

ADTH4

I. N. R. A.

STATION DE BIOCLIMATOLOGIE
Centre de Recherche d'Avignon
84140 MONTFAVET FRANCE

BIBLIOTHÈQUE

THESE

présentée à

L' INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON

17 MARS 1988

pour obtenir le titre de

DOCTEUR - INGENIEUR

" Sciences Agronomiques "

**MODELISATION SPATIO-TEMPORELLE
DE LA DUREE D'HUMECTATION D'UN COUVERT VEGETAL
APRES UNE PLUIE**

par

Laurent HUBER

Ingénieur en agriculture de l'ESITPA

Soutenue le 13 novembre 1987 devant la commission d'examen :

- | | |
|------------------|-------------|
| Mrs. PERRIER, A. | Président |
| CHOISNEL, E.] | Rapporteurs |
| SAUGIER, B.] | |
| ITIER, B.] | |
| RAPILLY, F.] | Examineurs |
| WEHRLIN, J.M.] | |

1954

THESE

présentée à

L' INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON

pour obtenir le titre de

DOCTEUR - INGENIEUR

" Sciences Agronomiques "

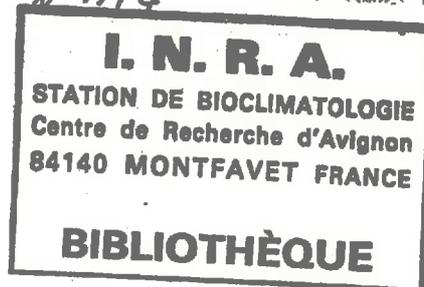
MODELISATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA DUREE D'HUMECTATION D'UN COUVERT VEGETAL APRES UNE PLUIE

17 MARS 1988

par

Laurent HUBER

Ingénieur en agriculture de l'ESITPA



ADTH4

Soutenu le 13 novembre 1987 devant la commission d'examen :

Mrs. PERRIER, A.	Président
CHOISNEL, E.]	Rapporteurs
SAUGIER, B.]	
ITIER, B.]	
RAPILLY, F.]	Examineurs
WEHRLIN, J.M.]	

I. N. R. A.
BIBLIOTHÈQUE
MONTPELLIER

1014

AVANT PROPOS

Le travail présenté ici a été effectué au sein de la station de Bioclimatologie du centre INRA de Paris-Massy-Grignon. Les campagnes de mesures se sont déroulées sur le domaine expérimental de La Minière, en relation avec les stations de Pathologie Végétale et de Lutte Biologique.

Je tiens à remercier tous ceux et celles qui ont participé à ce travail par leurs conseils ou leur aide matérielle.

En particulier, je veux remercier Monsieur ITIER, Directeur de la station de Bioclimatologie de Grignon pour m'avoir donné les moyens de mener à bien cette thèse, et pour m'avoir accordé largement de son temps à toutes les étapes de ce travail et surtout lors de la rédaction du manuscrit.

Je tiens à remercier Monsieur PERRIER, Professeur de Bioclimatologie à l'Institut National Agronomique qui a bien voulu m'accueillir comme étudiant en thèse dans son laboratoire ; je souhaite également remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à ce travail et les critiques qu'ils ont pu formuler :

Monsieur CHOISNEL, Ingénieur en Chef de la Subdivision d'Agrométéorologie de la Direction de la Météorologie Nationale ;

Monsieur RAPILLY, Président du Centre INRA de Versailles et spécialiste de l'épidémiologie végétale ;

Monsieur SAUGIER, Professeur d'Ecologie Végétale à l'Université de Paris-Sud ;

Monsieur WEHRLLEN, Responsable du service d'Agrométéorologie à l'ACTA.

Pour leurs conseils amicaux et leur grande disponibilité, je suis très redevable à Pierre CELLIER, Daniel POUDROUX et Robert GOUJET qui m'ont fait profiter de leurs compétences techniques ; lors des campagnes de mesures, j'ai pu apprécier l'aide de Maurice BACH et Dominique RENARD et je les en remercie.

Je dois à Messieurs FARGUES, FELIX et GOSSELIN de m'avoir accueilli sur le domaine de La Minière et offert de nombreuses facilités dans la mise en place des expérimentations ; qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements.

Je remercie également Madame LAMARQUE et Marc LECONTE qui m'ont initié aux aspects théoriques et pratiques de l'épidémiologie végétale.

Ma gratitude va à Jacqueline MISERY qui s'est chargée de la dactylographie, à Sylvie MASSON qui a réalisé une grande partie des graphiques et à Marina PAVLIDES toujours réceptive à mes demandes de documentation.

Enfin, je suis reconnaissant à tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ces trois années, en particulier à Bernard ITIER, Nader KATERJI, Jean-Paul LHOMME, Marc ROUGIER, Andrée TUZET, Olivier BETHENOD, Bruno ZELLER.

ABSTRACT

This study proposes a one-dimensional multi-layers model of heat and mass transfer to estimate leaf wetness duration in a plant canopy after a rainfall. The wetness duration (which is difficult to measure because of sensors maintenance and spatial variability) is a very effective factor in the prediction of specific fungi diseases. The persistence of surface water during a minimal period of time is often required for spore germination and infection phases.

The intercepted water by the canopy, the profile of leaf area density are two parameters of value for simulating the evolution of the surface wetness in the canopy. An original aspect of the study consists of the water resorption on leaves (from laboratory measurements) considering the decrease of surface and thickness of the wet areas.

Field tests of model performance for field beans (Vicia faba) are presented (the surface wetness was obtained by artificial irrigation of the crop using sprinklers). During humid and cloudy weather, wetness durations for 10 hours can be obtained from the model in the lower part of the cover, according to visual assessment. Having hourly micrometeorological data (forcing variables measured at a reference height above the cover) for air temperature, relative humidity, wind speed, rainfall, this model predicts the variations of wetness duration at different levels of the canopy. Therefore it contributes to the epidemics prediction and to plant disease warning systems.

KEY-WORDS : wetness duration, multi-layers model, prediction, canopy, field beans, Vicia faba.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Studie stellt eine Abschätzungsmethode für die Benetzungsdauer eines Pflanzenbestandes nach einem Regen mit Hilfe eines mehrschichtigen Modells des Massen- und Energietransportes dar. Die Benetzungsdauer deren Messung schwierig ist (Aufrechterhaltung der Sensoren, räumliche Repräsentativität der Messungen) spielt eine entscheidende Rolle in der Ansteckungsphase (Keimung der Sporen und Infektion der Pflanze) des Wirtes durch zahlreiche phytopathogene Pilze ; tatsächlich ist der Erfolg der Ansteckung oft durch das Vorhandensein von freiem Wasser auf den Blattoberflächen während eines minimalen Zeitraumes bedingt.

Die von der Vegetation interzerptierten Wassermenge sowie das Profil der Dichte der Blattoberflächen sind zwei begrenzende Faktoren um die Entwicklung des Benetzungszustandes der Vegetation abzuschätzen. Ein neuer Aspekt der Studie besteht in der Art der Wasserverdunstung auf den Blättern (nach Laboratoriumversuchen).

Dieses Modell wird mit experimentellen Daten getestet, die in Feldversuchen an einer Kultur von Vicia faba gewonnen wurden (künstliche Benetzung des Pflanzenbestandes durch Beregnungsanlagen). Bei feuchtem und bedecktem Wetter kann die berechnete Benetzungsdauer im unteren Teil der Kultur 10 Stunden erreichen in Übereinstimmung mit den Messungen. Wenn man mikroklimatische stündliche Daten heranzieht (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, Niederschlagsmengen) kann das vorgeschlagene Modell die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Benetzung vorhersehen und stellt somit eine Methode der Voraussage von epidemischen Risiken und der Entwicklung von landwirtschaftlichen Warnsystemen dar.

SCHLUSSELWÖRTER : Benetzungsdauer, mehrschichtiges Modell, Pflanzenbestand, Pferdebohne, Vicia faba.

ملخص عن موضوع البحث

من المعروف ان تبلل النبات بعد هطول المطر يلعب دوراً في انتشار عدة أنواع من
في اغلب الأحيان ويحدد الماء على الارتفاع او الثمار عدة وصنفة هو شرط اساسي للمرض

الغاية من هذه الدراسة هو تقديم طريقة لقياس تبلل النبات بعد هطول الماء
نموذج (موديل) فيزيائي. هذا النموذج يعتمد على قوانين انتقال الحرارة والغازات
الغطاء النباتي والجو. الطريقة المقترحة تسمح بالاستفاد من استعمال أجهزة
العادية التي تكون عادة سريعة الخطى.

النموذج الفيزيائي المقترح يعتمد على عدة عوامل:

العامل الاول يتعلق بالعناصر المناخية في الحقل (درجة الحرارة، درجة الرطوبة،

كمية الإشعاع)

العامل الثاني يتعلق ببنية توزيع السامة الورقية في الغطاء النباتي

العامل الثالث يتعلق بكمية مياه المطر المترسبة على اوراق الغطاء النباتي

العامل الرابع يتعلق بطريقة تبخر الماء من اوراق النبات خصوصاً ما

تلعب دوراً في تقلص المناطق للبلل وبمحاكاة الماء المترسبة على الارتفاع

التجارب التي اتمتت بالحقل على نبات البقول اظهرت اولاً ان مدة

النبات عموماً ان يقلل الى حوالي 10 ساعات، ثانياً ان مدة تبلل اوراق

المحسوبة بالنموذج الفيزيائي تقابل تقريباً مدة تبلل اوراق النبات

بأجهزة القياس العادية.

في النهاية على اعتبار النموذج الفيزيائي المقترح كوسيلة فعالة

وقاية النبات من الأمراض

LISTE DES SYMBOLES

- A : sous-déterminant intervenant dans le calcul de flux
- B : coefficient d'extinction dans le calcul du profil de rayonnement net
- C_m : coefficient de trainée
- C_{max} : épaisseur d'eau maximale retenue par les feuilles (mm)
- Cumul(i,t) : hauteur de précipitation incidente dans la strate i pendant le pas de temps t.
- d : dimension caractéristique des feuilles (m)
- D : hauteur de déplacement du plan de référence (m)
- D_s : dimension caractéristique des mottes à la surface du sol (m)
- D.H. : durée d'humectation (h)
- e_a, e_s : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ou à la limite d'une surface (mb)
- E_c : écoulement (mm)
- E_g : égouttement (mm)
- E_g(i,t) : hauteur de précipitation s'égouttant de la strate i
- f : densité moyenne de surface foliaire pour le couvert (m².m⁻³)
- f(z) : densité de surface foliaire (m².m⁻³)
- f_i : fonction de pondération de la résistance stomatique
- f_D, f_V : forces de trainée (F = f_D + f_V)
- F(i,j) : fonction cumul d'indices foliaires de la strate i à la strate j comprise
- F(z) : fonction cumulative d'indice foliaire (m².m⁻²)
- G : flux de conduction dans le sol (W.m⁻²)
- G(i,j) : fonction de répartition des précipitations
- h_c, h_v : coefficient d'échange pour la chaleur et la vapeur (m.s⁻¹)
- H_c, H_r : hauteurs du couvert et de référence (m)
- H_d(j) : flux de chaleur sensible issu de la zone sèche de la strate j (W.m⁻²)
- H_i : flux de chaleur sensible de la sous-strate i (W.m⁻²)
- H_{inf}(j) : flux de chaleur sensible issu des faces inférieures des feuilles de la strate j (W.m⁻²)
- H_w(j) : flux de chaleur sensible issu de la zone mouillée de la strate j (W.m⁻²)
- i : indice de sous-strate
- I_b, I_n : interceptions brute et nette (mm)

