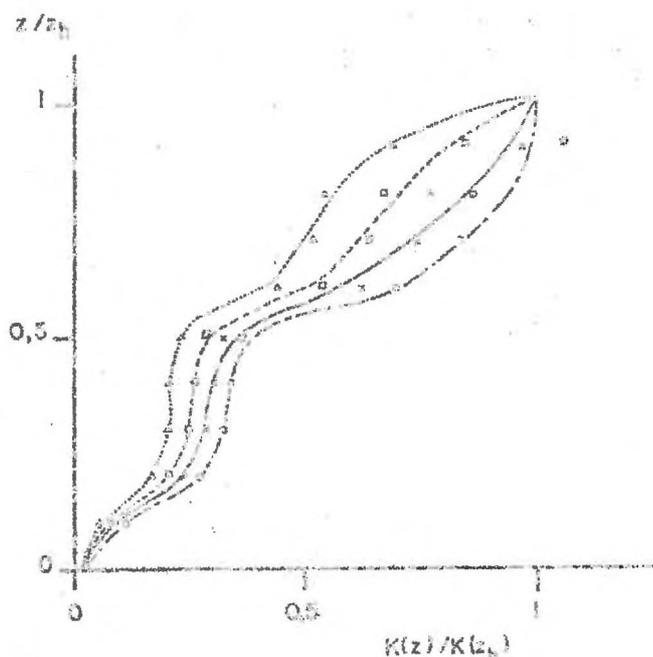


Fig.32 - Calcul des profils de diffusivité à partir du profil de vitesse moyen établi le 12.8.72 (fig.31).

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

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, TAKEEDA 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 τ_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 τ_p/ρ , 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

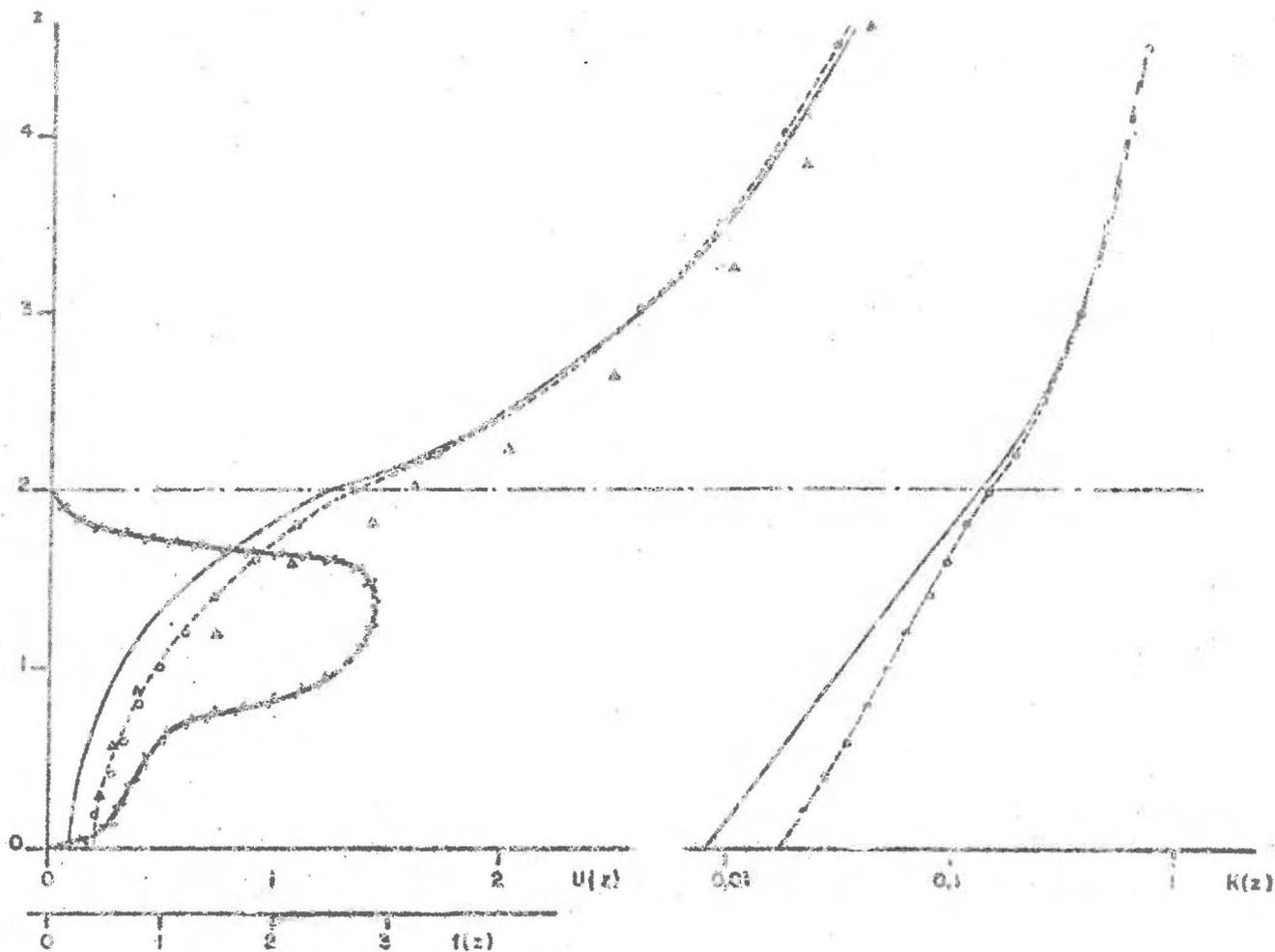


Fig. 33 - Profils de vitesse de vent et de diffusivité calculés et mesurés :

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 :

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

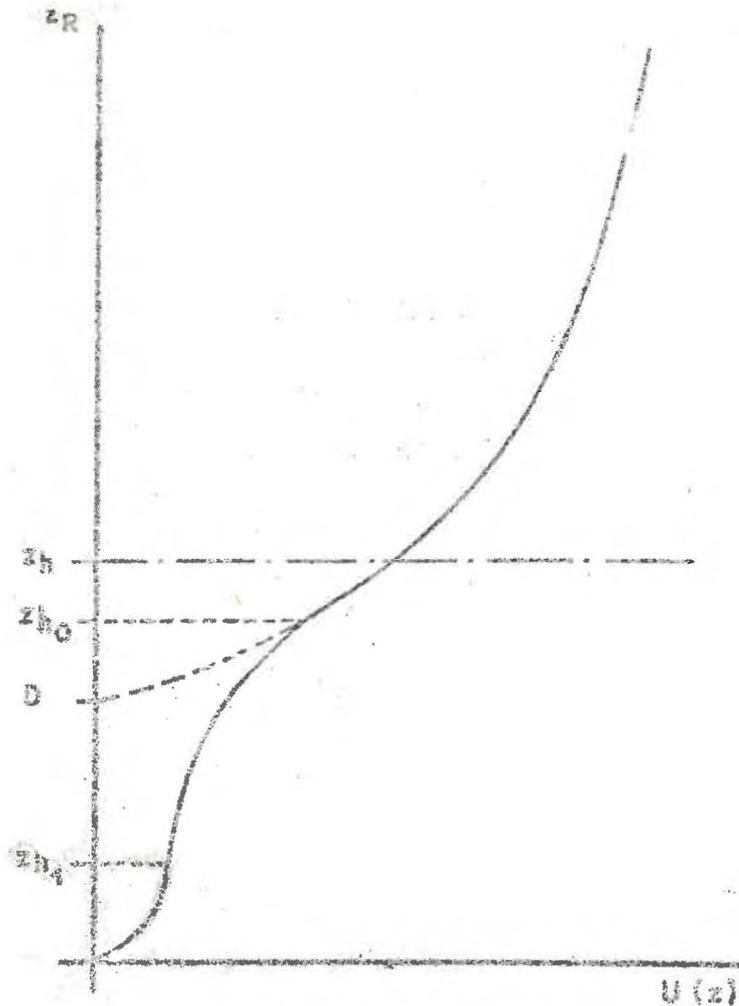


Fig.34 - Schéma de raccordement de la succession des trois profils précodifiés.

