

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 MECANQUES :</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 MECANQUES</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 :

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

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'efficience 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

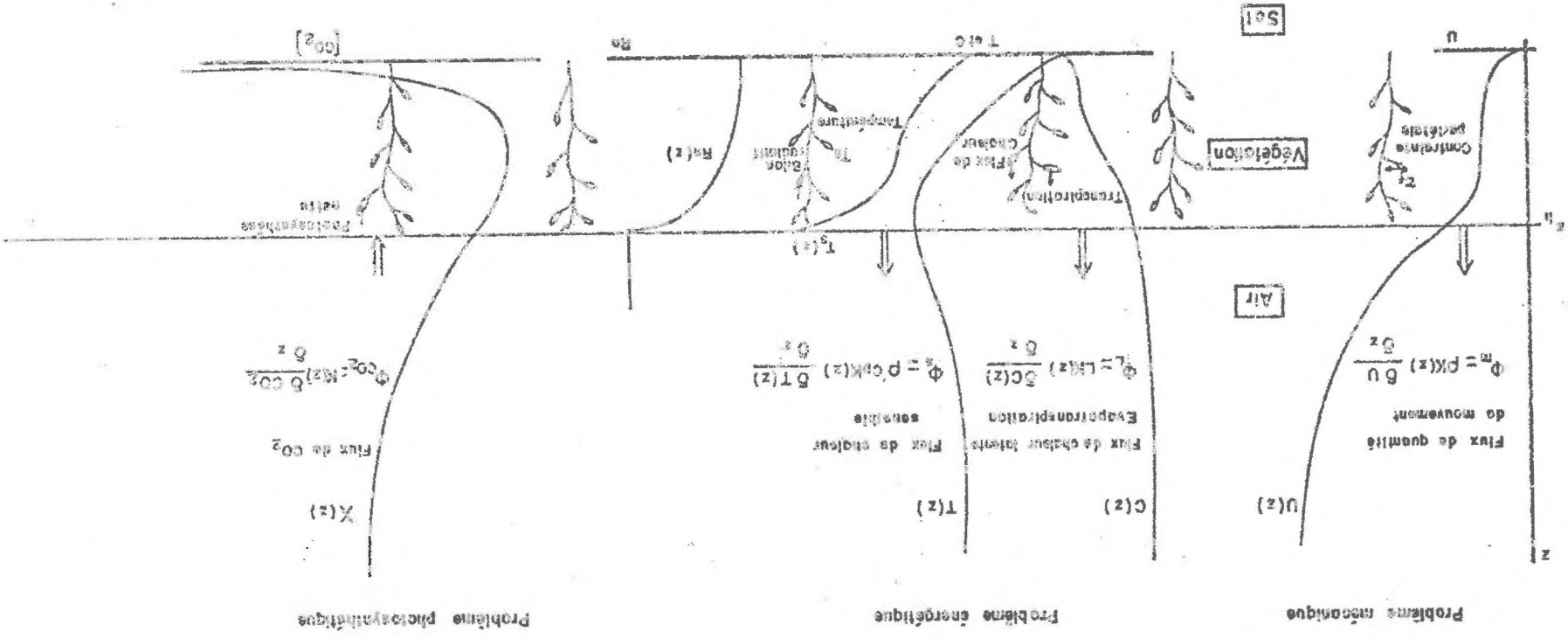


Fig. 1 - Schéma décrivant les principaux profils microclimatiques et les flux qui s'y rapportent.

a) Problème mécanique : $U(z)$ profil de vitesse de vent, $\Phi^m(z)$ flux de quantité de mouvement, τ_D contrainte pariétale 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, $R_s(z)$ profil de rayonnement net (bilan radiatif), $\Phi^s(z)$ flux de chaleur latente, $\Phi^s(z)$ 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.

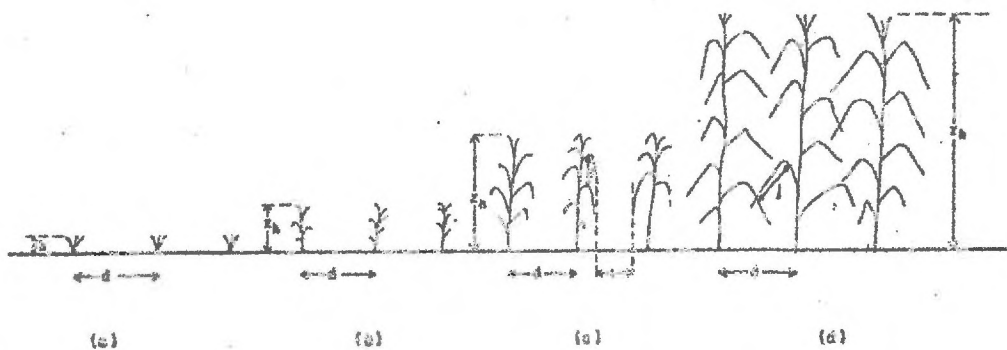


Fig. 2 - Schéma décrivant les différents cas d'hétérogénéité (a), (b), (c), le cas d'homogénéité (d) et les paramètres caractéristiques : (z_H) hauteur de la culture ; d distance entre deux rangs ; i espace sans feuille entre deux rangs ; j distance moyenne entre deux feuilles.