- j : indice de strate
 J_i, J_i^* : termes intermédiaires dans le calcul des flux relatifs à sous-strate i
 k : constante de Karman (0,41)
 k^* : coefficient d'extinction du rayonnement global
 K_c, K_m, K_v : diffusivités turbulentes pour la chaleur, la quantité de mouvement et la vapeur ($m^2 \cdot s^{-1}$)
 L : chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J \cdot kg^{-1}$)
 LAI : indice foliaire ($m^2 \cdot m^{-2}$)
 $LEd(j)$: flux de chaleur latente issu de la zone sèche de la strate j ($W \cdot m^{-2}$)
 LEi : flux de chaleur latente de la sous-strate i ($W \cdot m^{-2}$)
 $LEinf(j)$: flux de chaleur latente issu des faces inférieures des feuilles de la strate j ($W \cdot m^{-2}$)
 $LEw(j)$: flux de chaleur latente issu de la zone mouillée de la strate ($W \cdot m^{-2}$)
 n : nombre de strates du couvert (y compris la strate sol)
 P_b, P_d, P_n : précipitations brute, directe, nette (mm)
 p' : dérivée de la courbe de pression de vapeur saturante ($mb \cdot K^{-1}$)
 q : indice
 $q(z)$: humidité spécifique à l'altitude z
 q^* : facteur d'échelle dans le calcul de l'humidité spécifique
 $Q(j,t)$: quantité d'eau dans la strate j à l'instant t (kg)
 r : rayon d'une goutte (m)
 $Ra(j)$: résistance aérodynamique entre 2 strates ($s \cdot m^{-1}$)
 R_{cd}, R_{ci}, R_{cw} : résistances pour la chaleur au niveau des feuilles
 R_{vd}, R_{vi}, R_{vw} : résistances pour la vapeur au niveau des feuilles
 $R_g(z)$: rayonnement global ($W \cdot m^{-2}$)
 $R_n(z)$: rayonnement net ($W \cdot m^{-2}$)
 R_{solc}, R_{solv} : résistances de couche limite pour la chaleur et la vapeur au niveau du sol ($s \cdot m^{-1}$)
 R_s : résistance stomatique (R_{sts} et R_{sti}) ($s \cdot m^{-1}$)
 R_{ss} : résistance au transfert de vapeur à la surface du sol. ($s \cdot m^{-1}$)
 R_{sim}, R_{siM} : résistances stomatiques minimale et maximale des faces inférieures des feuilles ($s \cdot m^{-1}$)
 R_{ssm}, R_{ssM} : résistances stomatiques minimale et maximale des faces supérieures des feuilles ($s \cdot m^{-1}$)
 s : surface d'une goutte (m^2)
 $Stock(j,t)$: hauteur de la lame d'eau dans la strate i à la fin du pas de temps t (mm)

- $T_a(z)$: température de l'air à l'altitude z ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{\text{aref}}, T_{\text{rref}}$: température de l'air et du point de rosée à une hauteur de référence ($^{\circ}\text{C}$)
 u : vitesse instantanée du vent (m.s^{-1})
 u^* : vitesse de frottement du couvert (m.s^{-1})
 u^*s : vitesse de frottement au niveau du sol (m.s^{-1})
 u' : fluctuation de la vitesse horizontale (m.s^{-1})
 $U(z)$: vitesse moyenne du vent au niveau z (m.s^{-1})
 V : vitesse du vent au niveau de référence (m.s^{-1})
 w' : fluctuation de la vitesse verticale (m.s^{-1})
 W_j : proportion de surface mouillée dans la strate j
 Z : hauteur au-dessus du sol (m)
 $Z_{\text{om}}, Z_{\text{ov}}, Z_{\text{ot}}$: hauteurs de rugosité pour les transferts mécaniques de chaleur et de vapeur (m)
 Z_{os} : épaisseur de rugosité au niveau du sol (m)
 α : coefficient dans le calcul du profil de vitesse du vent
 β : exposant dans la loi reliant surface et volume (facteur de résorption)
 γ : constante psychométrique ($0,66 \text{ mb.K}^{-1}$)/tension superficielle (dyn.m^{-1})
 λ : coefficient
 $\Delta R_n(i)$: proportion du rayonnement net absorbée par la strate i (W.m^{-2})
 Δz : épaisseur d'une strate (m)
 μ : potentiel chimique/coefficient
 ρ : masse volumique de l'air (kg.m^{-3})
 τ : flux de quantité de mouvement ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$)

"Sans vouloir faire oeuvre de réduction de la diversité des concepts de modèle, on peut dire de façon générale que le modèle n'est jamais un objet pris pour soi. Il est toujours relationnel : modèle pour, modèle de, il renvoie à autre chose que lui-même. Le modèle n'est rien d'autre que sa fonction ; et sa fonction est une fonction de délégation. Le modèle est un intermédiaire à qui nous déléguons la fonction de connaissance, plus précisément de réduction de l'encore-énigmatique, en présence d'un champ d'étude dont l'accès, pour des raisons diverses, nous est difficile. Mais si l'on ne considère pas le modèle pour soi, on lui demande de fonctionner par soi, comme dans un automatisme auquel provisoirement nous ne serions pas mêlés."

Suzanne BACHELARD, 1979

INTRODUCTION

Il est acquis que les conditions météorologiques exercent une influence déterminante sur les maladies des plantes. La réussite des différentes phases d'une épidémie dépend étroitement d'évènements microclimatiques précis ou d'un enchaînement particulier de ceux-ci :

- les conditions météorologiques hivernales sont à l'origine de l'importance quantitative de l'inoculum primaire ;
- la libération et la dissémination sont sous la dépendance des facteurs suivants : vent, précipitation, température ;
- les phases d'infection et de latence sont liées de manière essentielle aux facteurs température, humidité relative, durée d'humectation.

Il est donc évident que ces conditions météorologiques doivent intervenir dans la modélisation et la prévision des risques phytosanitaires, dans la perspective des avertissements agricoles et un objectif de lutte intégrée (abandon de la lutte systématique avec réduction du nombre de traitements, diminution de la pollution due aux matières actives, diminution de la pression de sélection des souches résistantes).

Mais il faut souligner que l'épidémiologie a des besoins propres en matière de paramètres météorologiques. En particulier, pour ce qui concerne les organes végétaux aériens, il existe un paramètre d'une importance accrue : la durée d'humectation ou temps pendant lequel les organes (feuilles, tiges, fleurs, fruits) restent mouillés à la suite d'une précipitation (pluie, rosée, brouillard, irrigation).

Deux approches sont utilisées de manière complémentaire : la mesure et la modélisation.

De nombreux appareils de mesure de la durée d'humectation ou de la hauteur de rosée ont été mis au point, mais sans jamais parvenir à un instrument pleinement satisfaisant pour plusieurs raisons :

- le bilan d'énergie d'un capteur est différent a priori de celui d'un organe végétal ;
- un capteur est peu représentatif de la variabilité spatiale importante existant au niveau d'un couvert végétal ;
- la maintenance de ces capteurs est souvent délicate, du fait des conditions de leur utilisation.

La modélisation peut être statistique ou déterministe ; dans le cas de la durée d'humectation, il semble logique d'avoir une approche du 2ème type dans la mesure où l'humectation est considérée comme l'occurrence du remplissage d'un réservoir dont on gère les entrées et sorties grâce aux variables météorologiques (Rg, Ta, HR, U, pluie) et à une théorie des transferts de masse et d'énergie.

Dans l'état actuel de la prévision des maladies, certains modèles utilisent la durée d'humectation, soit comme variable d'entrée mesurée au moyen d'un capteur (Tavelure du pommier, OLIVIER & al, 1983 ; Rouille brune du blé, TOUZEAU & PROJETTI, 1987), soit comme variable intermédiaire calculée à partir des observations météorologiques courantes (Sclerotinia du tournesol, PAYEN, 1983 ; modèle EPI pour le Botrytis de la vigne, STRIZYK, 1983)). Dans tous les cas, on ne retient qu'une seule valeur de durée d'humectation pour l'ensemble du couvert.

Des modélisations simples de la durée d'humectation ont été réalisées à l'échelle du couvert ou d'un organe, mais sans se préoccuper d'une confrontation avec l'expérience. L'originalité de ce travail consiste à élaborer une modélisation simple mais rigoureuse de la durée d'humectation après pluie d'un couvert végétal en considérant que l'on doit diviser celui-ci en strates horizontales sachant que la partie inférieure du couvert peut rester humectée pendant des périodes prolongées tandis que les feuilles à l'horizon supérieur sont rapidement asséchées au terme d'une précipitation donnée. Par ailleurs, ce travail est le premier à fournir une confrontation expérimentale entre modèle et mesures. On n'envisage pas ici le cas des durées de rosée qui doit faire l'objet d'un traitement spécifique en raison de la complexité du phénomène mis en jeu.

Le premier chapitre reprend la problématique des relations entre le microclimat et développement des pathogènes ou ravageurs ; les chapitres suivants préparent et exposent la modélisation retenue, les expérimentations et résultats.

- A -

PROBLEMATIQUE DES RELATIONS ENTRE MICROCLIMAT ET DEVELOPPEMENT

DES MALADIES FONGIQUES OU RAVAGEURS

INTRODUCTION

La bibliographie des dix dernières années fait état de nombreux travaux sur l'épidémiologie des plantes et la simulation des épidémies (KRANZ, 1985; TENG, 1985), l'influence des paramètres du climat (ROTEM, 1978; HATFIELD & THOMASON, 1982 : ouvrage sur l'utilisation de l'agrométéorologie dans la lutte intégrée ; voir SHAW, 1982), l'utilisation de l'ordinateur en épidémiologie (WAGGONER, 1978). Un congrès de l'OMM/OEPP à Genève en 1982 a fait l'objet d'une publication (OEPP, vol. 13 (2) Janvier 1983 : l'Agrométéorologie au service de la protection des plantes); un autre bulletin de l'OEPP (vol. 9 (3) septembre 1979) traite de l'analyse des systèmes et de la simulation appliquées à la protection des plantes.

Il existe un certain nombre de modèles de type empirique destinés à raisonner les applications fongicides (EPIPPE, FAST,...); parallèlement à ces approches statistiques faisant intervenir le plus souvent des données du parc météorologique (échelle trihoraire ou le plus souvent journalière), des modélisations déterministes (ou en tout cas beaucoup moins empiriques) ont été développées au moyen d'une analyse du cycle de la maladie et de l'influence de différents événements, en particulier microclimatiques, sur chaque phase du cycle (RAPILLY, 1976; PAUVERT, 1986). La Protection des Végétaux élabore des modèles à vocation opérationnelle qui sont intermédiaires entre ces deux types d'approche ; TOUZEAU & PROJETTI (1987) distinguent trois types de modèles :

- les modèles phénologiques (Tavelure, Tordeuses) essaient de prévoir les stades cibles des parasites pour lesquels le seuil de tolérance est faible ;
- les modèles indicateurs de risque (EPI, STRIZYK, 1981 ; EPURE) quantifient l'importance microrégionale de la maladie (champignons essentiellement) ; ils sont utiles pour les maladies dont les symptômes sont latents pendant une longue période (Botrytis de la vigne), les maladies à foyers (Mildiou de la vigne) et les maladies endémiques polycycliques (Rouille brune du blé).
- les "systèmes intégrés de modèles interactifs" ont pour objectif de gérer les interactions climat/plante/parasite en intégrant des données d'observation sur la parcelle, la maladie, des données météorologiques, et des contraintes économiques (adaptation du système néerlandais EPIPPE dans les cas de la Rouille jaune, la Rouille brune, l'Oidium et les Septorioses sur blé).