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_{hl} 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_{hl} 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 , C_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).

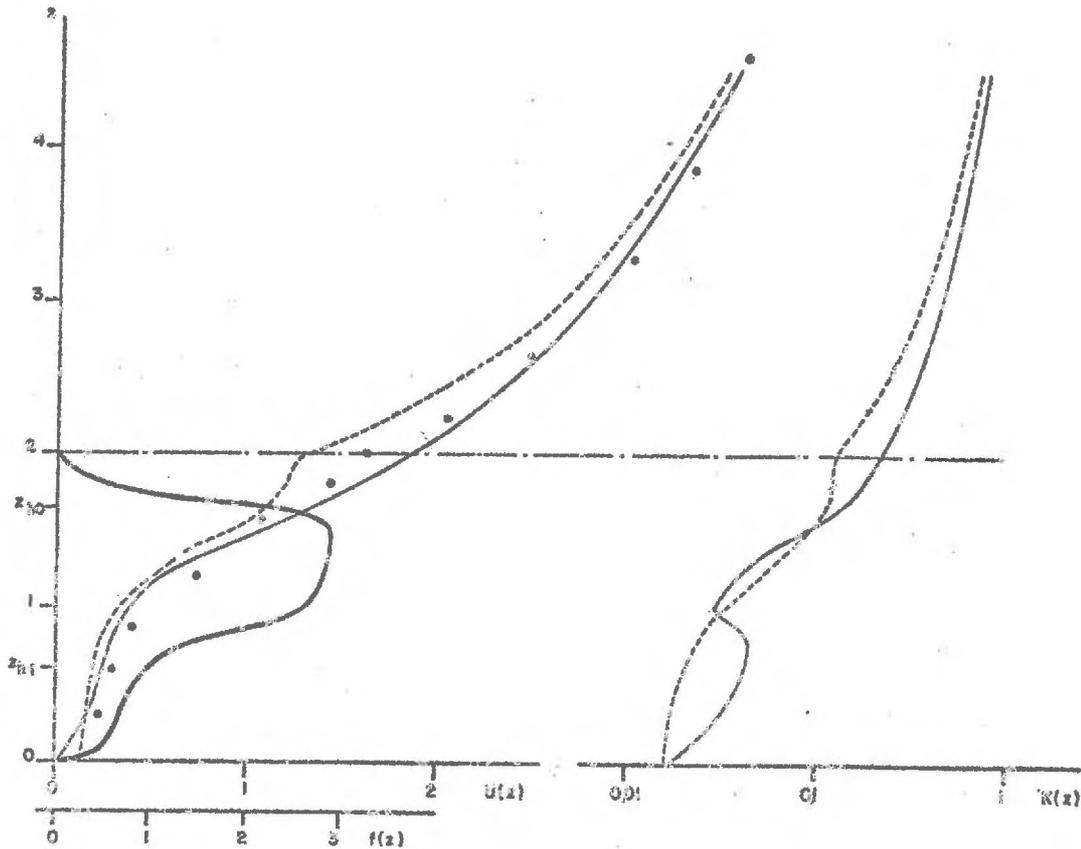


Fig. 35 - Profils de vitesse de vent et de diffusivité pour une culture de maïs :

- * 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 α 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 TRAINEE 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 ρ , de la surface S et du carré de la vitesse U^2 :

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

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 τ_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 :

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

(d, dimension moyenne de la surface, ν , 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.

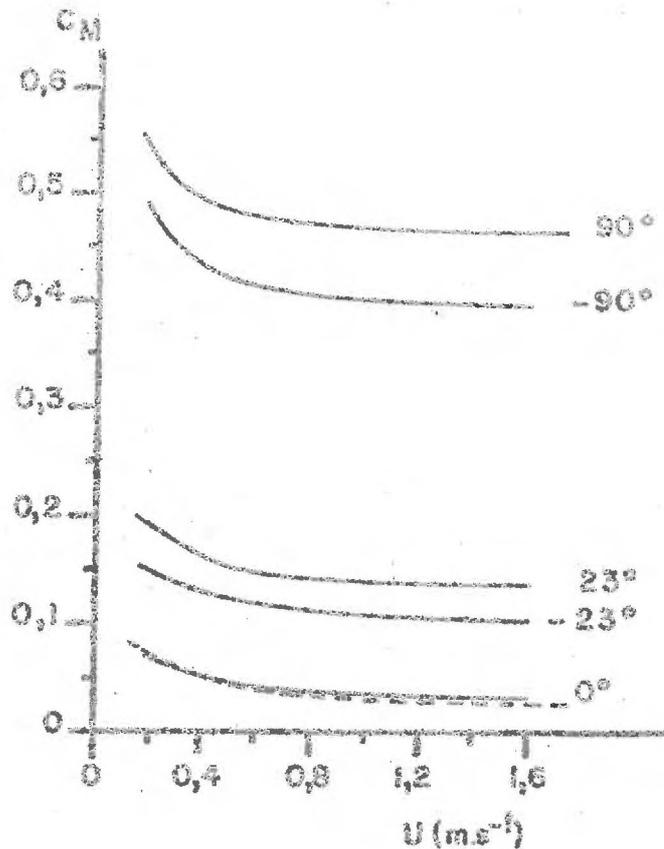


Fig. 36 - Coefficient de traînée d'une feuille en fonction de la vitesse du vent et pour différents angles d'inclinaison (d'après THOM 1969).

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 :

$$C_M(z) \cdot f(z) = \sum_i \cdot \sum_\phi \cdot a_{i\phi}(z) \cdot C_{0i}(U(z), \phi, d(z)) \quad (\text{II } 33)$$

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

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

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

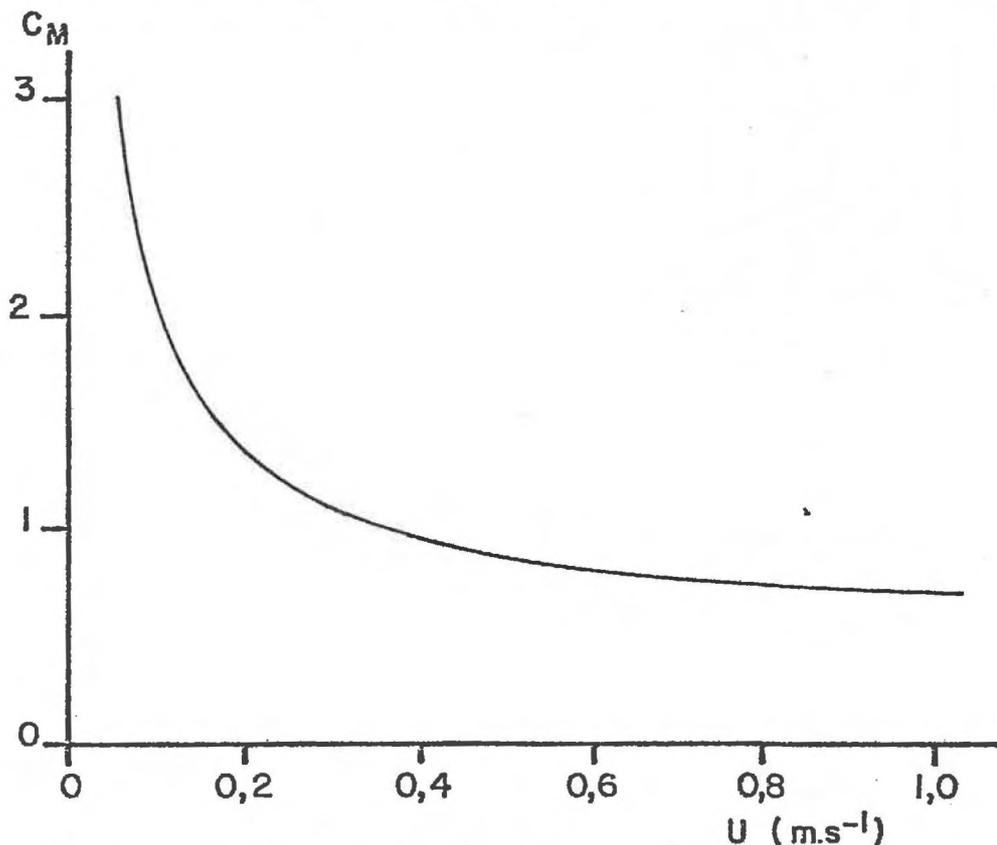


Fig. 37 - Evolution du coefficient de trainée d'un élément cylindrique en fonction de la vitesse du vent (SCHLICHTING 1955).