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 $m^2 m^{-2}$, 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

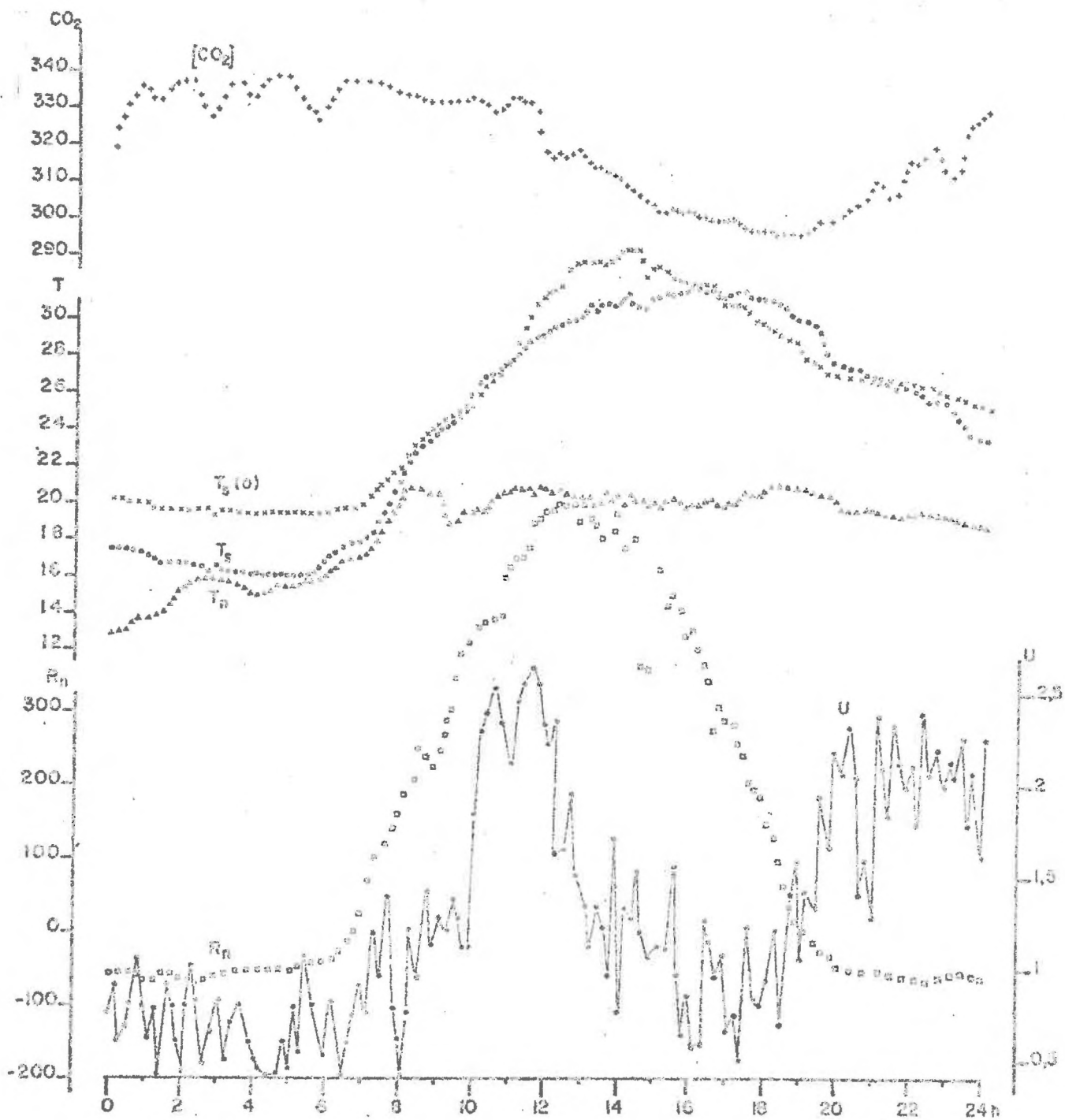


Fig.3 - Variation journalière typique des grandeurs climatiques à 3 m surdessus d'un couvert de maïs non couvrant d'environ 1,2 m de hauteur : gaz carbonique CO₂, température sèche T_s et humide T_h, vitesse du vent U, rayonnement net R_n et température de surface du sol (T_s^h(0)).

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).

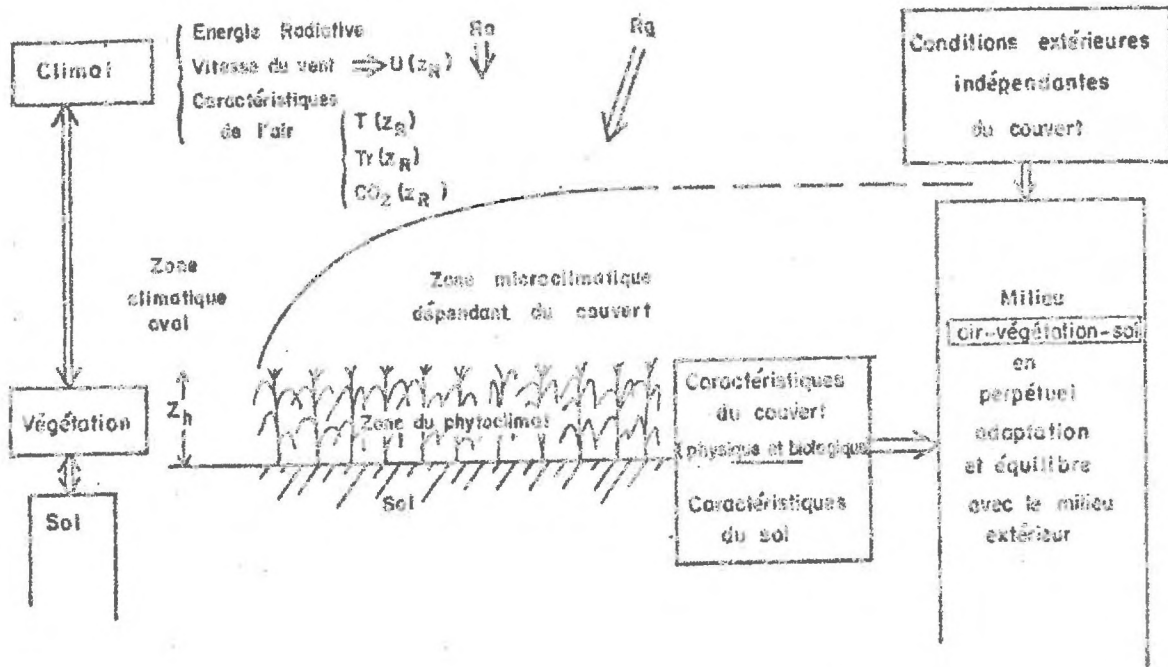


Fig.4 - Schéma descriptif du milieu air-végétation-sol et de ses interactions (R_a rayonnement atmosphérique et R_g rayonnement global).