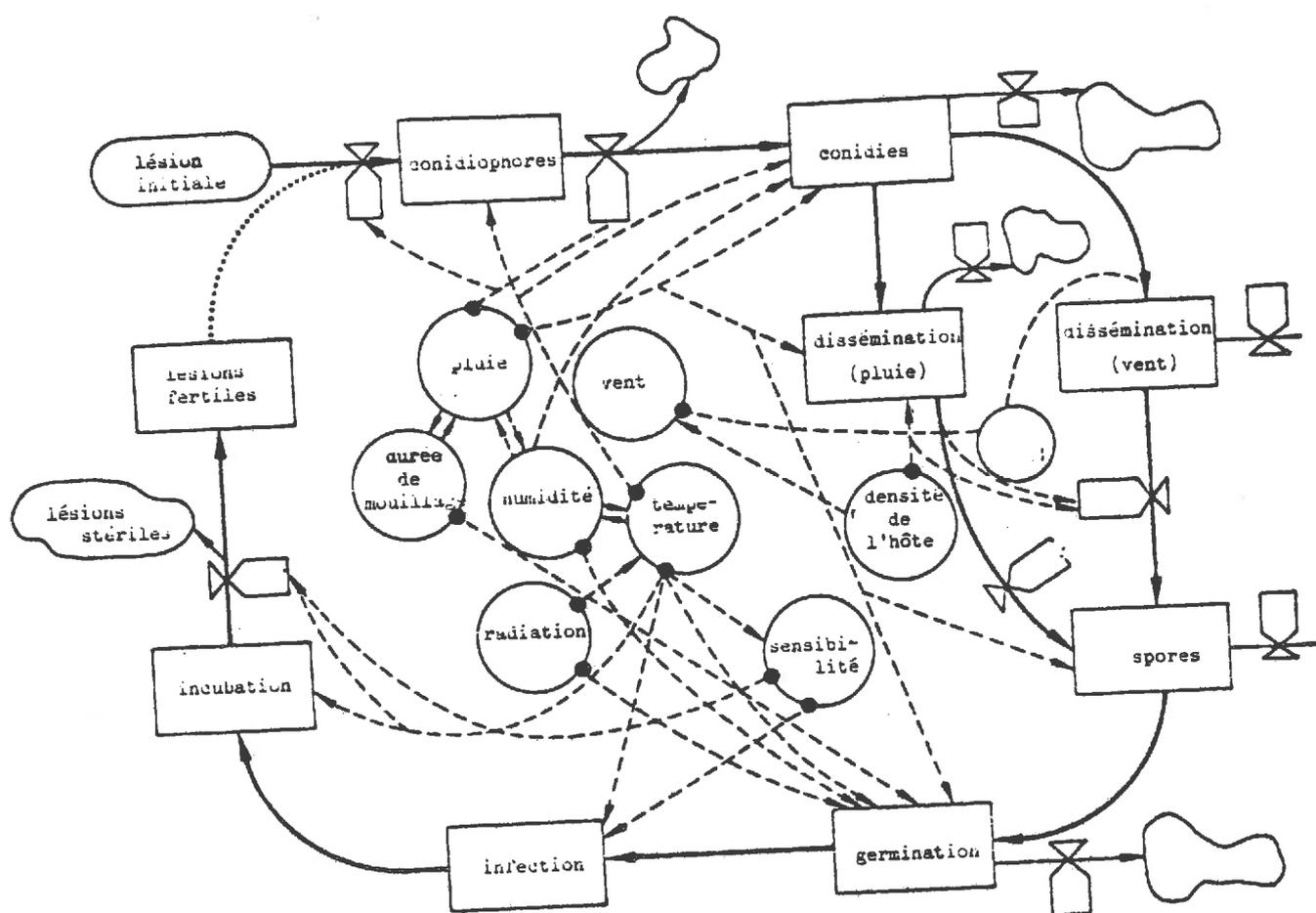


Fig. 1 - Cycle de la tavelure du pommier (d'après KRANZ, 1973)

En même temps, la phytopathologie s'enrichit de nouvelles connaissances tout-à-fait indispensables, en particulier sur la caractérisation de l'influence des facteurs microclimatiques sur les phases du cycle de l'agent pathogène étudié (les articles ayant trait à l'influence de la rosée, de l'humidité ou de la température sur telle ou telle phase du cycle de tel ou tel pathogène, sont trop nombreux pour en faire une liste exhaustive).

Il se constitue donc peu à peu une somme de connaissances telle qu'il devient possible de raisonner les interventions phytosanitaires : il s'agit de la lutte intégrée ("integrated pest management" des anglo-saxons)

La plupart des modélisations déterministes restent pour l'instant à un stade expérimental.

Dans l'optique des traitements, les instituts techniques français (Protection des végétaux, ACTA, ITCF) utilisent des modèles (EPI, EUDEMIS, FONGIMETOD,...) assez grossiers et donc très simples d'emploi; bien que très empiriques, ces outils fournissent une aide à la décision intéressante pour l'agriculteur (CURE, 1985) ; mais il semble difficile de progresser par cette approche. Pour aller plus loin à la fois dans la prévision et la généralisation, il apparaît que seule une approche de type déterministe soit raisonnable.

Pour la mettre en oeuvre, il importe dans un premier temps de bien identifier les éléments qui interviennent dans la progression d'une maladie.

I - EPIDEMIOLOGIE ET IMPORTANCE DES FACTEURS DU MILIEU

a - Notion de cycle épidémique. (fig. 1)

L'étude épidémiologique constitue un problème d'une grande complexité; le cycle de la Tavelure du Pommier (Venturia inaequalis) illustre cette complexité telle qu'elle est appréhendée dans le modèle EPIVEN (KRANZ, 1973). L'utilisation d'une telle analyse permet d'envisager la prévision du développement de la maladie à condition de pouvoir caractériser quantitativement le rôle des facteurs du milieu sur les différentes étapes du cycle.

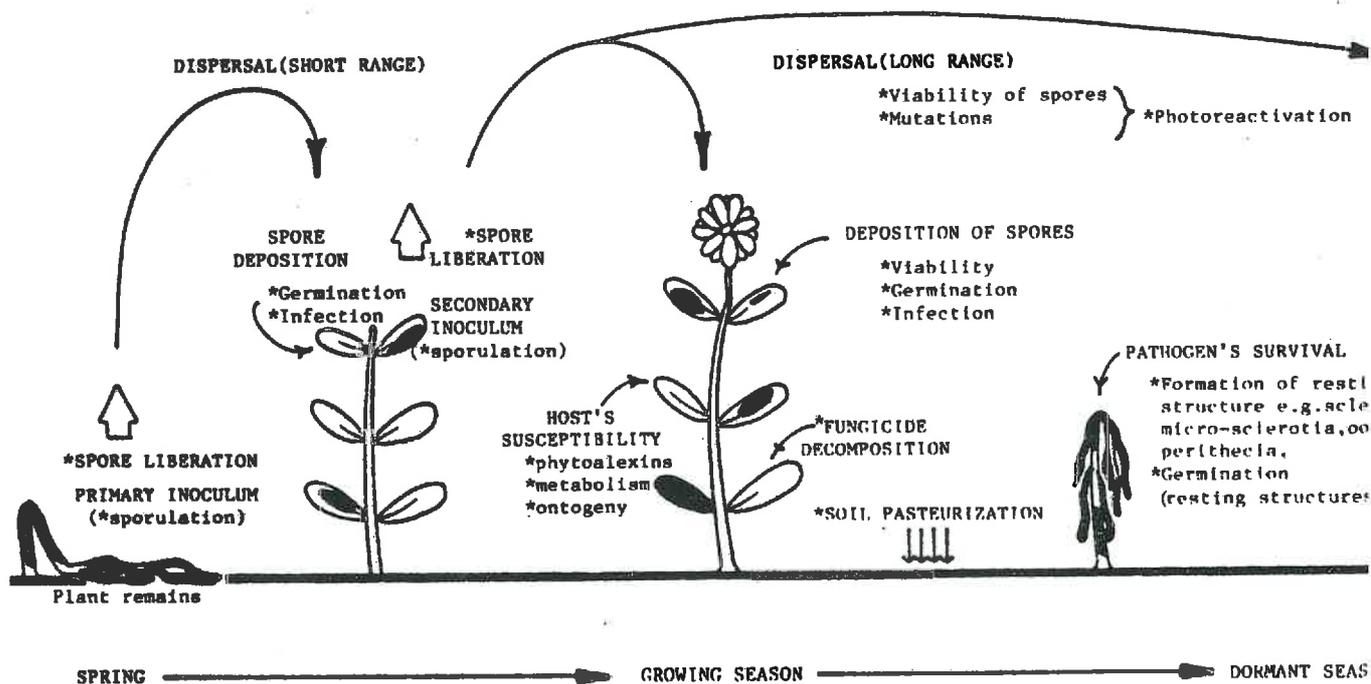


Fig. 2 - Influence du rayonnement sur les différentes étapes du cycle d'un champignon (d'après LEACH & ANDERSON, 1982)

La connaissance du cycle incombe au pathologiste, l'occurrence de tel évènement microclimatique doit être prévue par le bioclimatologiste. Notons qu'il faut en toute rigueur, tenir compte de l'ensemble hôte-parasite-environnement.

b - Facteurs physiques favorisant les épidémies.

1 - Rayonnement (fig. 2)

Il y a différentes catégories de réponses des champignons à la lumière ; cette réponse varie suivant les espèces, les domaines de longueur d'onde. La sporulation peut avoir lieu préférentiellement à la lumière, ou avoir lieu indifféremment à l'ombre ou à la lumière. Les radiations de l'U.V. proche ($\leq 0.34 \mu\text{m}$) sont hautement actives pour la sporulation de nombreux champignons (LEACH C.M. ; ANDERSON A.J., 1982). Certains pathogènes exigent une période d'obscurité après exposition au rayonnement ultra-violet proche. Dans le processus de germination des spores, la radiation joue également un rôle, de même que dans la persistance des formes de résistance.

Les résultats obtenus au laboratoire peuvent ensuite être transposés au champ où l'on limitera les mesures à la plage du spectre prépondérante.

2. - Températures.

La température est un facteur moins limitant que l'humidité pour les champignons ; par ailleurs, les limites thermiques inférieure et supérieure pour le développement du pathogène généralement ne sont pas létales. La plupart du temps, des températures défavorables signifient un blocage temporaire de l'accroissement de la maladie (températures nocturnes basses en zone tempérée, températures diurnes élevées en zone chaude).

Insistons ici sur le fait que la température de l'air sous abri à 2 m est peu révélatrice des températures de surface foliaire qui prévalent dans le couvert, sachant par ailleurs que les températures de feuilles varient selon qu'elles sont à l'ombre ou au soleil suivant un profil plus ou moins accusé en fonction des conditions de rayonnement solaire (PERRIER, 1979). Bien évidemment, la régulation stomatique joue un rôle particulièrement important dans le bilan hydrique foliaire et donc la température foliaire. Les figures n° 3, 4 & 5 illustrent l'influence de la température sur l'intensité de la

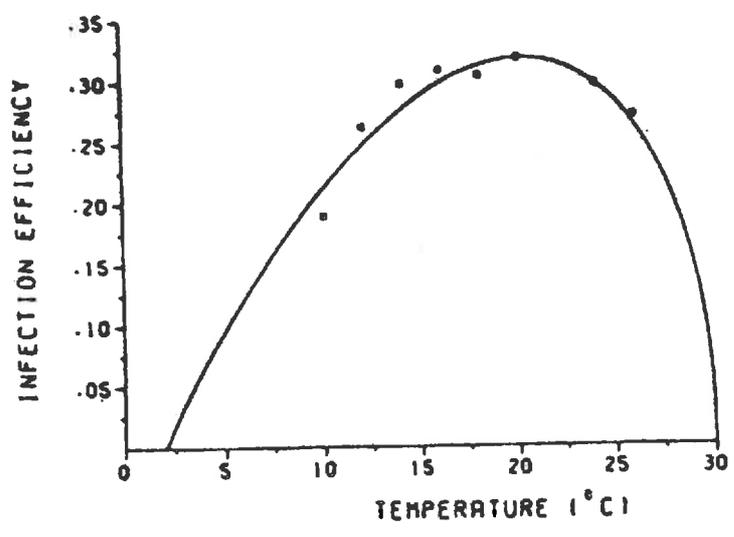


Fig. 3 - Efficience d'infection l'oïdium chez l'orge (AUST, 1973)

Fig. 4 - Intensité de la sporulation chez l'oïdium de l'orge (PAUVERT, 1986)

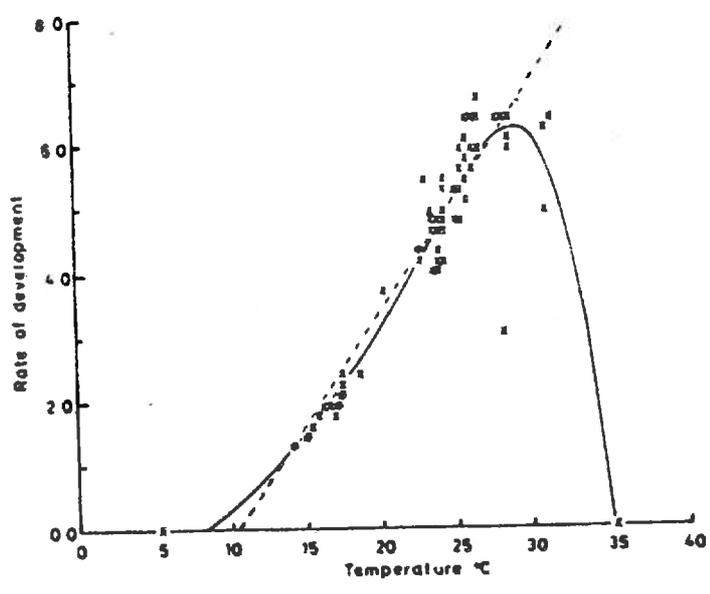
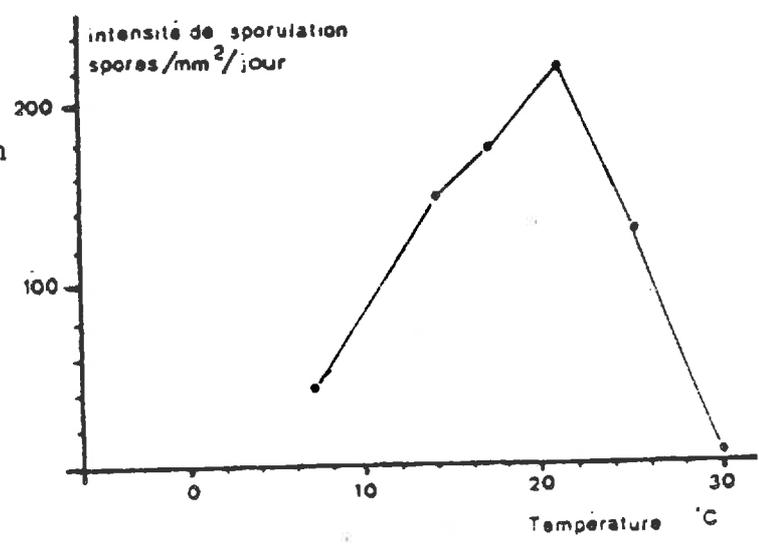


Fig. 5 - Taux de développement nématode en fonction de température (JONES, 1983)

sporulation et la période de latence (PAUVERT, 1986), sur l'efficacité de l'infection dans le cas d'Erysiphe graminis au laboratoire, et sur la vitesse de développement d'un nématode (JONES F.G.W., 1983).