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 ϕ , 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 :

$$\begin{aligned} C_M(z) \cdot f(z) = & \sum_{\phi} a_{f\phi}(z) \cdot \alpha(\phi) \cdot C_{of}(z) \quad (\text{feuilles } \nabla \text{ inclinées}) \\ & + a_t(z) \cdot C_{ot}(z) \quad (\text{tiges verticales}) \quad (\text{II 33 bis}) \\ & + a_e(z) \cdot C_{oe}(z) \quad (\text{épis verticaux}) \end{aligned}$$

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

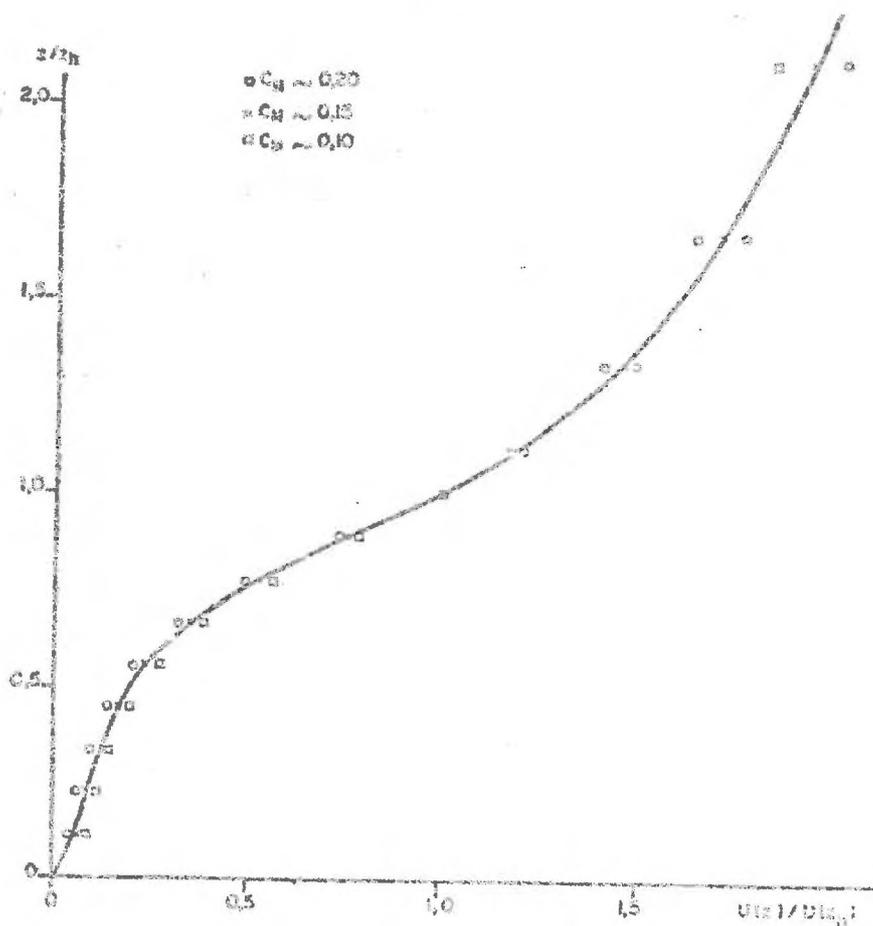
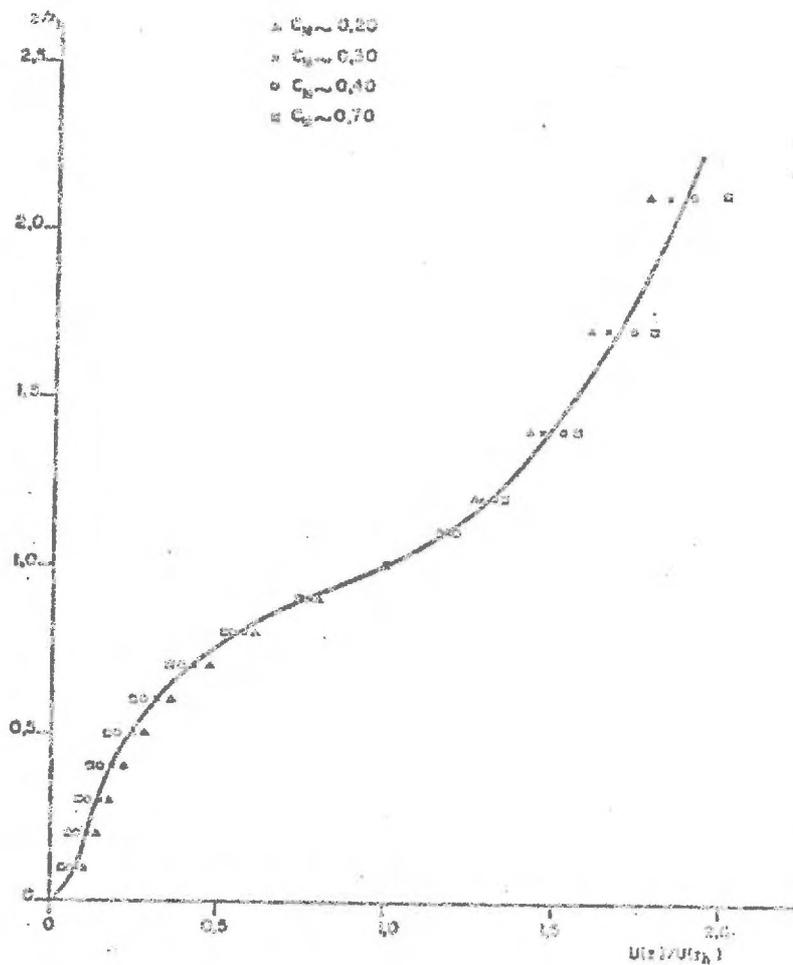


Fig. 39(a et b) - Evolution du profil de vitesse du vent en fonction du coefficient de trainée (U grand) pour une culture de maïs (a) et de blé (b).

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

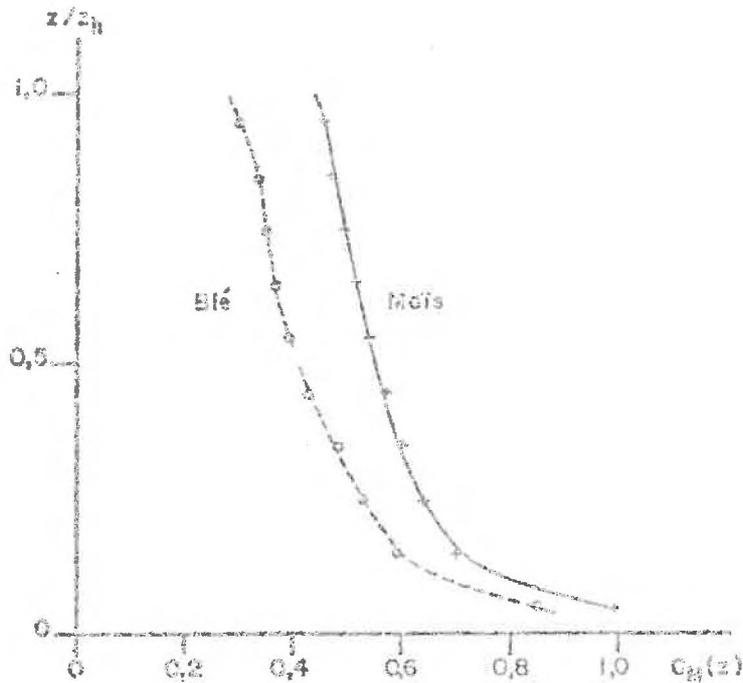


Fig. 38 - Profil calculé du coefficient moyen de traînée pour une culture de maïs et de blé.