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)

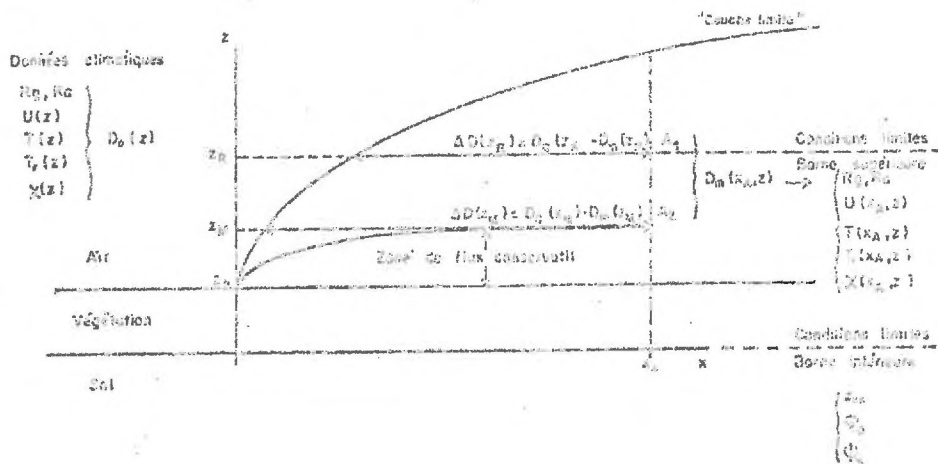


Fig.5 - Evolution des données climatiques au sein d'une "couche limite".
 $D_c(z)$ valeurs climatiques mesurées au niveau z
 $D_m(z)$ valeurs mesurées au niveau z au sein de la couche limite et pour une abscisse x_M
 ΔD écart climatique entre valeur vraie et valeur mesurée
 z_M niveau maximum de la zone 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 (JULLIEN 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