Notons toutefois que, si la température constitue souvent un facteur dominant dans la vitesse de propagation, elle ne peut être retenue comme unique facteur : dans le cas d'Erysiphe graminis, l'efficacité de l'infection est également fonction de l'âge et du rang de la feuille considérée (HAU B., AUST H.J., KRANZ J., 1983).

Les ravageurs poikilothermes ont une activité beaucoup plus étroitement liée à la température que les champignons ; la méthode des sommes de température est largement employée dans les avertissements contre de nombreux parasites : nématodes (JONES F.G.W., 1983), pucerons (A'BROOK J., 1983), hyménoptères, etc...

3 - Vent

Celui-ci intervient de manière déterminante dans la dissémination des spores. Le couvert influence fortement le champ de vent : à l'intérieur du couvert, il n'est pas rare de trouver des vitesses instantanées de 5 à 6 fois plus élevées que la moyenne (fig. 6), certaines rafales peuvent pénétrer à l'intérieur du couvert sans être amorties suivant le même profil que la moyenne (SHAW, 1982). Les figures 7 et 8 illustrent l'intérêt des moments d'ordre 1 et 2 calculés à partir des traces temporelles et profils instantanés de vitesse du vent. Les moments d'ordre 3 et 4 caractérisent respectivement l'existence plus ou moins importante de rafales et l'intermittence de la turbulence.

GREGORY (1961) rend compte des premiers travaux sur la dissémination et l'étude des gradients de dispersion. La turbulence à l'intérieur du couvert rend l'étude de la dissémination anémophile à courte distance très peu aisée (cela explique sans doute la relative rareté des publications sur ce sujet) : le détachement ou le dépôt de spores ou d'insectes, la remise en suspension de particules, leur transport sont beaucoup plus fonction des extremums de la distribution de vitesse du vent que de la moyenne (cette moyenne est par contre suffisante pour décrire les phénomènes de transfert de chaleur et de vapeur, comme nous le verrons dans la modélisation de la durée d'humectation). Une analyse spatio-temporelle fine du champ de vitesse du vent devient nécessaire compte tenu de l'efficacité du dépôt des spores (McCARTNEY H.A., BAINBRIDGE M., AYLOR D.E., 1983).

Fig. 6 - Fréquence relative d'occurrence de vitesse de vent Q pendant 1 heure à une hauteur de 1,78 m dans un maïs (SHAW & al, 1979).
Les courbes désignent 3 formes de distribution théorique

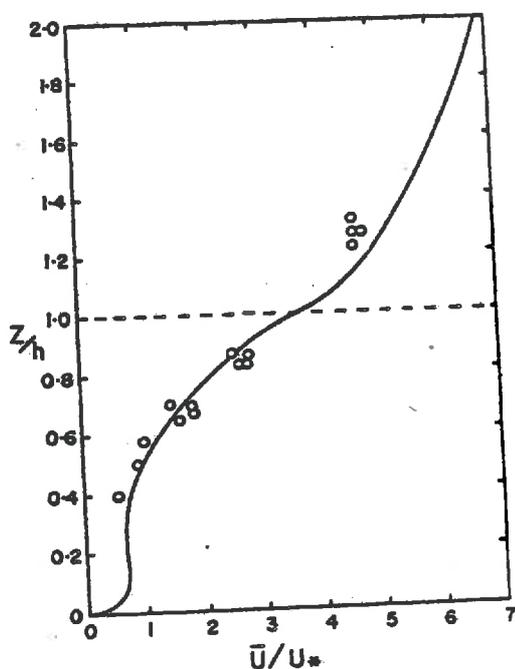


Fig. 7 - Profil de vitesse moyenne (moment d'ordre 1) du vent à l'intérieur et au-dessus d'un couvert de maïs (h est la hauteur du couvert et U^* la vitesse de rugosité) (WILSON & SHAW, 1977)

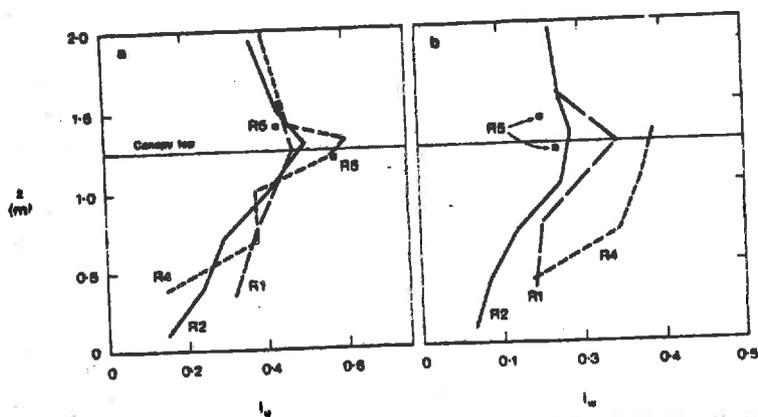
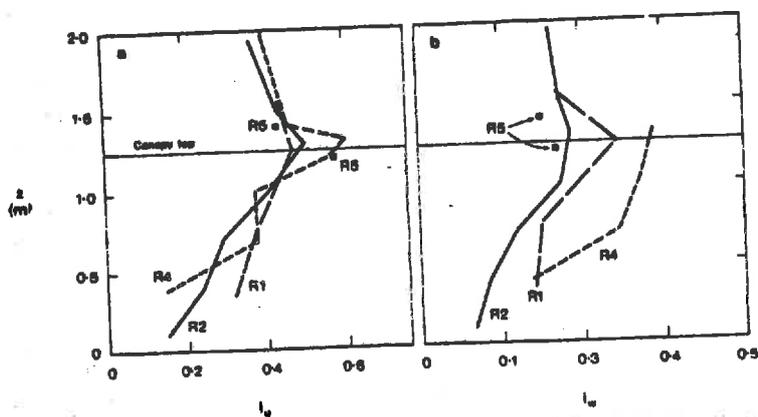


Fig. 8 - Profils d'intensités transversale (a) et verticale (b) (moments d'ordre 2) de la turbulence dans un couvert de blé. (il existe un pic d'intensité au voisinage du sommet dans le cas d'une culture ondulante ; FINNIGAN, 1979)



En ce qui concerne la dissémination à moyenne distance (100 m - 10 km), il existe des modèles de diffusion atmosphérique de fines particules. ITIER (1979) a développé une modélisation permettant de connaître, pour des particules ayant une vitesse de sédimentation non nulle, l'évolution des flux et concentrations en particules sur la zone d'émission et en aval de celle-ci.

Dans ce cas, le flux de particules correspond à la somme de deux termes :

- un terme lié au gradient de concentration faisant appel à une paramétrisation de la turbulence ;
- un terme lié à la sédimentation.

Le transport des particules est dépendant de l'importance relative de la turbulence et de la sédimentation : le modèle montre par exemple pour l'oïdium sur un champ de blé que les spores se comportent comme des gaz pour une vitesse au parc météorologique de plus de 2,5 m/s ; par contre, pour une vitesse inférieure à 0,5 m/s, le transport horizontal sera quasiment inexistant.

4 - Eau

On distingue l'action mécanique de la pluie favorable à la dissémination des spores et le rôle de l'eau dans les processus de germination, de contamination de l'hôte et d'incubation.

α - Dissémination

La pluie provoque la chute des spores aériennes entraînées à terre (STARR, 1967), le détachement des spores d'une surface sèche ("rain puff" ; HIRST & STEDMANN, 1963), le rebond de gouttelettes à partir de la chute d'une grosse goutte sur une surface recouverte d'un film d'eau ("rain splash" ; GREGORY, 1961).

β - Contamination

L'humidité ambiante de l'air peut suffire pour la germination des spores et le développement des tubes germinatifs. Il est parfois délicat pour le pathologiste de trancher entre humectation et humidité relative voisine de la saturation (RAPILLY, 1983).

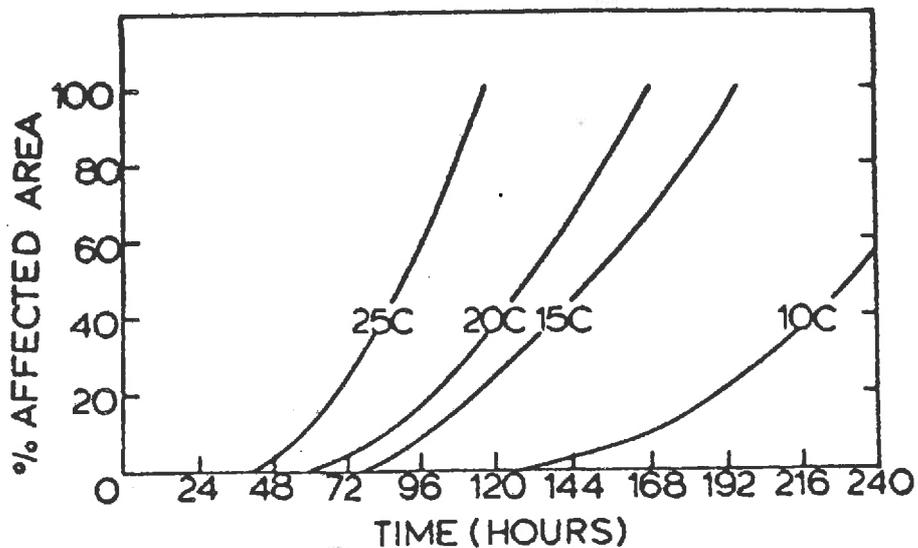


Fig. 9 - Pourcentage de surface foliaire affecté par le *Sclerotinia sclerotiorum* sur des haricots secs en fonction du temps après l'inoculation à 100 % d'humidité (WEISS & al, 1980)