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).

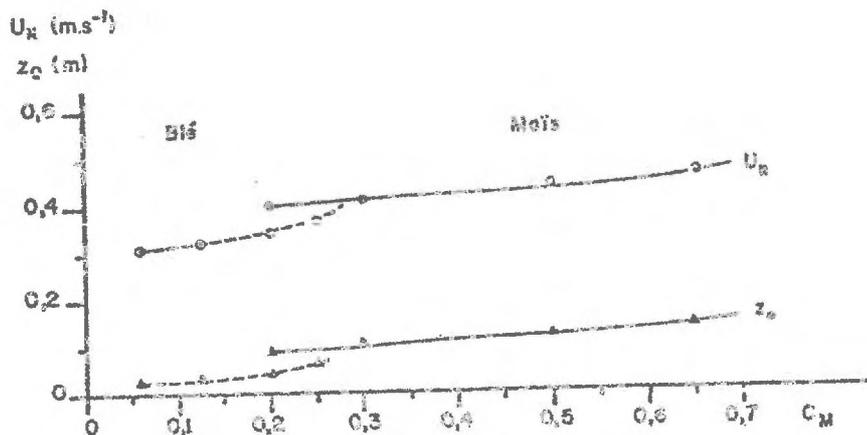


Fig.40 - Evolution de la vitesse de frottement et de l'épaisseur de rugosité z_0 en fonction du coefficient de traînée (U grand) pour une culture de maïs et de blé.

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 schématisé 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 σ 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 :

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

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
- $P(r)=1$ ($r \geq z$) car un obstacle sûr, au moins dans la direction A_x 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.

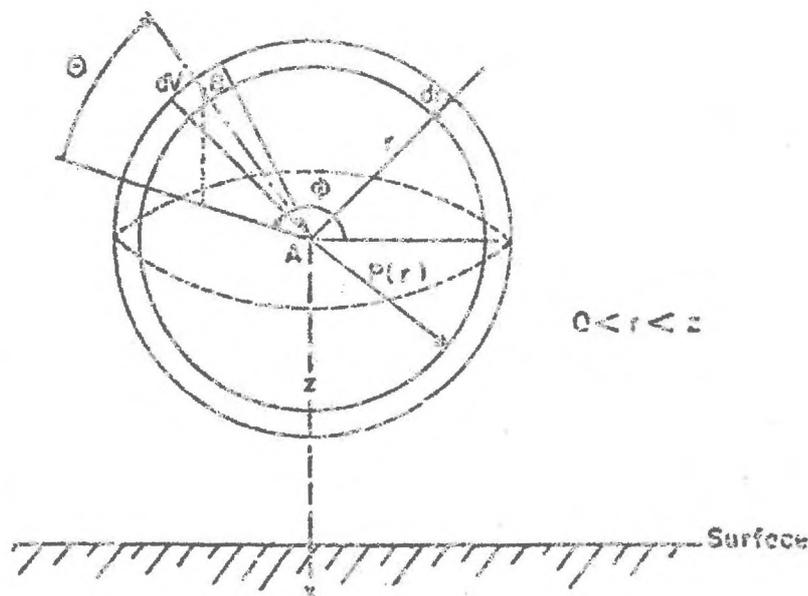


Fig. 41 - Schéma d'intégration à partir d'un point A de côte z.

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 $d\Omega = \left(\frac{dS}{r^2}\right)$ vue du point A sera :

$$f_h \cdot dV$$

et l'espérance de surface en ce point sera :

$$\frac{f_h \cdot dV}{dS} = f_h \cdot dr \quad (II 34)$$

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 θ ($\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}$) et son azimut ϕ ($0 < \phi < 2\pi$) la variation de probabilité de présence d'une surface élémentaire par unité d'accroissement d'épaisseur de la sphère creuse s'écrira :

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

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.

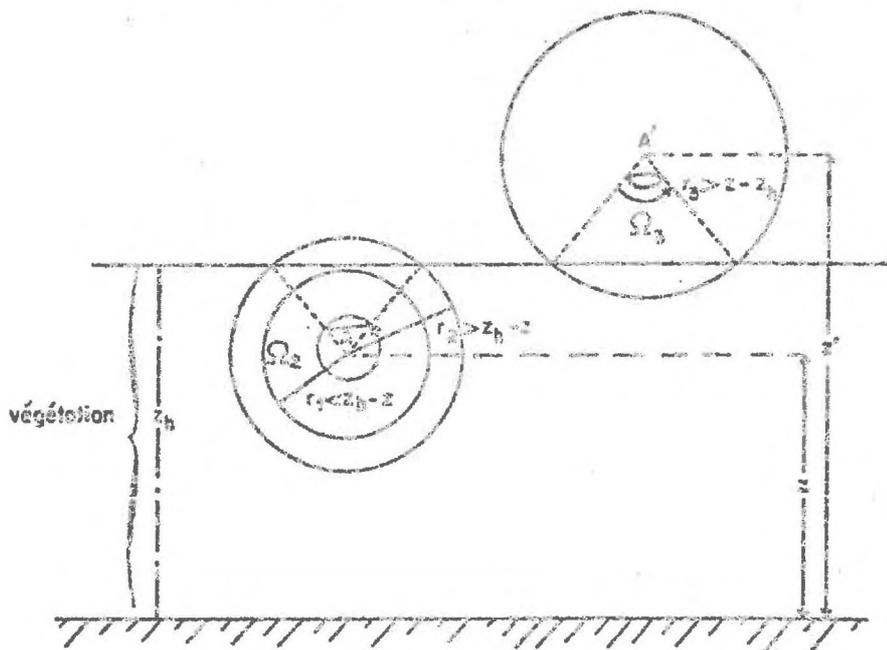


Fig.42 - Variation de l'angle solide d'intégration en fonction de la position A et du rayon d'intégration r :

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

- Si $f_h(r, \theta, \phi)$ ne peut être défini que pour certains points de la sphère creuse correspondant à un angle solide Ω (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 $1 - P(r)$:

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

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 (θ, ϕ) 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

θ 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 θ_f, ϕ_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 θ_f et ϕ_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 (ϕ'_f) perpendiculaire à \vec{u} , le vecteur \vec{n} s'écrit en fonction des nouveaux angles θ'_f et ϕ'_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 θ'_f, ϕ'_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 θ ($-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}$) et un azimut ϕ ($-\pi, +\pi$), 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_ϕ d'avoir un angle ϕ quel que soit θ , correspond alors à l'équiprobabilité de la répartition des angles ϕ , 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_θ d'avoir un angle θ quel que soit ϕ sera une répartition en $\cos \theta$ des différents angles θ : il n'y a pas équiprobabilité :

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

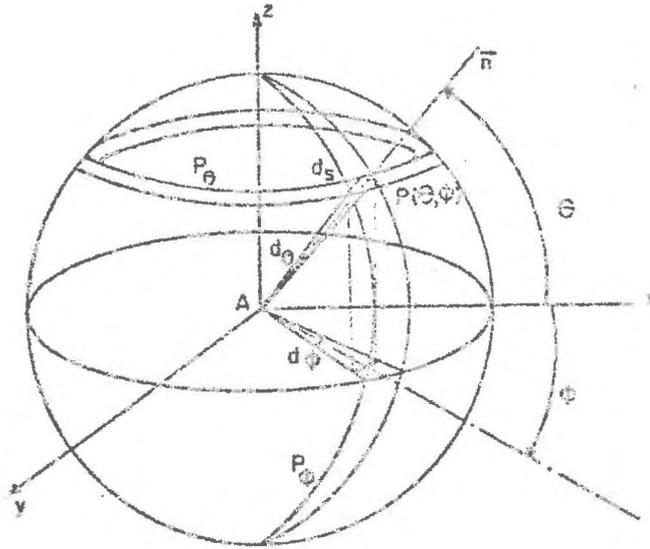


Fig. 43 - Equiprobabilité des normales \vec{n} et schématisation du calcul des probabilités des angles θ et ϕ dans un système orthonormé Axyz.