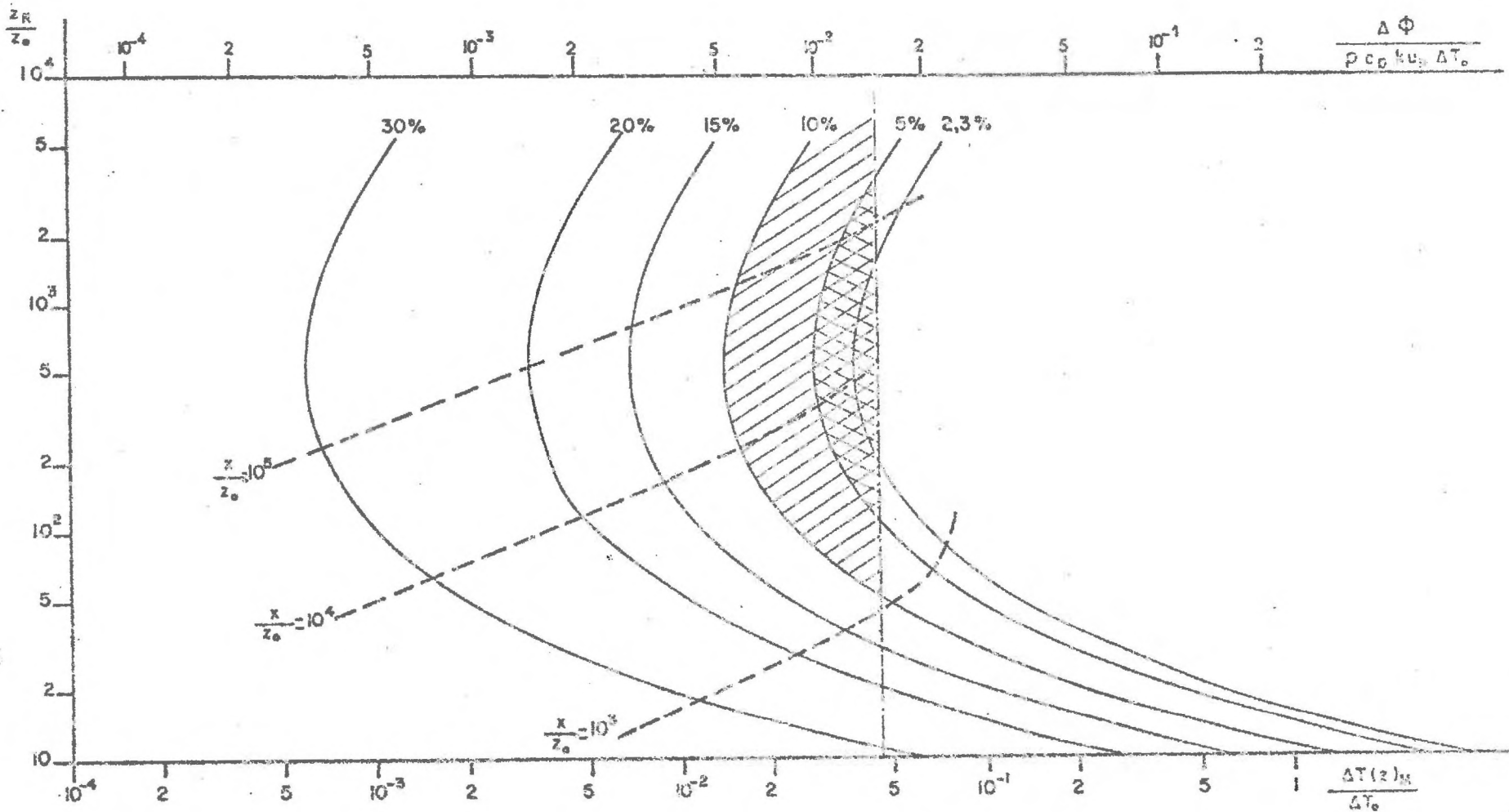


Fig.6 - Diagramme donnant en fonction du niveau de référence z_R et de la vitesse au bord d'attaque x :

- 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 AD_c sur les grandeurs climatiques (courbes en trait plein).

assimilées à celles mesurées au niveau de référence z_R . 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,

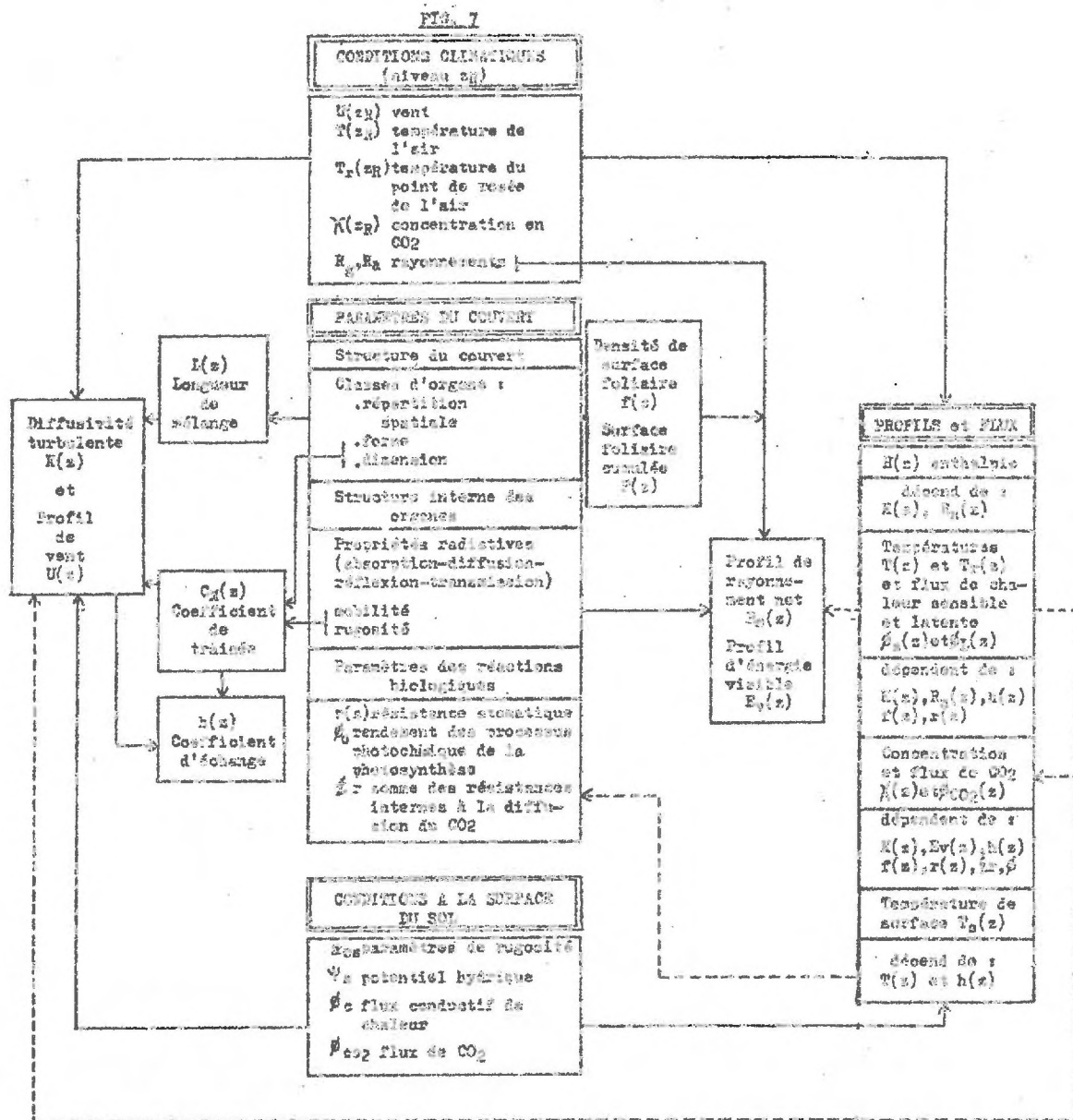


Fig. 7 - Diagramme général des actions et interactions entre conditions limites du modèle, paramètres du couvert et flux et profils recherchés.

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) :

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

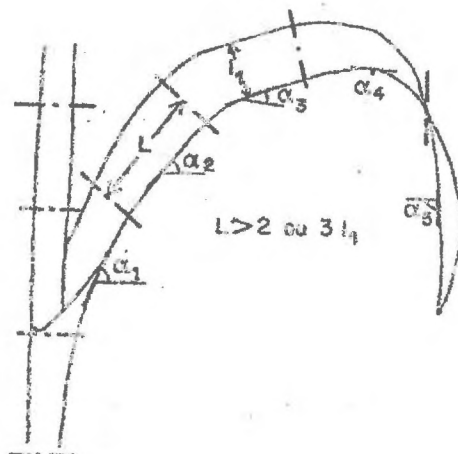


Fig. 8 - Illustration de la segmentation d'une feuille de maïs en fonction de diverses inclinaisons (l_1 largeur de la feuille, L longueur moyenne des éléments, α_1 angle d'inclinaison).