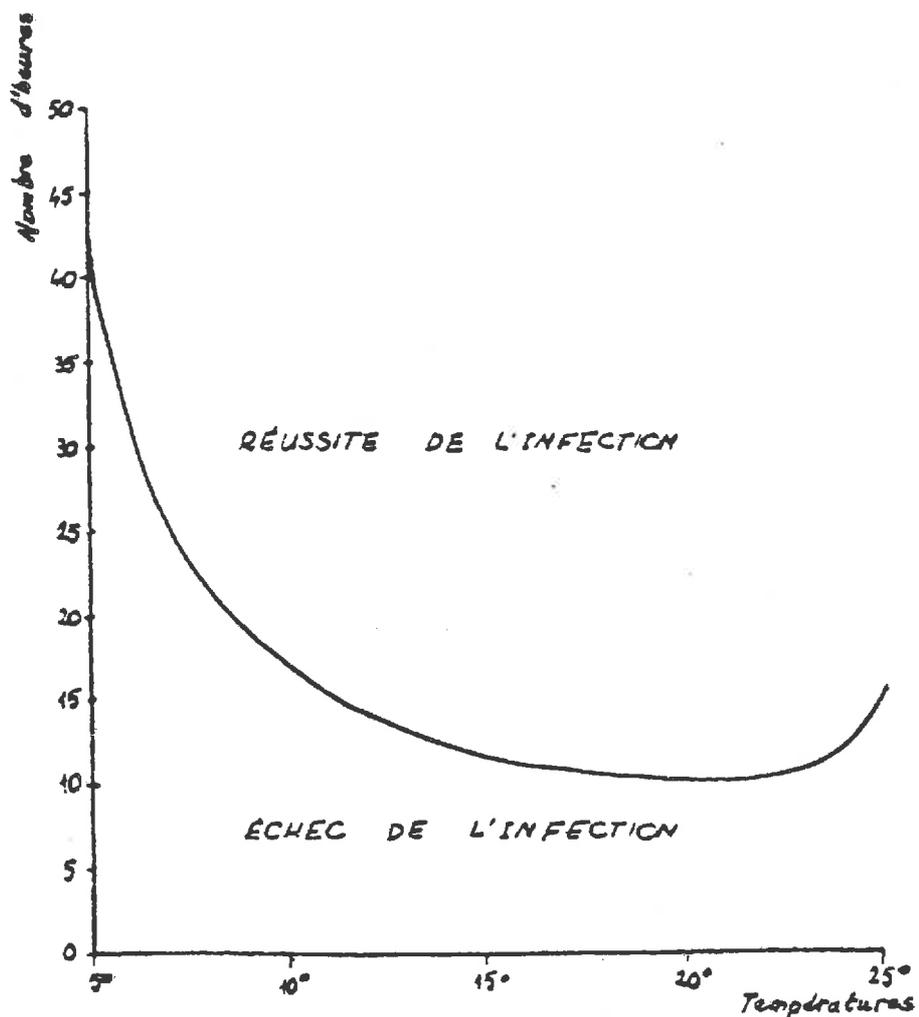


Fig. 10 - Temps nécessaire à la réussite de *Venturia inaequalis* en présence d'un film d'eau (OLIVIER, 1983)

Mais chez la majorité des champignons phytopathogènes, la contamination est ou n'est pas possible (réponse par tout ou rien) (PAUVERT, 1986). La réussite d'une contamination est souvent liée à une durée d'humectation minimale (LAMARQUE, 1983)

Cette durée d'humectation minimale varie très largement suivant le pathogène ; elle est également souvent liée à la température (tableau n° 1 et fig. n° 9 et 10).

Le phénomène d'humectation est dû à différents événements météorologiques :

1) chute ou dépôt d'eau en phase liquide.

On distingue trois origines :

- pluie : phénomène compliqué à appréhender. Nombreuses sont les variables caractérisant la pluie, ce sont, en fonction du temps, l'intensité, le spectre des diamètres de gouttes, la direction de chute, etc...

- brouillard : les gouttelettes en suspension dans l'air peuvent se déposer sur les organes végétaux.

Dans la majorité des cas, le brouillard est obtenu par le refroidissement de l'air dont la pression de vapeur devient saturante (consécutivement à un déficit radiatif, une advection d'air froid, une détente adiabatique).

- irrigation par aspersion (HALLAIRE, RAPILLY, PAUVERT, 1969)

Ce type d'irrigation peut avoir un impact certain sur le niveau d'infestation de certains parasites : WEISS & al (1979) ont montré l'influence de la fréquence d'irrigation sur deux variétés de haricots secs ; la variété développant le plus fort LAI (4,9) avec une irrigation de 55 mm tous les cinq jours présente une infection par le *Sclerotinia sclerotiorum* de 50 % alors que l'autre variété n'est affectée qu'à 0,6 % avec un LAI de 2,6 et une même dose d'irrigation tous les dix jours. Cet exemple illustre l'importance de la structure du couvert sur la réussite de l'infection, à même inoculum de départ, la maladie est presque 10 fois plus importante sur le couvert le plus dense et le plus arrosé. L'aspersion modifie fortement le microclimat ; on

Action du climat	Etat hydrique de la surface	Autres conditions
Agent pathogène	(humidité ou présence d'eau libre)	Remarques
Botrytis cinerea → Vigne (pourriture grise)	.contamination possible si HR élevée .contamination rapide avec un film d'eau (15 heures si $15 < \theta < 20^{\circ}\text{C}$)	.0-30°C .optimum : 18-20°C
Plasmopara viticola → Vigne (mildiou)	.germination exclusive des sporanges dans l'eau .durée : 40-60 mn à l'opt 10 h aux θ ext	.3-9°C ≤ θ ≤ 28-30°C .optimum : 22-25°C
Sclerotinia sclerotiorum → Colza	.pétales : véhicules de l'inoculum .brouillard, rosée, légère pluie → "collage" des pétales	.pluie forte → lessivage .courants convectifs → stabilité des pétales sur les feuilles
Sclerotinia sclerotiorum → Tournesol	.42h d'humectation continue du capitule -germination des ascospores -pénétration des tubes -colonisation	.18-20°C
Septoria nodorum → Blé (septoriose)	.germination des spores et pénétration des tubes germinatifs si (HR ≥ 98% ou eau liquide) ≥ 10h	.importance de la pluie (splashing) .5 ≤ θ ≤ 30°C
Uncinula necator → Vigne (Oidium)	.eau liquide non indispensable à la germination .pluie trop violente nuisible	.taux de germination = f(HR) .4 ≤ θ ≤ 25°C .optimum : 25°C
Venturia inaequalis → Pommier (tavelure)	.courbes de Mills : durée d'humectation = f(θ)	.ascospores → pluie impérative .conidies → rosée ou brouillard suffisant .pluie → splashing lessivage

Tableau n° 1 : Action du climat sur le développement de quelques agents pathogènes.

assiste à un refroidissement général de la culture : 1 à 2,5° C de moins en température de l'air à 10 cm, 3 à 4° C de moins en température de surface des feuilles et jusqu'à 9° C de moins en température du sol à 1 cm.

Sur la même culture, BURKE & MILLER (1980) mettent en évidence un gradient de développement du *Sclerotinia sclerotiorum* le long d'une ligne d'irrigation où l'intensité de l'aspersion diminue de la source à l'extrémité de la ligne.

En 1982, CHASE montre que la sévérité d'une attaque d'un complexe de pathogènes sur des plantes en pot (*Dracaena marginata*) diminue de 100 % dès lors que l'irrigation par aspersion est remplacée par une irrigation manuelle sans humectation du feuillage.

ii) Condensation de vapeur d'eau atmosphérique.

La rosée constitue un apport d'eau le plus souvent négligeable au sens du bilan hydrique, mais tout à fait significatif quant à la durée d'humectation des organes végétaux qu'elle entraîne.

Le paragraphe C.I y est partiellement consacré, l'organe considéré étant un capteur, une feuille ou un fruit. On trouvera une revue bibliographique importante dans un article déjà ancien dénommé "Agrometeorological aspects of dew" (WALLIN, 1967).

En résumé, l'étude de la dissémination, et donc du champ de vitesse du vent ou des phénomènes de splashing, est particulièrement complexe ; la température agit sur la vitesse d'exécution des différentes phases ; par rapport aux facteurs rayonnement, vent, température, le facteur "eau" a cette particularité, et ce plus particulièrement pour ce qui concerne les contaminations de feuilles, d'agir en tout ou rien selon que la durée minimale d'humectation est ou non réalisée.

L'intérêt de développer une étude fine de la durée d'humectation des feuilles tient au large spectre des maladies fongiques concernées, et à la vocation opérationnelle d'un critère seuil ; une telle étude a pour finalité de procurer au pathologiste un outil utilisable dans la modélisation des épidémies. Le bioclimatologiste a alors en charge l'analyse dans l'espace et le temps de ce paramètre : à savoir, comment le mesurer ou le modéliser au niveau de la parcelle et du couvert végétal.

II - PROBLEME DE LA CONNAISSANCE DU MICROCLIMAT A L'ECHELLE PARCELLAIRE

a - Cas général

La figure n° 11 montre toute la complexité du problème à résoudre, dès lors que l'on veut passer des données du réseau synoptique, ou de façon plus réaliste, de données agroclimatiques acquises sur un site normalisé (respect des normes d'implantation et de dégagement) aux variables du microclimat au-dessus et à l'intérieur d'un couvert, sur une parcelle relativement proche de la station agroclimatique considérée ; par "proche", on entend une distance telle que l'on puisse avec certitude considérer que les événements relatifs aux variables indépendantes de la surface (hauteur de précipitation, rayonnement global) sont quasi identiques sur la parcelle et au niveau de la station. Avec cette hypothèse, il semble raisonnable de vouloir simuler le microclimat à l'échelle de la parcelle et sur un pas de temps de l'ordre de l'heure ou de la demi-heure, à condition bien sûr que le couvert considéré soit suffisamment étendu et homogène.

Dans un article qui illustre le problème de la représentativité spatiale des mesures, SAMIE (1983) constate le dilemme auquel se heurte le chercheur qui utilise des techniques de mesure de plus en plus fines pour analyser les phénomènes micrométéorologiques afin de construire des modèles d'échange de masse et d'énergie, et qui, par ailleurs, cherche les moyens de développer et valider ses recherches par l'utilisation de données normalisées issues des réseaux météorologiques ou agroclimatiques.

Face à ce dilemme, on parle de "fonction de transfert", expression employée pour masquer la difficulté à relier dans le cas général microclimat et mésoclimat ; toutefois, pour les couverts agricoles implantés sur une aire plane de plusieurs hectares (homogénéité d'exposition, de nature et densité de végétation), et moyennant les restrictions précédentes concernant la "proximité" entre parcelle et station, on est, dans certaines situations météorologiques, en mesure de restituer, à partir des données du parc météo et de notre connaissance du fonctionnement microclimatique du couvert, les profils de vent, température, humidité, rayonnements net et global au-dessus et au sein de la végétation.

En particulier, en l'absence de convection libre par temps couvert, c'est-à-dire dans les situations qui correspondent le mieux à un risque élevé de durée d'humectation prolongée, on peut facilement (comme cela sera montré

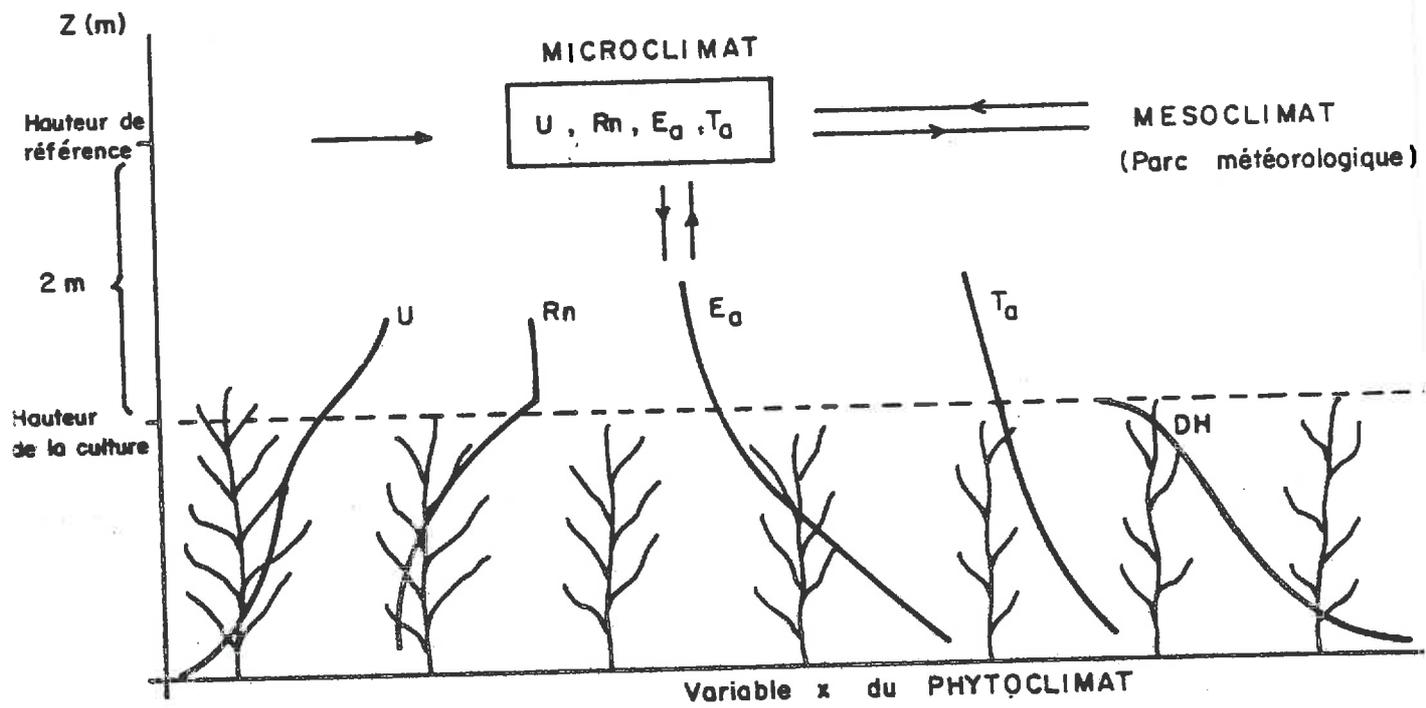


Fig. 11 - Schéma des relations entre mésoclimat, microclimat et phytoclimate

dans nos expérimentations) obtenir à un niveau de référence au-dessus de la végétation les valeurs de vitesse du vent, rayonnement net, humidité relative et température qui sont les variables de forçage dans une modélisation des phénomènes d'échanges énergétiques au sein du couvert végétal.