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 (θ, ϕ) 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 θ_f et les azimuts ϕ_f

L'indépendance, souvent observée, de l'inclinaison θ_f et de l'azimut ϕ_f (de WIT, 1965 ; ANDERSON, 1969) permet, par le calcul ou par une mesure expérimentale séparée de p_{θ_f} et de P_{ϕ_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 θ_f et ϕ_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 ϕ_f sont équiprobables, mais les inclinaisons θ_f constantes et égales à θ_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_{θ_f} et P_{ϕ_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

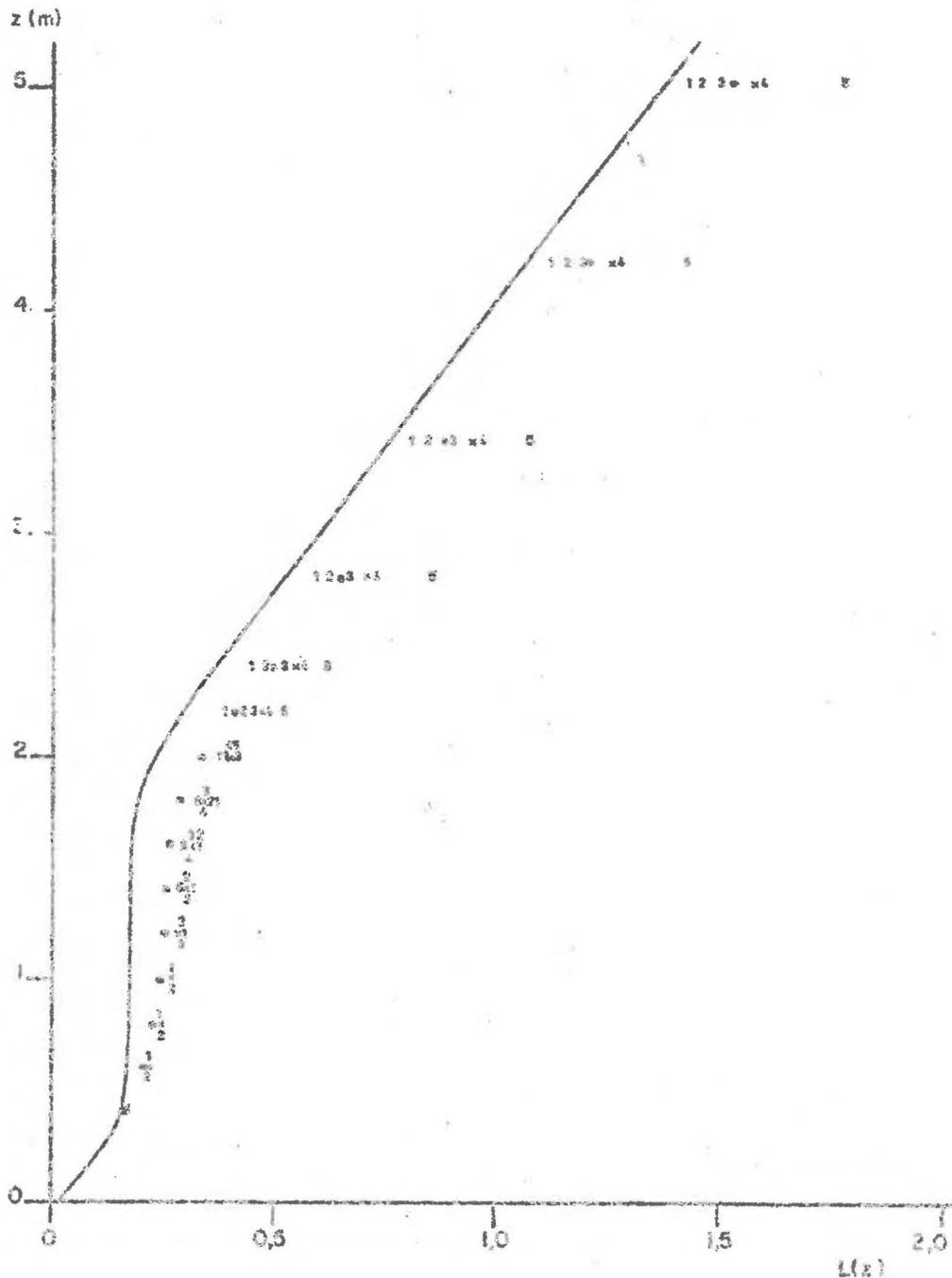


Fig. 44 - Profil des longueurs de mélange $L(z)$ obtenu pour les différents cas de calcul.

- Calcul général à partir de la mesure des probabilités p_θ in situ (tableau I), p_θ ayant été trouvé équiprobable
- x Equiprobabilité des normales
- Equiprobabilité des inclinaisons et des azimuts
- 1,2,3,4,5 Angle d'inclinaison identique pour toutes les feuilles étant respectivement de 0, 30, 45, 60, 90°.

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

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

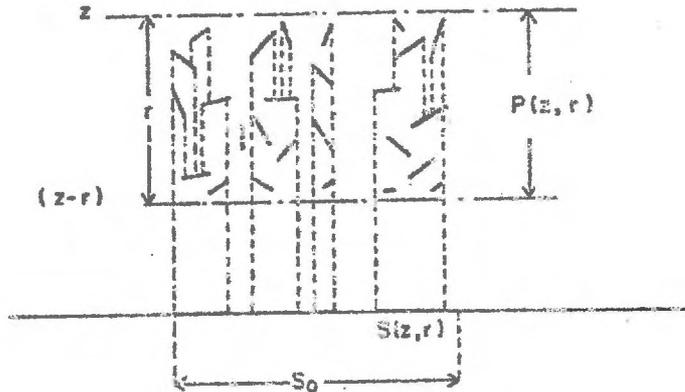


Fig.45 - Schéma représentatif de la fonction $P(z, r) = \Sigma S(z, r)/S$.

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 $P(r)$:

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

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 θ_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 θ_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)

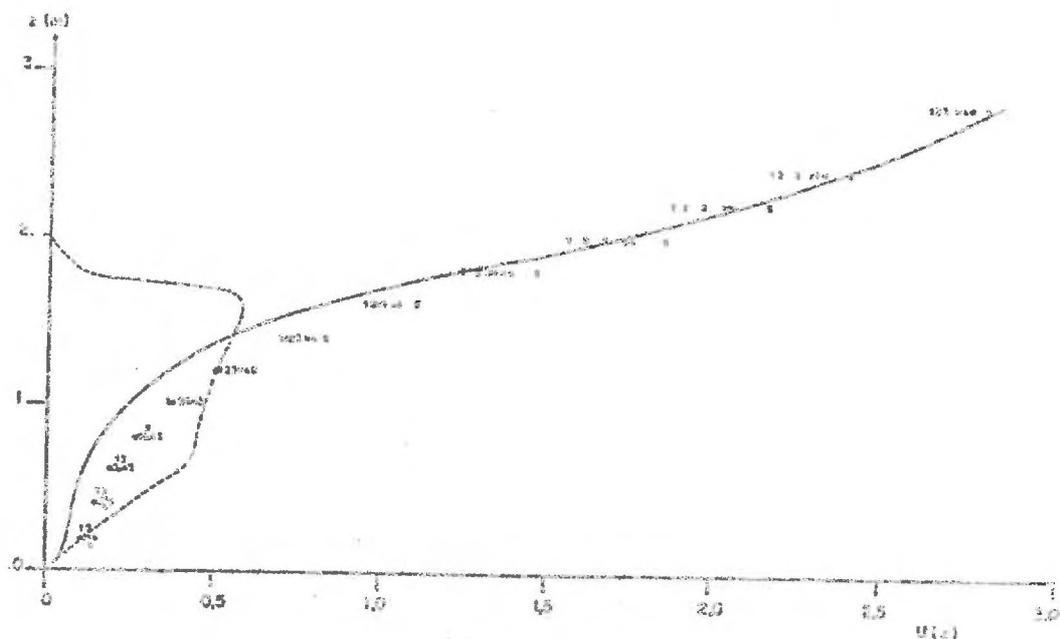
La solution la plus générale de $L(z)$ passe par un calcul spatial de la répartition des obstacles dont quelques hypothèses simplificatrices, très généralement vérifiées pour la plupart des couverts végétaux, permettent quelques simplifications des calculs (cf. par. II.4.2 a, b, c).

a) Comparaison des différentes solutions.