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

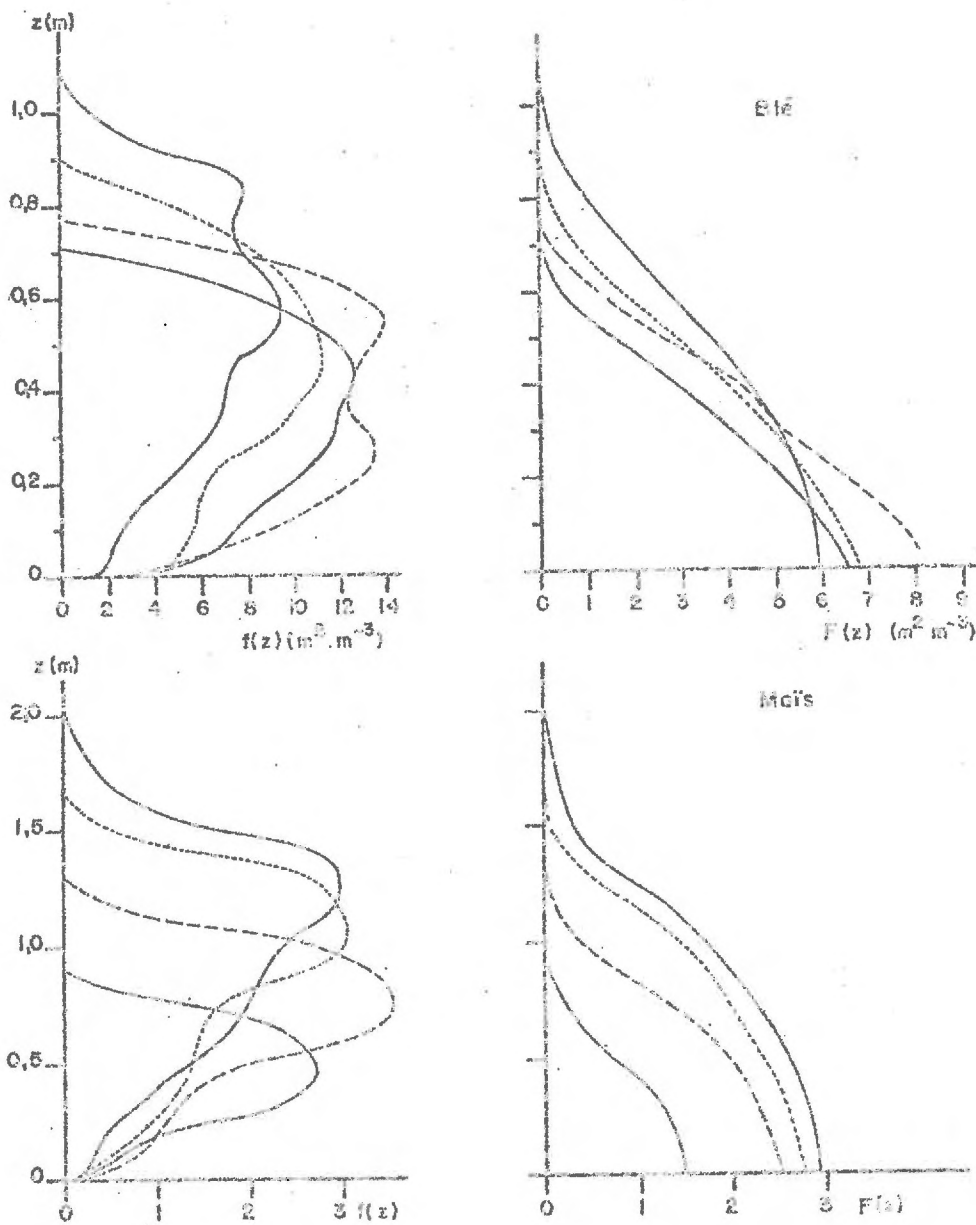


Fig.9 - Evolution en fonction du temps des densités de surface foliaire et des surfaces foliaires cumulées pour un blé (SUNGENDORF - CANNIERA) et un maïs (LA MINIERE - VERSAILLES)

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_n , 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_{n*} 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 , $T(z_R)$, $C(z_R)$.