Il existe deux catégories de variables :

- Les variables que PERRIER (1979) qualifie d'indépendantes : ce sont la vitesse du vent et le rayonnement ; elles ne dépendent que des paramètres du couvert, si l'on veut bien en première approximation négliger le fait que le rayonnement reçu par les feuilles n'est pas sans conséquence sur la turbulence dans le couvert.

Dans les conditions climatiques qui nous intéressent (neutralité thermique), on suppose que le rayonnement net est relativement faible et donc que les températures de surface diffèrent peu des températures de l'air, d'où la possibilité de calculer simplement le profil de vent à l'intérieur du couvert à partir d'une valeur de u au parc météo et des paramètres aérodynamiques Z_0 et d (longueur de rugosité et hauteur de déplacement fonctions de la hauteur h du couvert).

L'utilisation d'une loi classique de décroissance de vitesse du vent à l'intérieur du couvert permettra d'obtenir le profil à l'intérieur de la végétation ; de même pour le rayonnement net en fonction du profil de densité de surface foliaire.

- Les variables que PERRIER (1979) qualifie de complexes : ce sont les températures de surface, de l'air et du point de rosée qui sont la résultante des transferts de chaleur et de vapeur entre les éléments végétaux et l'air adjacent et entre couches d'air.

Le coefficient d'échange est fortement lié à la vitesse du vent et son augmentation tend à réduire l'écart entre température de surface et température de l'air.

L'énergie d'origine radiative, représentée par le rayonnement net, constitue l'apport énergétique extérieur transformé en flux de chaleur latente et flux de chaleur sensible si l'on néglige la conduction dans le sol sous couvert végétal, d'où les profils de température de l'air et du point de rosée. Jouent également sur ces profils les conditions aux limites : température de l'air et du point de rosée à un niveau de référence (2 m).

A la limite inférieure, l'humidité de la surface du sol est déterminant pour la température de surface.

Le couvert intervient par différents paramètres sur ces profils :

- par l'intermédiaire de la densité de surface foliaire qui joue directement sur la distribution du rayonnement net et le profil d'atténuation de la vitesse du vent.

- par l'intermédiaire de la résistance stomatique qui est elle-même fonction du profil de rayonnement visible et de l'état hydrique des feuilles. Pour une feuille mouillée, elle sera nulle. Pour une feuille non mouillée mais dans des conditions de bonne alimentation hydrique par les racines, elle sera alors de l'ordre de 25 à 250 s/m (MONTEITH, 1975). Pour une feuille d'un couvert souffrant de la sécheresse, la fermeture des stomates conduira à des valeurs supérieures à 500 s/m, voire très supérieures si le rayonnement solaire est nul. Le profil vertical de résistance stomatique couplé au profil vertical de surface foliaire détermine la répartition des flux entre chaleur sensible et chaleur latente (que cette dernière provienne de l'évaporation de gouttes ou de l'évapotranspiration de la plante par les stomates).

- la taille des feuilles (calcul des coefficients d'échange, des coefficients de traînés) joue également, mais dans une moindre mesure.

b - Cas des durées d'humectation

1 - Position du problème

Comme cela était annoncé dans le paragraphe I sur l'importance des facteurs du milieu, et particulièrement sur l'importance du facteur "eau", se pose le problème de l'analyse dans l'espace et le temps du paramètre que est la durée d'humectation ou temps pendant lequel les feuilles du couvert restent mouillées postérieurement à une pluie ou durant un dépôt de rosée.

Les expériences décrites ultérieurement montreront l'intérêt d'une étude où le couvert est divisé en strates horizontales, c'est-à-dire où l'on définit, non pas une durée d'humectation, mais une évolution de cette dernière en fonction de la hauteur dans le couvert végétal.

Il existe deux manières d'estimer les durées d'humectation :

- par la mesure ; une abondante bibliographie décrit les différents capteurs mis au point dans les trente dernières années ; le paragraphe suivant fera une synthèse sur cet aspect instrumental.
- par la modélisation ; c'est là notre objectif tout en sachant que dans une optique opérationnelle, les deux méthodes resteront complémentaires pour appréhender l'ensemble des situations de pluie et de dépôt de rosée.

L'intérêt de la modélisation envisagée réside essentiellement dans la possibilité de discrétisation spatiale, alors que, jusqu'à présent, la durée d'humectation n'était estimée que globalement pour l'ensemble du couvert ou à l'échelle d'un organe au moyen d'un modèle (PAYEN, 1983 ; MONTEITH & BUTLER, 1979 ; PEDRO & GILLESPIE, 1982) ou au moyen de capteurs (WOODHEAD, 1968 ; RAYMONDAUD & STRABLER, 1985).

Ces modèles simples seront brièvement décrits dans le paragraphe C.I ; ils trouvent une application dans la modélisation des durées de rosée sachant que celle-ci affecte principalement la strate supérieure du couvert, puisque celle-ci est la plus exposée à la déperdition radiative lors des nuits de forte stabilité thermique.

Avant d'en venir à l'organisation de l'étude qui sera centrée sur la modélisation multi-couche de la durée d'humectation, nous allons passer en revue les différents capteurs décrits dans la littérature.

2 - Méthodes d'estimation de la durée d'humectation.

Dans la littérature, on trouve principalement deux voies d'estimation de la durée d'humectation :

- utilisation de règles faisant appel à un seuil d'humidité relative au parc météo : certains auteurs proposent la limite de 90 ou 85 % d'humidité relative après une pluie ou une rosée comme seuil pour le calcul de la durée d'humectation du couvert.
- utilisation de capteurs d'humectation.

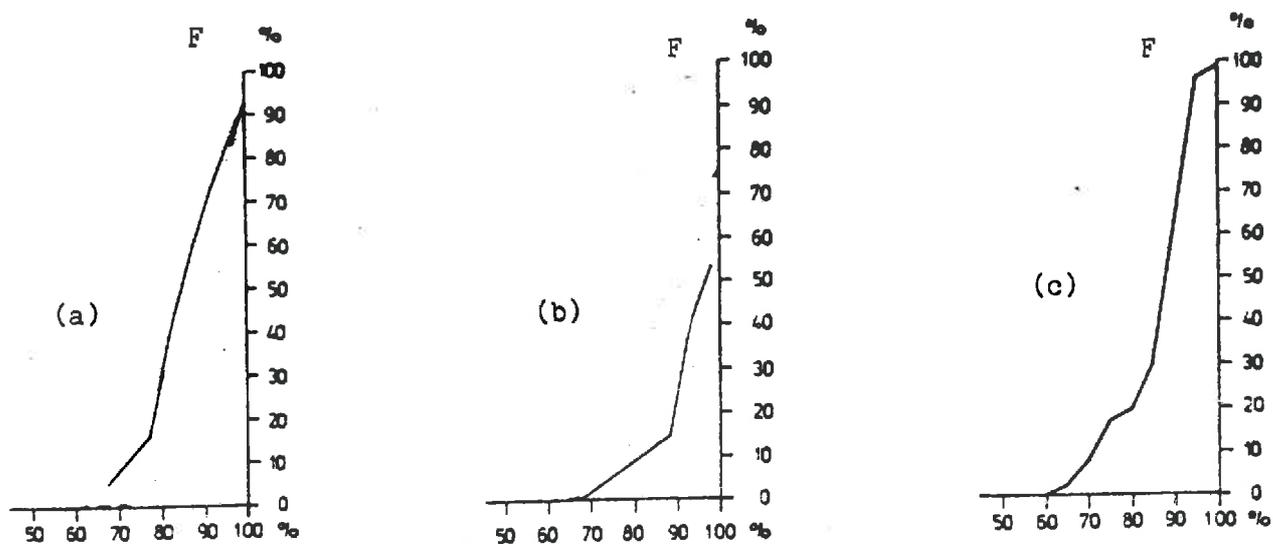


Fig. 12 - Fréquence relative F des cas d'humectation en fonction de l'humidité relative à 2 m, sous abri, sur une orge d'hiver (adapté de HACKEL, 1984)
 (a) : feuille supérieure (b) : tige (c) : épi

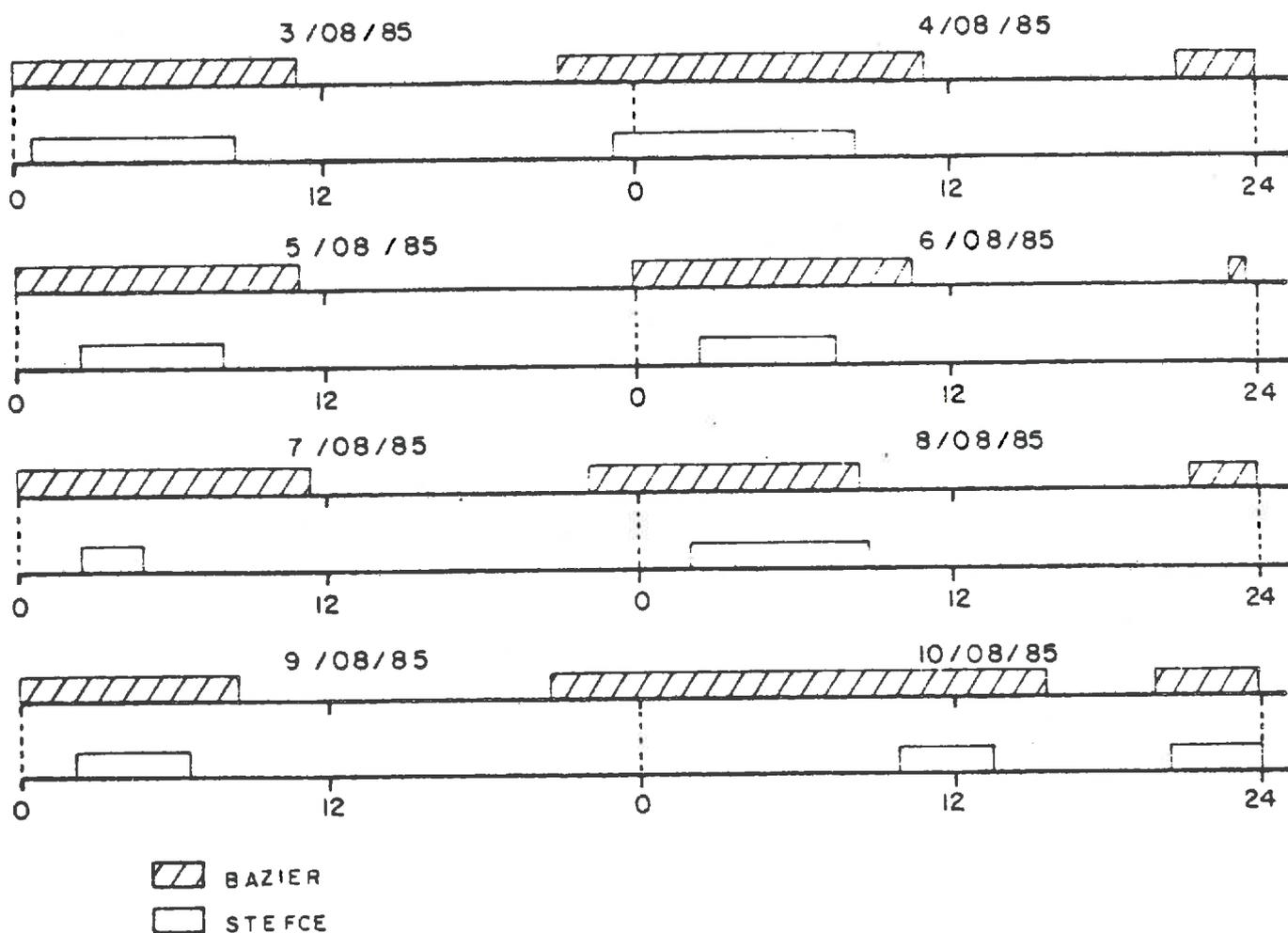


Fig. 13 - Comparaison des durées d'humectation enregistrées par les capteurs BAZIER et STEFCE

α - critiques des méthodes d'estimation fondées sur la mesure de l'humidité relative.