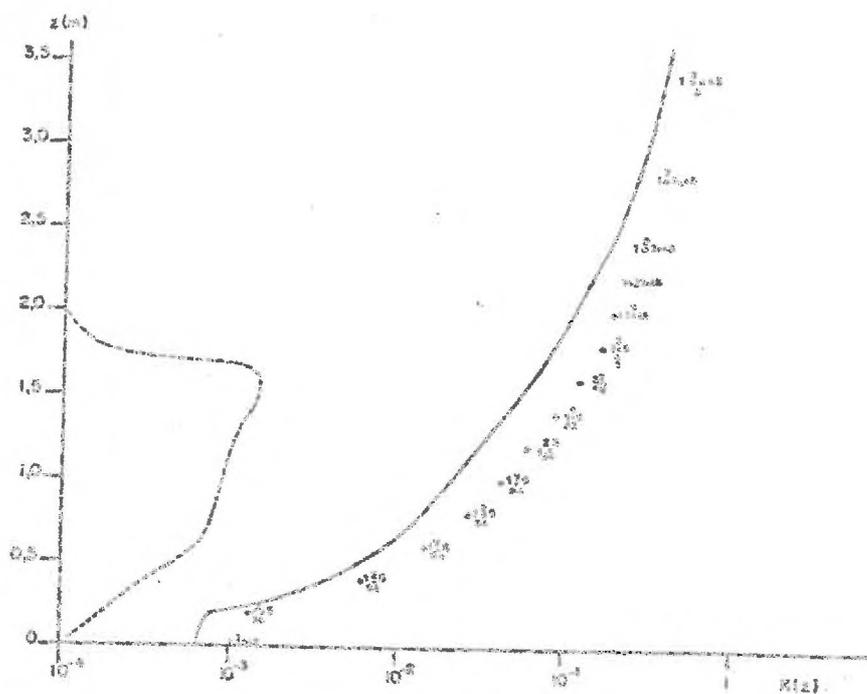
Pour un maïs (tableau I, cf. par. I.3.1.a) dont les densités de surface foliaire ont été mesurées non seulement par tranche de végétation mais encore, pour chaque tranche, par classe d'inclinaison, nous avons calculé les différents profils de longueur de mélange $L(z)$ (fig. 44) et ceux de vitesse du 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_θ et p_ϕ

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 Θ_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).

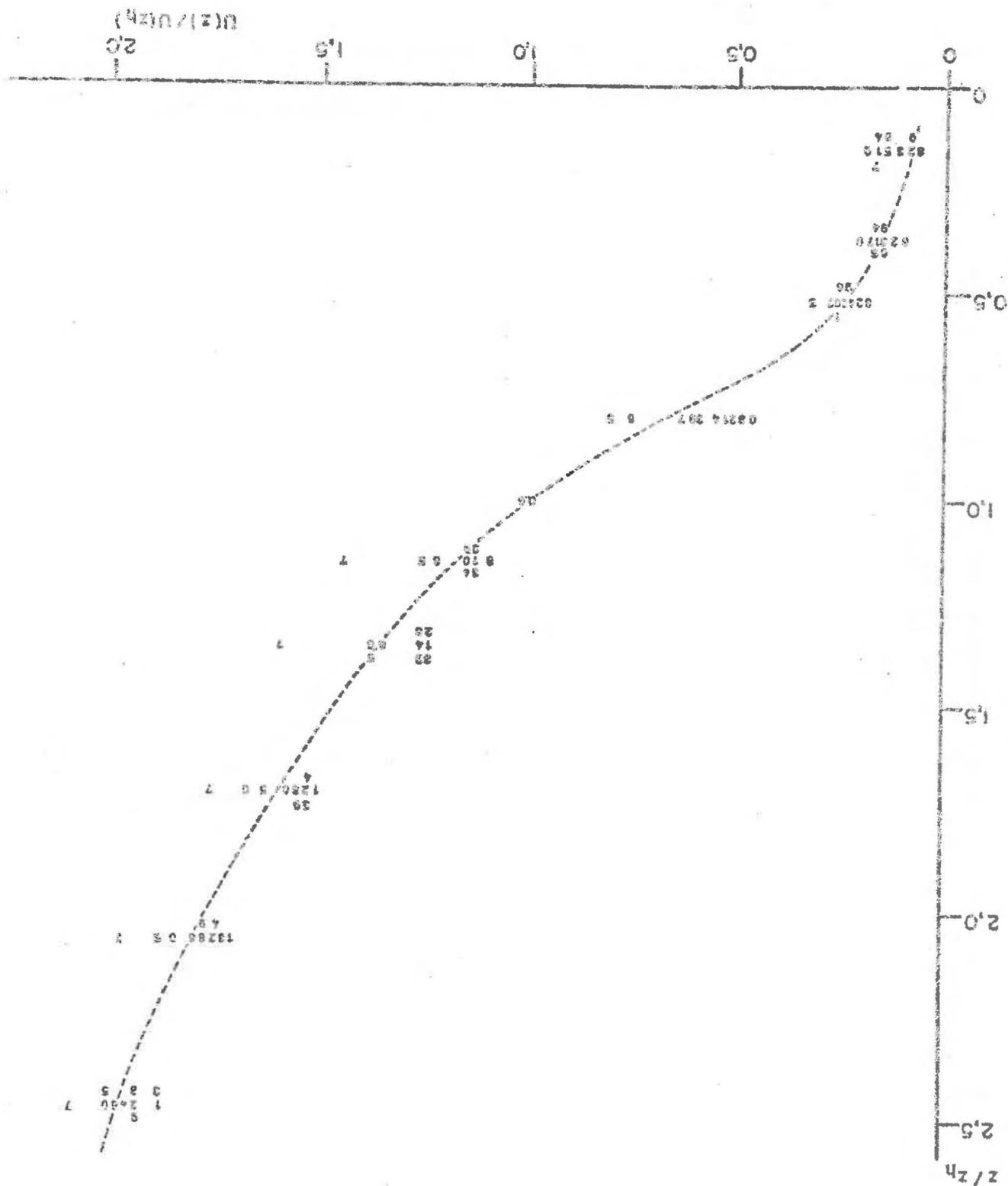
b) Comparaison entre profils calculés et mesurés

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 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 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).