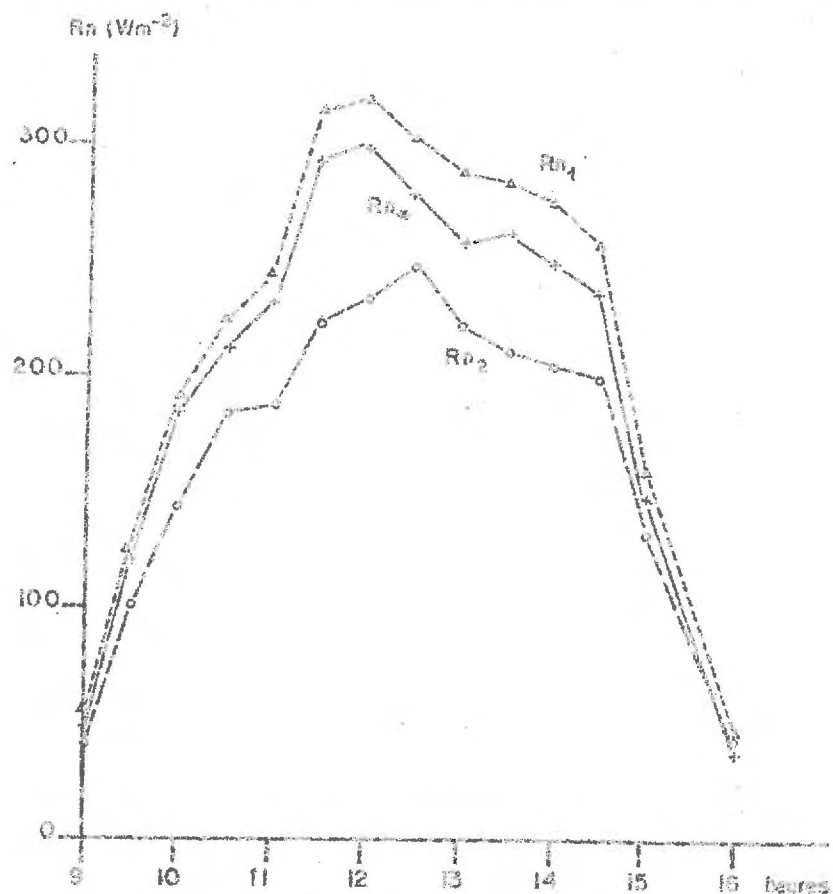


Fig. 10. - Comparaison entre l'évolution diurne du rayonnement net climatique R_{ncl} d'un sol nu et le rayonnement net vrai du même sol humide R_{n1} et sec R_{n2} . L'écart entre ces trois grandeurs est dû aux écarts entre les températures de surface résultant du bilan d'énergie (une correction due 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 CO_2

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, CHARPENTIER 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 CO_2 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.

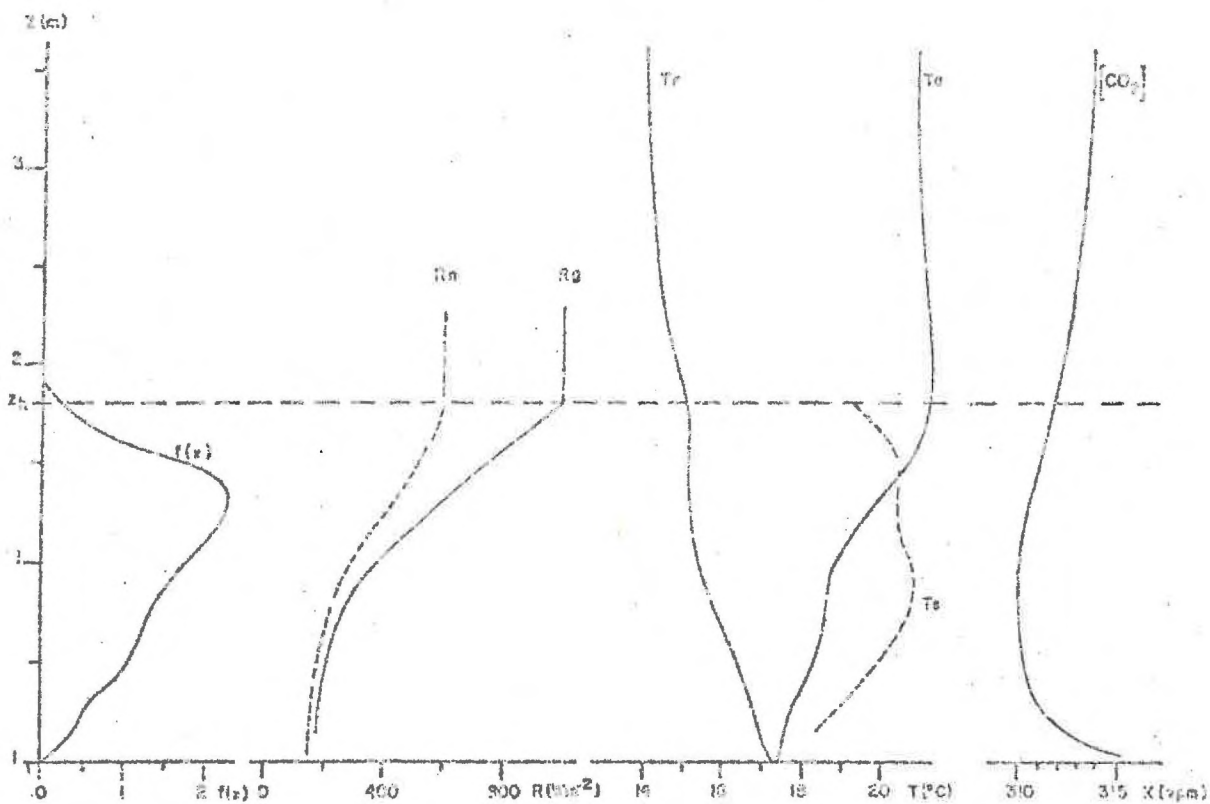


Fig.11. - Exemple de profils climatiques pour une culture de maïs de densité de surface foliaire $f(z)$.

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.

I.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.