LOMAS & SHASHOUA (1969) ont montré par régression la faible liaison entre durée d'humectation mesurée à 50 cm au-dessus du sol et l'humidité relative sous abri à 2 m. HACKEL (1984) montre sur plusieurs exemples (fig. n° 12) que la fréquence relative des cas d'humectation du couvert varie de façon monotone pour des humidités relatives à 2 m sous abri variant de 60 à 100 % : autrement dit, il n'y a pas de seuil d'humidité relative qui permette de classer la majeure partie des cas d'humectation.

Ces articles auxquels s'ajoutent nos propres observations donnent à penser que de telles estimations sont à rejeter sans hésitation.

β - description et analyse des capteurs.

Différentes techniques ont été développées pour mesurer la durée d'humectation ; on peut classer les différents capteurs en 5 types suivant le principe de fonctionnement :

- changement des propriétés optiques lors de l'humectation (méthode peu utilisée)
- méthode gravimétrique (drosomètre)
- changement de longueur d'un élément sensible
- capteurs électroniques utilisant une variation de conductivité électrique ou de résistance en présence d'eau
- méthode radiométrique

1) Le principe de la pesée de l'eau est utilisé pour la mesure de la hauteur de rosée ; le drosographe de Kessler (NOFFSINGER, 1965) est constitué d'une coupelle fixée sur un fléau relié à un stylet inscrivant, sur un cylindre enregistreur, de manière analogue à un thermographe, les variations de poids de celle-ci ; cet appareil présente l'inconvénient d'être sensible au vent, malgré un amortissement à l'huile. Il peut être utilisé de manière ponctuelle pour quantifier les hauteurs de rosée (la déviation totale du stylet correspond à 0,55 mm) mais on ne peut, sans un soin attentif, laisser cet instrument à l'extérieur.

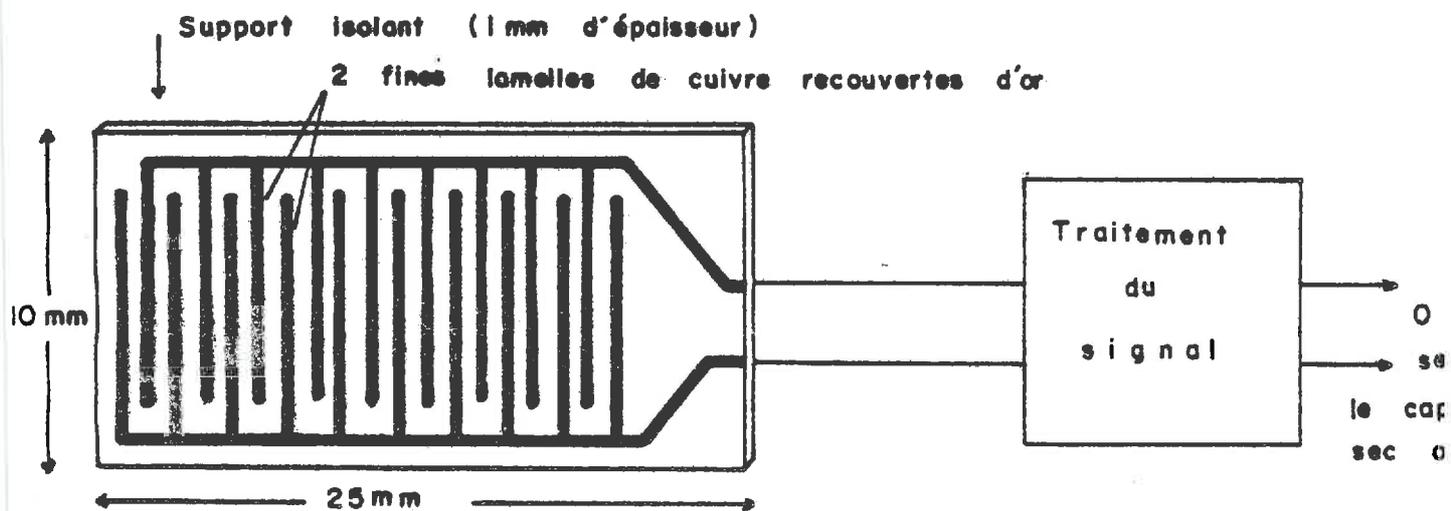


Fig. 14 - Schéma du capteur de durée d'humectation utilisé dans les expérimentations (capteur STEFCE)

WALES-SMITH (1983) propose un moyen très bon marché d'estimer la hauteur de rosée à l'aide d'un récipient circulaire de 100 cm² contenant deux disques de papier filtre et reposant sur une plaque en céramique ; la pesée des disques permet d'avoir une estimation de la hauteur de rosée, mais ici encore, la méthode est laborieuse et ne donne pas d'indication sur la durée. La rosée est un phénomène complexe puisque celle-ci a deux origines : condensation atmosphérique ou distillation à partir du sol. Sa mesure reste donc très délicate, et c'est pourquoi sa modélisation reste en dehors de cette étude.

ii) Le thermohumectographe BAZIER mesure indifféremment les durées d'humectation consécutives à une pluie ou une rosée ; l'appareil est placé dans le couvert végétal et l'élément sensible constitué d'un buvard dont la longueur varie en fonction de l'état d'humectation communique un déplacement à un stylet qui inscrit sur un cylindre enregistreur un trait continu entre deux positions extrêmes (positions "buvard complètement sec" et "buvard complètement mouillé"). Cet appareil permet donc d'avoir une cinétique du mouillage, mais cette indication globale ne permet pas de distinguer ce qui se passe au sein du couvert ; en effet, le dessèchement de l'élément sensible n'est représentatif que de son propre bilan d'énergie. Pour les différentes méthodes, on trouve toujours ce même problème de la représentativité d'une mesure faisant appel à un capteur qui simule une feuille et non un élément végétal lui-même.

iii) Les capteurs d'humectation fondés sur le principe d'une variation de conductivité électrique due à la présence d'eau sont nombreux à être décrits dans la littérature. (DAVIS & HUGUES, 1970 ; GILLESPIE & KIDD, 1978 ; PINGUET, 1983).

Le capteur qui a été utilisé (capteur fabriqué par le STEFCE) dans les expérimentations décrites ultérieurement est constitué par une plaquette mince en matériau isolant (verre epoxy) sur laquelle est posée une grille constituée de 2 peignes en cuivre imbriqués et recouverts d'une pellicule d'or (3 microns) pour éviter l'oxydation (cf fig. 14). On délivre sur l'un des peignes un signal sinusoïdal de basse fréquence ; ce signal est transmis à l'autre peigne en présence d'eau sur le capteur dont la capacité augmente brutalement. Placé en série sur un circuit électronique adéquat, le capteur mouillé détermine l'obtention d'une différence de potentiel qui est enregistrée par l'acquisition de données.

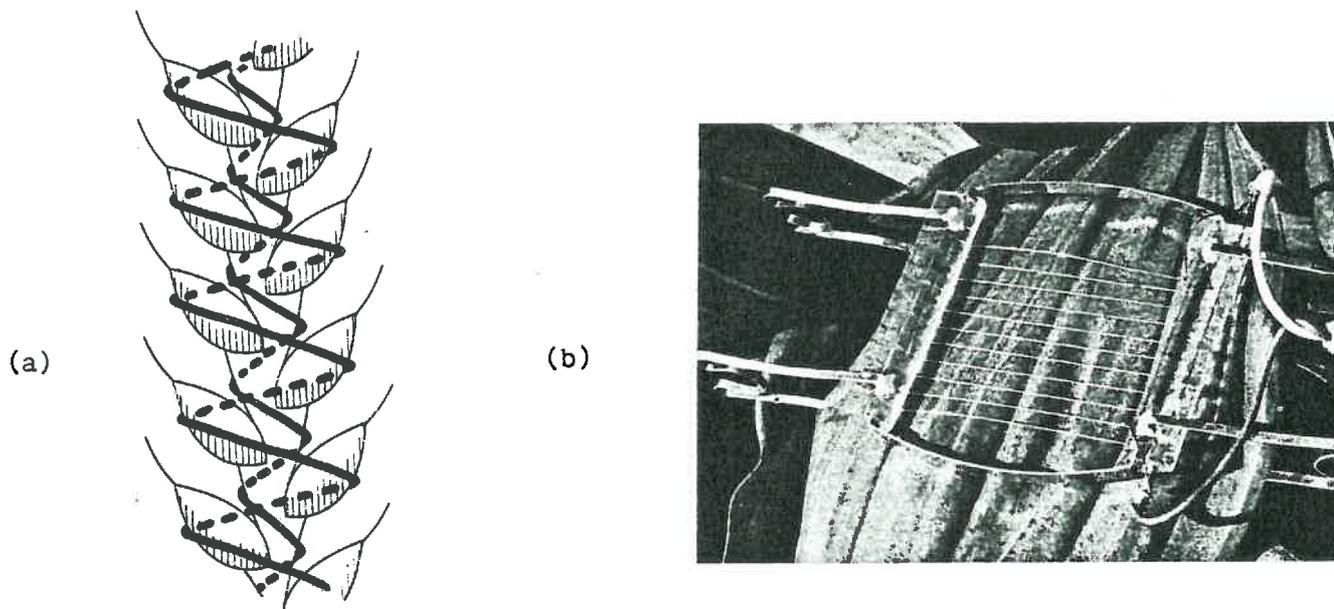


Fig. 15 a & b - Capteur de durée d'humectation constitué de 2 fils d'or indépendants reliés aux 2 bornes d'un circuit électronique (HACKEL, 1984)
 (a) dans le cas d'un épi
 (b) dans le cas d'une feuille large

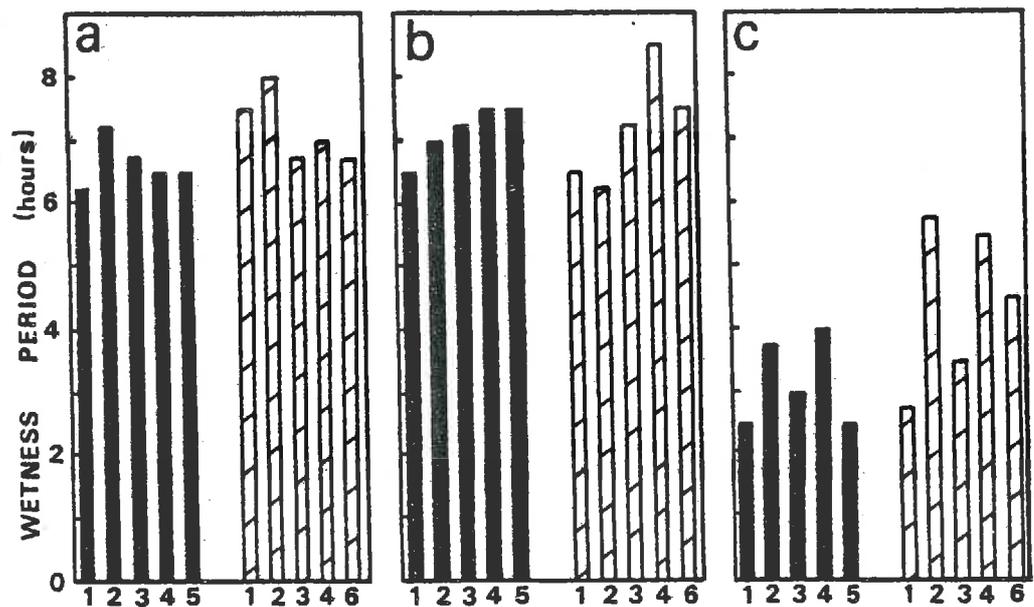


Fig. 16 - comparaison de la réponse de différents capteurs formés de grille de taille ou de composition variable (HUBAND & BUTLER, 1984)
 trait plein : capteur à 2 m
 trait discontinu : capteur au sommet du couvert
 (a) & (c) : cas d'une pluie
 (b) : cas d'une rosée

La figure n° 13 compare les résultats obtenus avec un "BAZIER" à ceux donnés par un capteur STEFCE ; on constate que les deux méthodes donnent des résultats assez différents. Sachant que les capteurs sont dans des conditions identiques, on a ici l'illustration de la difficulté d'interprétation de l'information fournie par les capteurs.