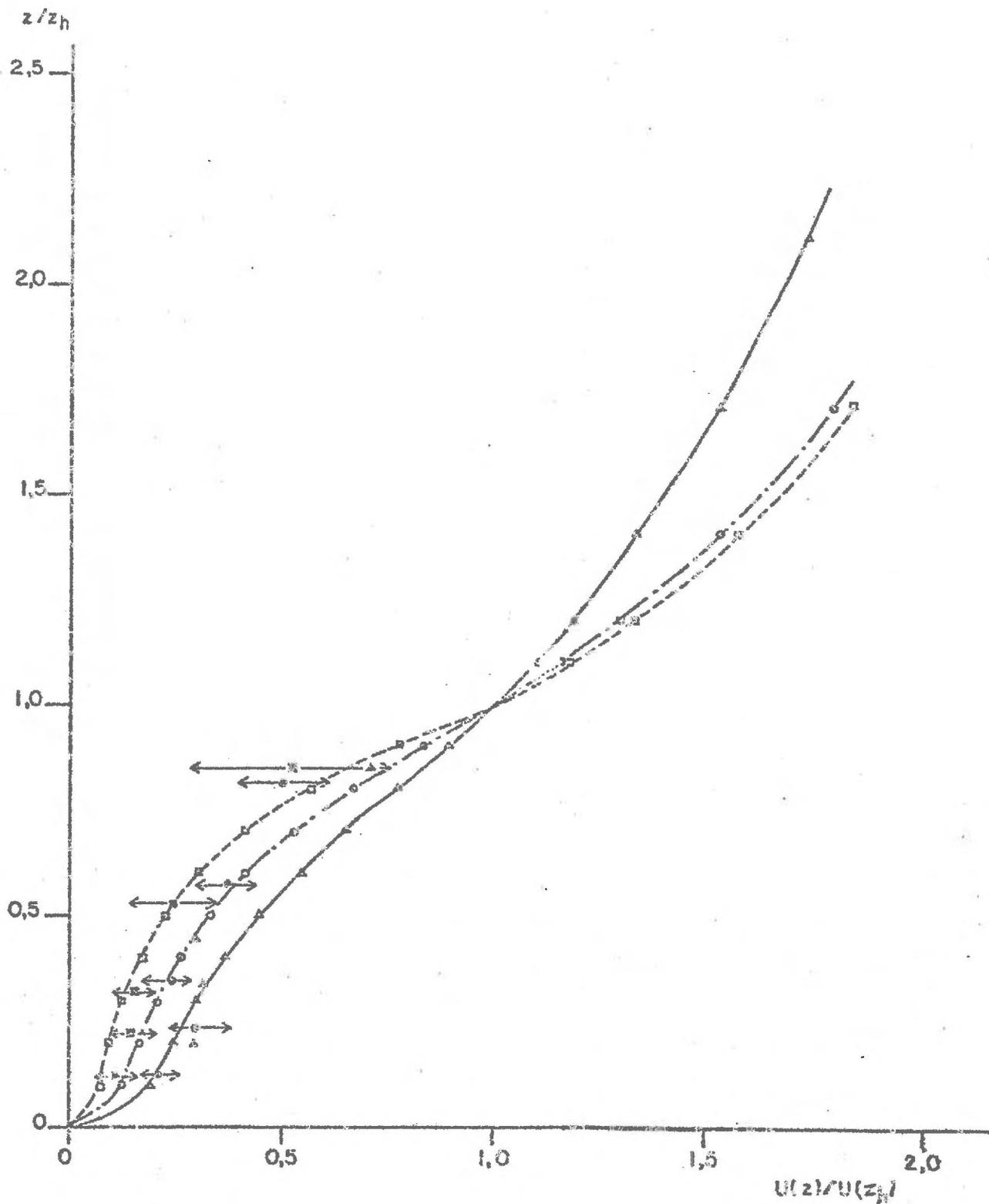


Fig. 49 - Profil de vitesse mesuré au sein du couvert pour trois stades du développement de la culture et profils calculés correspondant.

- Δ , Δ 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 modèlle 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 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 modèlle.

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 modèlle 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 modèlle 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);

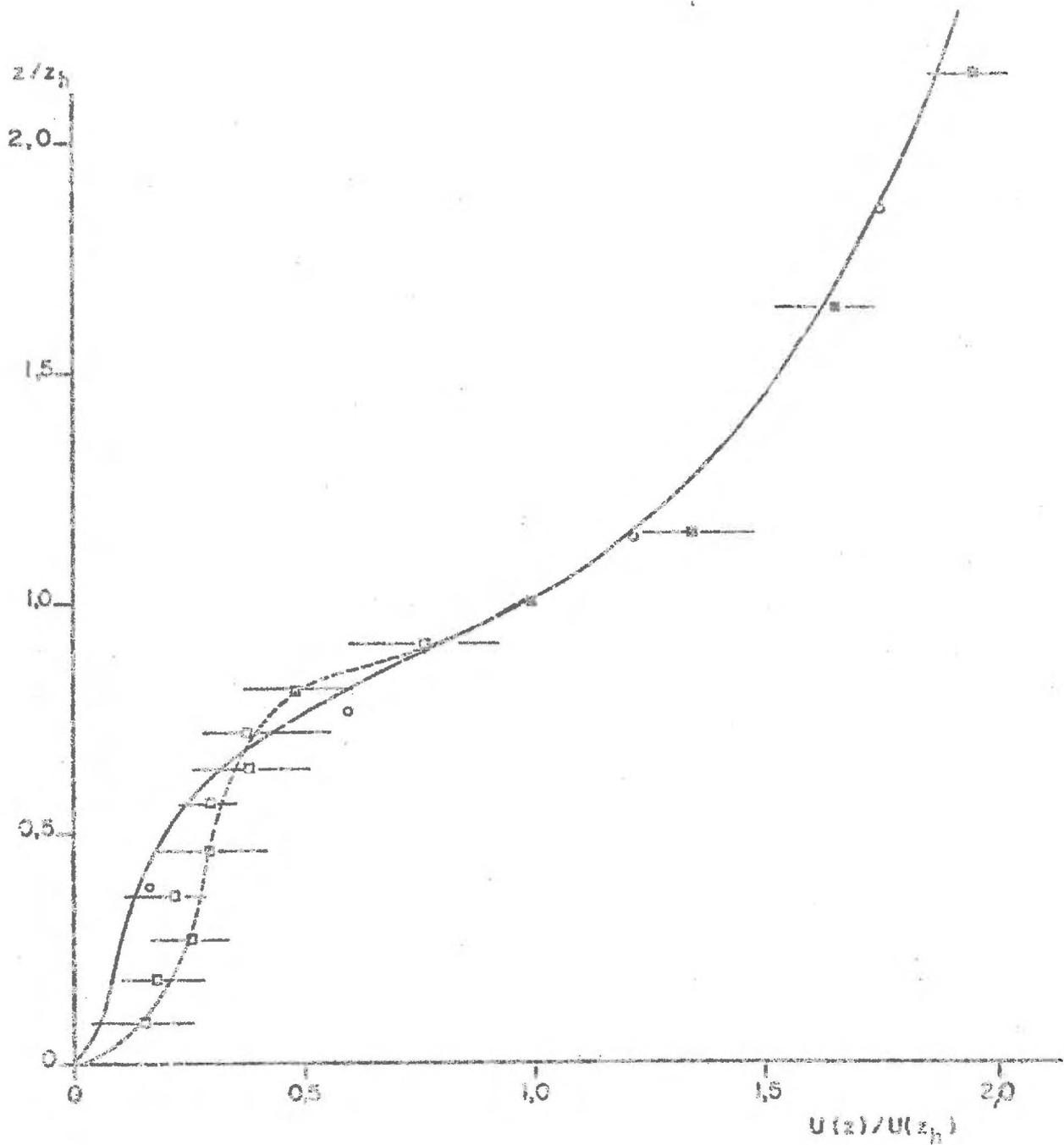


Fig. 50 - Profil de vitesse mesuré et calculé (blé - Bungendore Canberra - période du 11.7.73 et du 1.74 par fils chauds)

- 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 ex 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