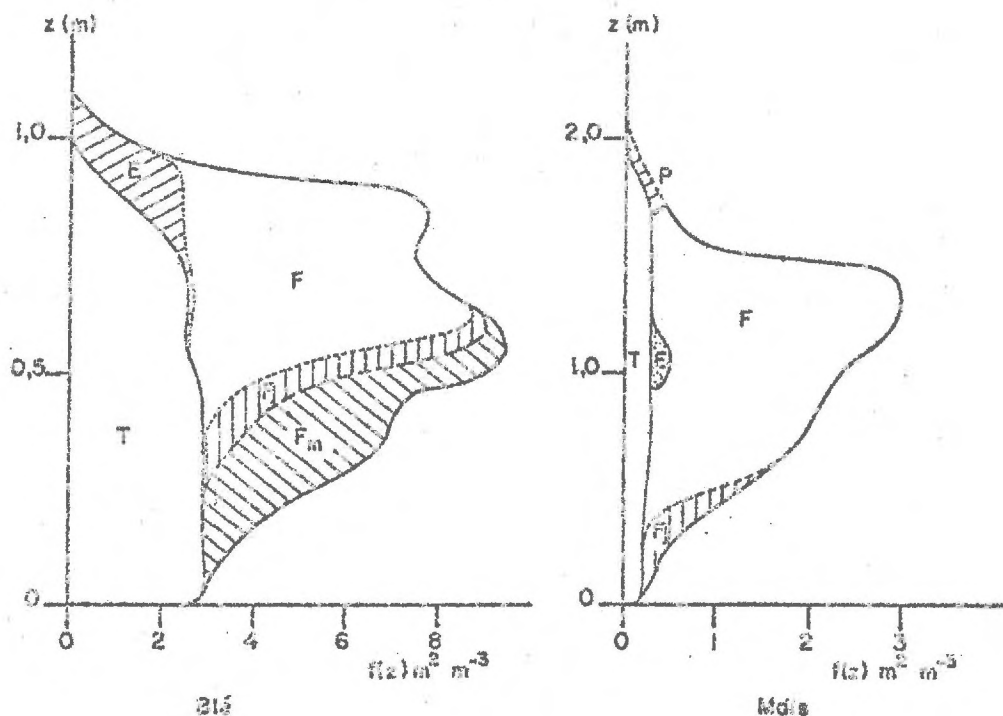


Fig.12- Illustration donnant les différentes classes d'organes intervenant dans le profil de densité de surface foliaire (blé le 9.11.73 à BUNGENDORE - CARRISERA et maïs le 9.9.71 à La Minière - VERSAILLES).
 E : épis ; P : panicule ; F : feuille ; Fj : feuille jaune
 Fm : feuille morte et sèche.

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).

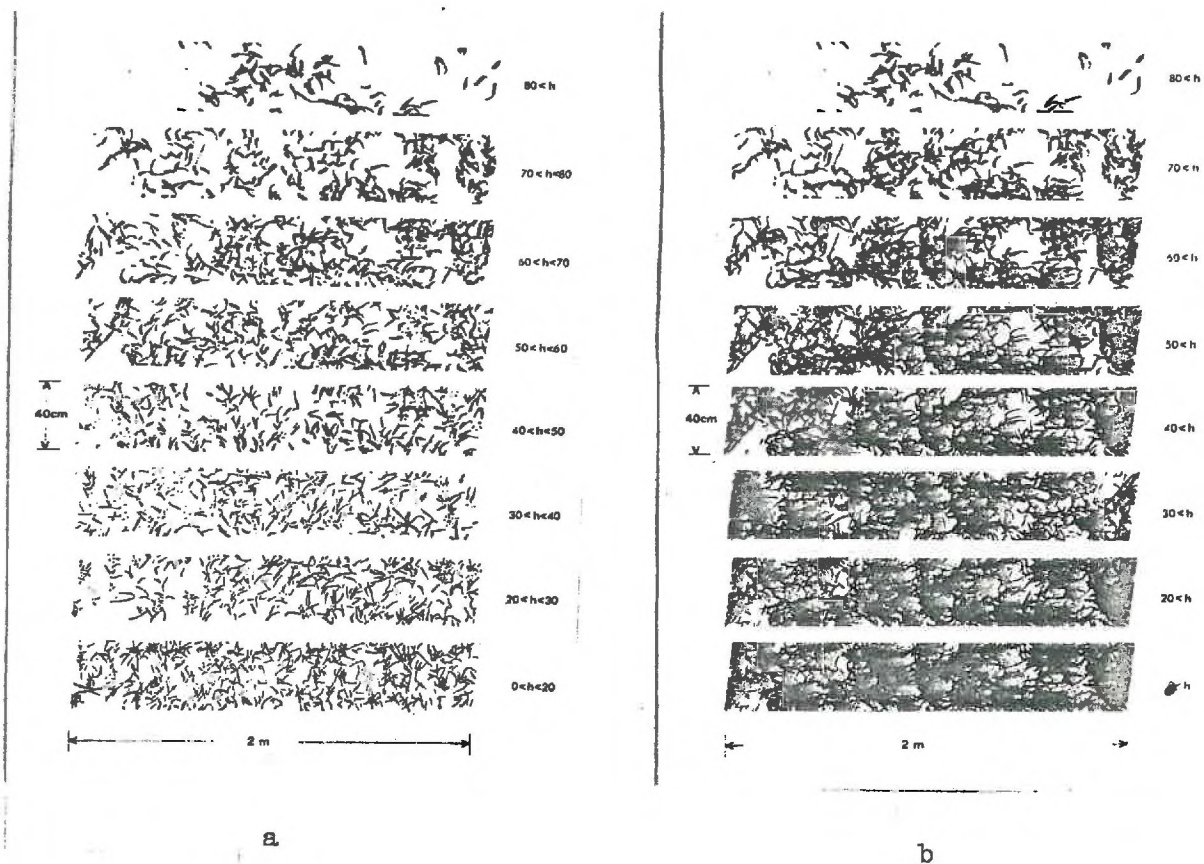


Fig.13 - a) Densité de surface foliaire en projection horizontale par tranche de 10. cm pour un blé (EUNGENDORE - CANBERRA).
 b) Reconstitution à partir des valeurs précédentes des surfaces foliaires cumulées, à partir du sommet jusqu'à un niveau Z variant de 10. en 10. cm.

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.