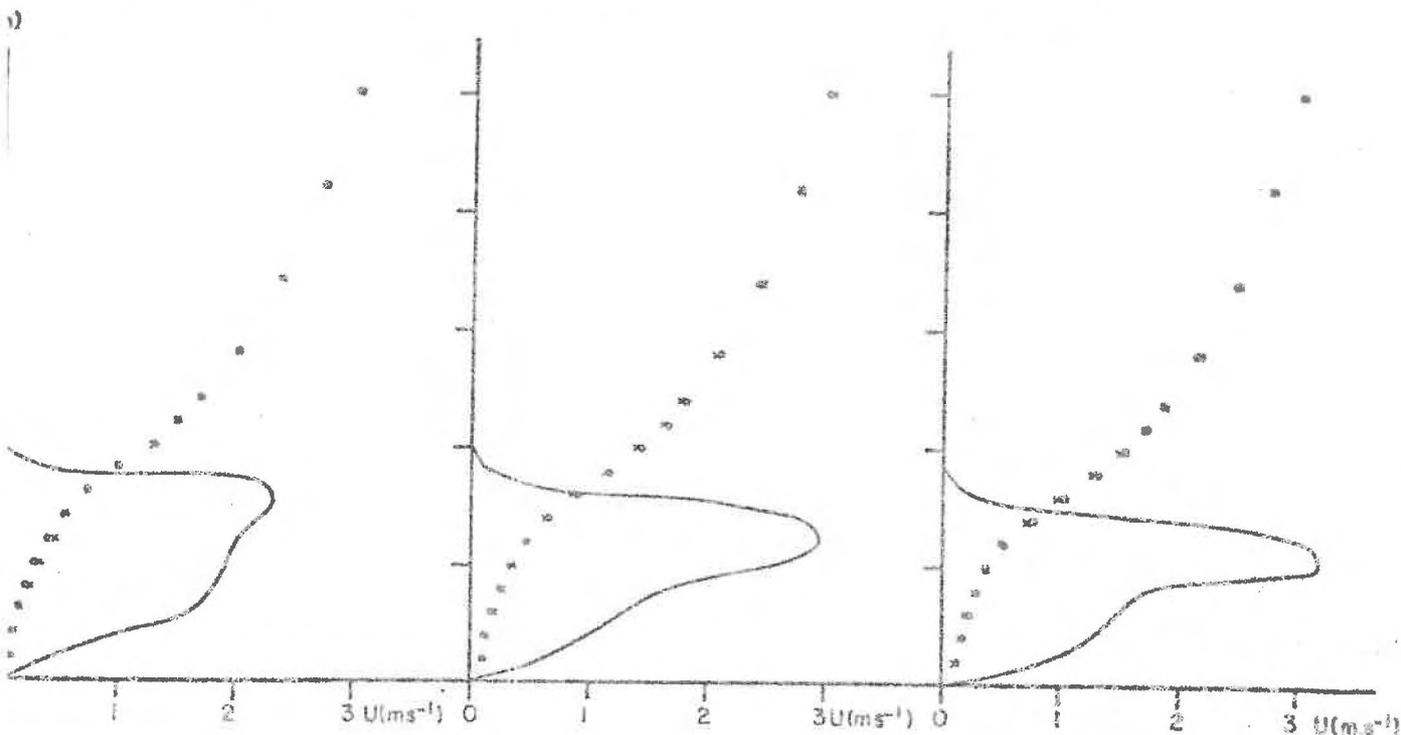
Il est nécessaire de noter que le profil $U(z)$ obtenu par le modèle n'est pas strictement un profil logarithmique, mais qu'il peut se mettre de façon plus exacte et plus précise que n'importe quel profil expérimental sous la forme logarithmique classique (rel. II,9 au II,22d) permettant de caractériser 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 m s^{-1} ces paramètres ont été calculés pour les différents couverts analysés entre les années 1969 et 1975 (tableau II).

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

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

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



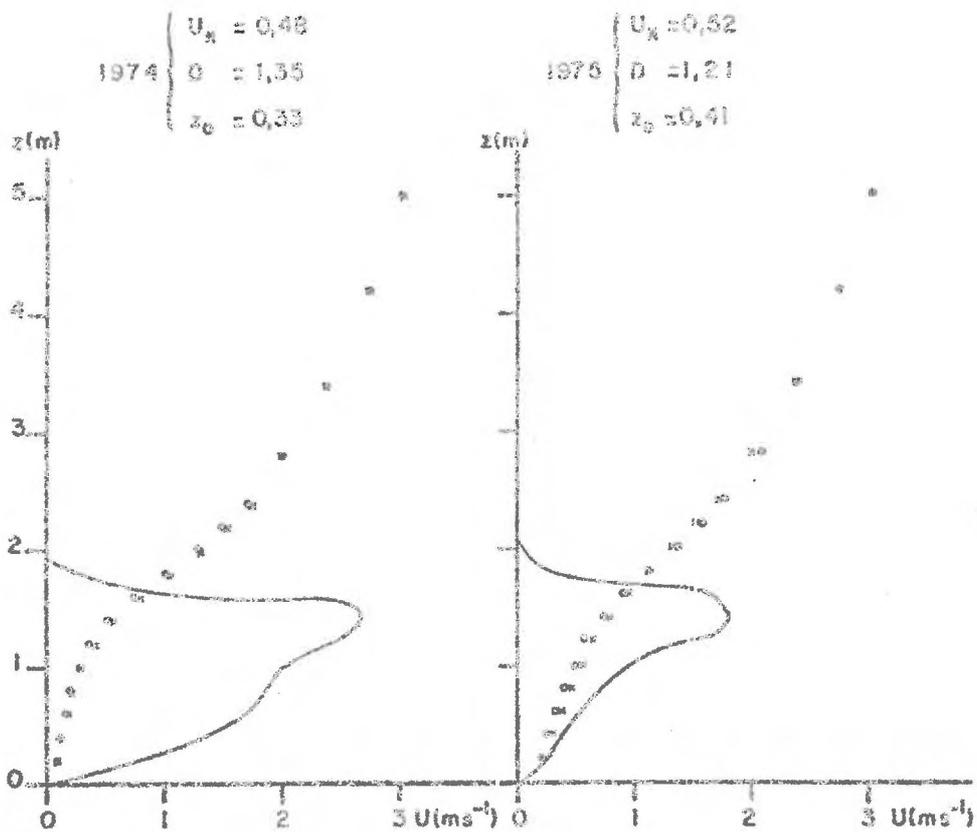
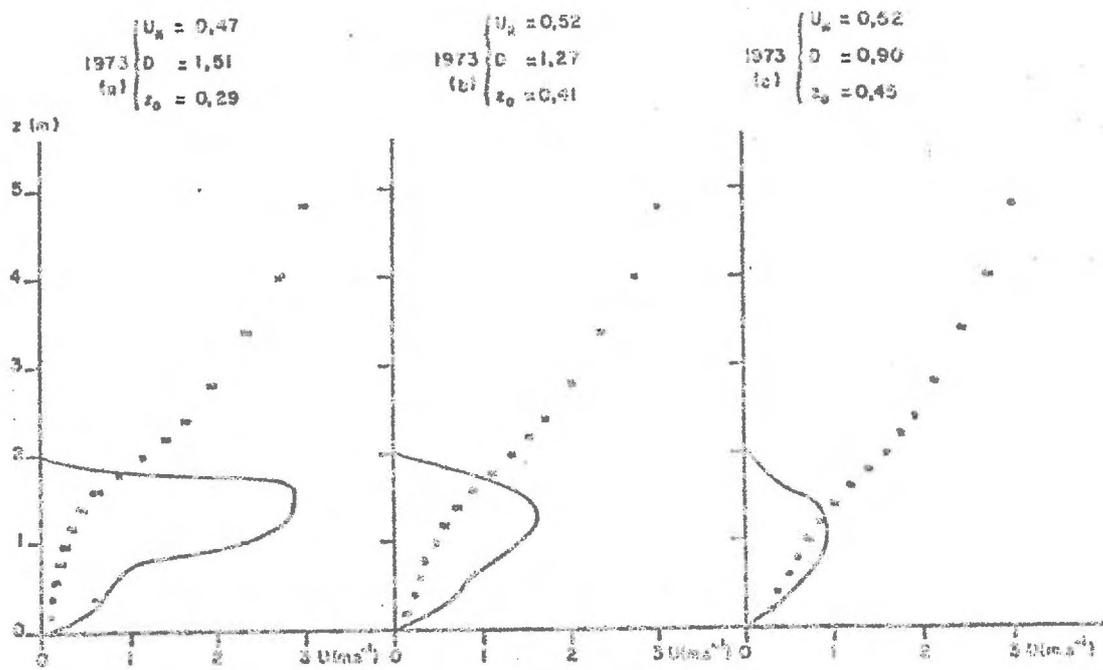


Fig. 51 - Résultats obtenus par le modèle pour les différentes cultures de maïs ($U(z_p = 5 \text{ m}) = 3 \text{ ms}^{-1}$)

- 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 |
| σ_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 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 $4 \text{ à } 5 \text{ m s}^{-1}$, 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