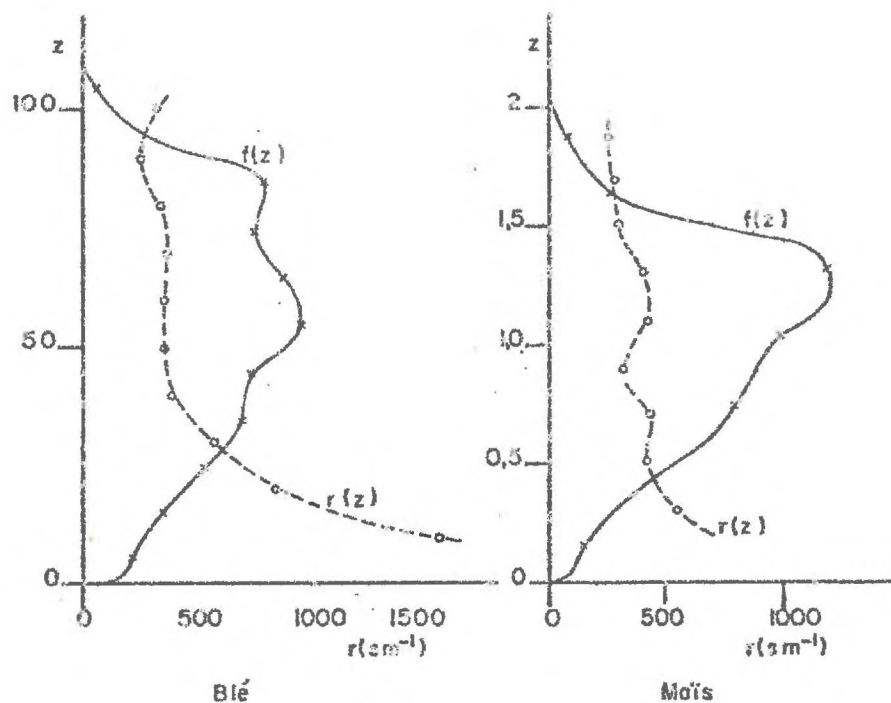


Fig.14 - Exemple de profils moyens de résistance stomatique (pris entre 11h et 15h) pour les deux cultures étudiées : un blé et un maïs.

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.

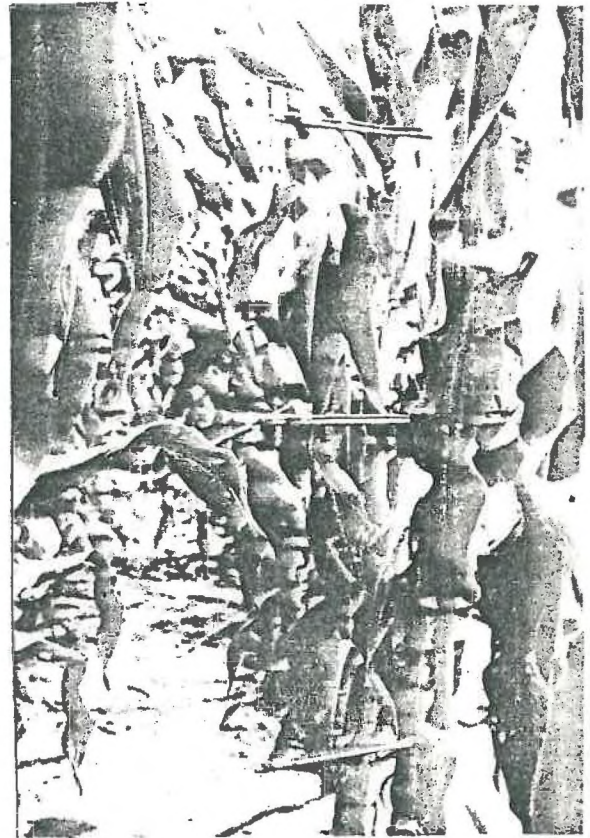
a) Mesure des profils microclimatiques

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} .

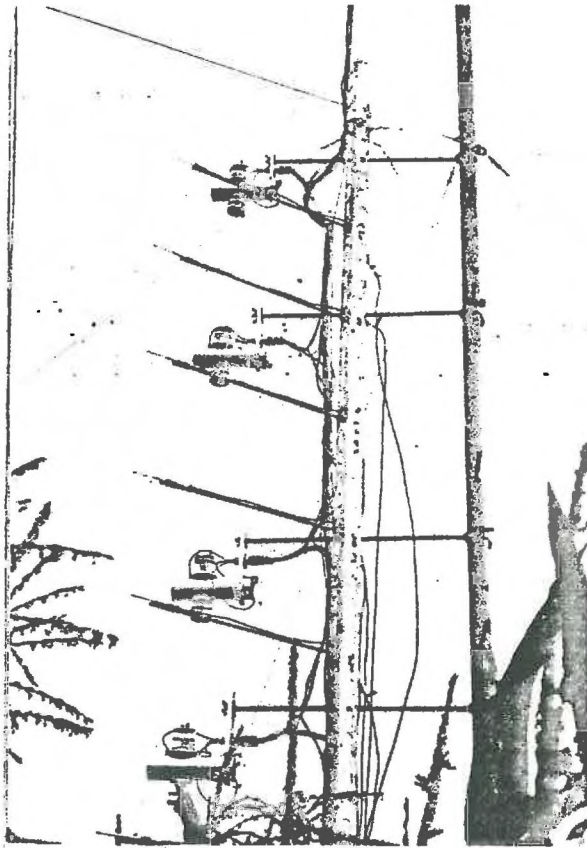


Fig.16 - Système de mesure des gradients de températures sèche et humide de l'air par psychrométrie (10 niveaux).

- 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