HACKEL (1974,1978) propose de remplacer la feuille artificielle par le matériel végétal lui-même. L'élément sensible entoure l'organe dont on veut connaître l'état d'humectation (fig. 15 a et b). Cette solution, plus proche de la réalité, suppose une multiplication du nombre des capteurs et un bon contact entre organe et capteur. En pratique, elle est d'un usage délicat.

WEISS & HAGEN (1983) comparent trois capteurs, formés de grilles de taille ou de composition variable, avec un même circuit électronique et concluent à une distorsion importante entre indication des capteurs et observation visuelle sur une trentaine d'occasions d'humectation, les capteurs repèrent entre 30 et 80 % suivant le type considéré, il existe donc également une forte disparité entre capteurs.

HUBAND & BUTLER (1984) comparent six capteurs (un seul circuit électrique fourni par GILLESPIE & KIDD, 1978) différents par la taille, la nature de la surface sensible, l'écartement entre les électrodes ; ils arrivent à mettre en évidence des différences entre capteurs allant jusqu'à 4 h $\frac{1}{2}$ au sommet d'un couvert de blé (fig. 16). La conclusion principale de ces comparaisons est que le comportement des capteurs dépend des conditions locales d'environnement de ceux-ci (position dans le couvert, orientation, quantité d'eau interceptée).

GILLESPIE & DUAN (1987) comparent deux capteurs : l'un plat et l'autre cylindrique par rapport à l'observation sur une culture d'oignons ; le dépôt de rosée et le taux d'évaporation sont fonction de la taille du capteur et de la vitesse du vent, ces deux paramètres étant déterminants de la valeur des coefficients d'échange des capteurs.

Ce type de capteur est le seul bien adapté à une utilisation en routine, placé en conditions standard à une hauteur donnée, au-dessus du couvert. Toutefois, il ne permet pas de représenter la variabilité spatiale de l'humectation à l'intérieur du couvert.

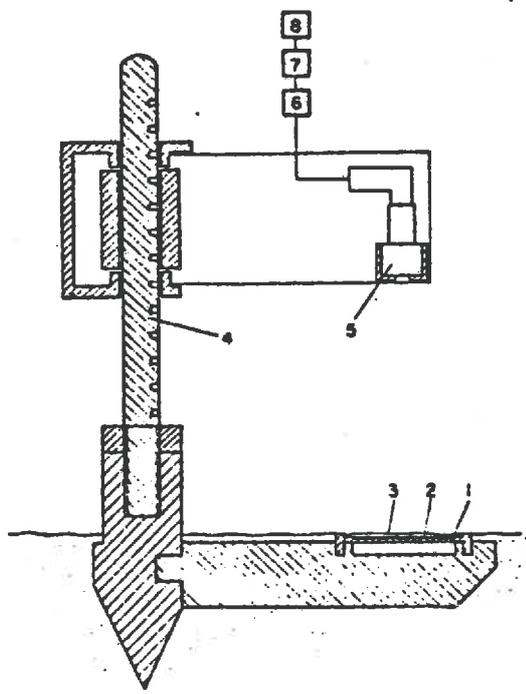


Fig. 17a - Vue en coupe du capteur de rosée de BUNNENBERG & KUHN (1977) permettant de mesurer la hauteur d'eau déposée sur une surface (végétal ou sol)

- 1 : source ; 2 : couche de sol de 1mm
- 3 : surface du sol ; 4 : support
- 5 : détecteur ; 6, 7, 8 : traitement du signal

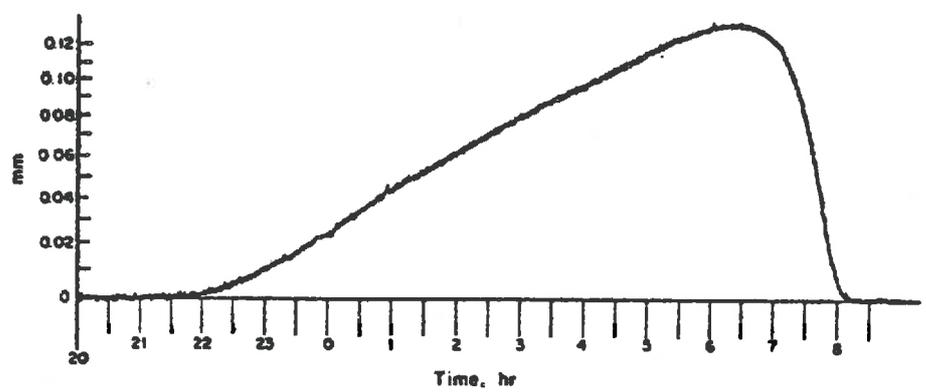
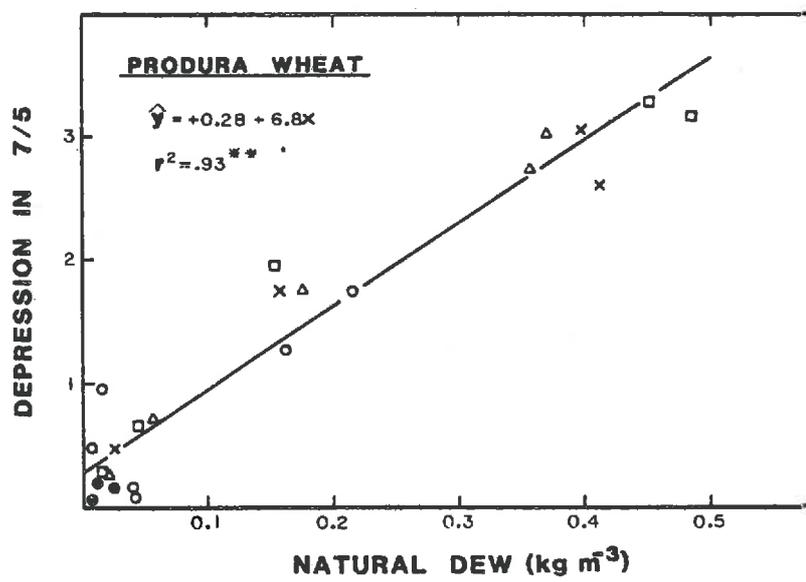


Fig. 17b - hauteur rosée mesurée en fonction du temps à l'aide du capteur à absorption β (fig. 17a)
La surface réceptrice est placée à 9 cm du sol

Fig. 18 - Rapport de radiances MSS7/MSS5 en fonction de la densité volumique moyenne de rosée déposée sur un couvert de blé (5 parcelles différentes (PINTER, 1982))



iiii) Les capteurs de type radiométrique présentent un certain intérêt en tant qu'instrument de comparaison pour les essais en laboratoire ou au champ dans le but de calibrer les capteurs de type électronique : ceux-ci permettent une estimation sans destruction et directement sur le matériel végétal (amélioration par rapport au drosomètre) des hauteurs de rosée ou de pluie. Nous citerons deux principes de mesure présentés dans la littérature :

- absorption β : BUNNENBERG & KUHN (1977) ont mis au point un dispositif (FIG. 17 a) permettant d'estimer la hauteur de rosée déposée sur le sol ou une surface végétale ; ce dispositif est repris par BARTHAKUR (1985) dans une comparaison avec un capteur électronique. Celui-ci montre que la limite de détection du capteur à absorption β est plus basse que celle du capteur de durée d'humectation (WEISS & HAGEN, 1983), mais par contre, ce dernier donne satisfaction en toute condition de pluie alors que le capteur radiométrique trouve sa meilleure utilisation par temps de rosée et présente certains dysfonctionnements par forte pluie. La figure 17 b illustre l'utilisation de ce type de capteur.

- utilisation de rapport de radiances ($0,8 - 1,1 \mu\text{m}$)/($0,6 - 0,7 \mu\text{m}$) : PINTER (1986), pour l'estimation des hauteurs de rosée, représente les rapports de radiances (MSS7/MSS5) en fonction de la densité volumique moyenne de rosée d'un couvert de blé (fig. 18). Les résultats obtenus sont tout-à-fait intéressants si l'on souhaite calibrer une mesure non destructive de la rosée (et surtout dans l'optique des traitements d'images satellite LANDSAT). La rosée induit une modification de la proportion IR/rouge qui est causée principalement par un accroissement de la radiance rouge due à la réflexion spéculaire* des gouttelettes de rosée : une forte densité volumique de rosée ($0,4 \text{ kg.m}^{-3}$) diminue la proportion IR/rouge dans un rapport 3.

Les capteurs radiométriques présentent donc un intérêt certain soit au laboratoire, soit au champ, mais pour une mesure ponctuelle dans le cas de rosées.

Sans vouloir anticiper sur les conclusions des expérimentations, on peut dire que l'information fournie par les capteurs est intéressante, surtout dans le cas des rosées, en complément à la modélisation dans le cas des pluies.

* réflexion spéculaire : elle obéit aux lois de l'optique établies pour les miroirs.

3 - Pratique agricole

Dans l'état actuel de la pratique des instituts techniques, il apparaît (communication personnelle, WEHRLÉN, ACTA) que la durée d'humectation est peu employée (bien qu'un capteur équipe les stations agroclimatiques CIMEL ainsi que celles du réseau PATAAC) du fait surtout de l'absence d'information sur la manière d'utiliser cette variable. Un des buts de notre étude consiste à clarifier les idées sur ce point.

Sont actuellement utilisés, mais sans conviction particulière sur les performances des capteurs, le KIT-INRA (réseau Tavelure : PINGUET, 1983) et le "BAZIER" par le CETIOM.

c - Organisation de l'étude.

Compte tenu du problème lié à la mesure directe, le but de l'étude est d'effectuer une modélisation de la durée d'humectation avec une variable d'espace, c'est-à-dire, en divisant le couvert végétal en un certain nombre de strates. En effet, comme nous le verrons plus loin dans la présentation des résultats, il existe une différence conséquente de durée d'humectation entre le haut et le bas du couvert (cf E I b). Pour chacune de ces strates, le modèle calculera une durée d'humectation postérieurement à une pluie ayant saturé le couvert, sachant, comme le montrera l'expérience, que, dans ce cas (ou celui d'une très forte rosée), le séchage du couvert va se dérouler de telle sorte que les durées d'humectation peuvent différer de plusieurs heures (jusqu'à 10 h) entre le sommet et la base du couvert en fonction des conditions météo. En particulier, un ciel couvert uniformément et une humidité élevée de l'air postérieurement à une pluie entraînent de très longues durées d'humectation et une persistance prolongée de l'eau libre dans les zones basses du couvert. On voit donc la nécessité de prendre en compte l'évaporation de cette eau libre dès lors qu'on cherche à repérer les très longues durées d'humectation permettant la réussite des phases de contamination des spores de champignons pathogènes sur les feuilles.

En effet, il s'agit de repérer si, entre deux pluies, le couvert connaît une phase pendant laquelle il est complètement sec ou non. A terme le but de la modélisation poursuivi est donc de piloter à partir des données du mésoclimat le paramètre "présence d'eau sur les feuilles" pour différents niveaux dans la végétation.

Une autre question se pose alors : est-il possible de connaître avec une précision suffisante les variables de forçage au-dessus de la parcelle dans les situations météorologiques qui retiennent notre attention, à savoir : longues périodes à forte couverture nuageuse et humidité élevée s'accompagnant d'une quasi neutralité thermique de l'atmosphère. On tentera d'y répondre dans l'étude expérimentale.

On limite l'étude au cas de la pluie, réservant l'étude de la rosée pour des perspectives ultérieures, sachant que notre connaissance des transferts à l'intérieur du couvert en conditions de stabilité thermique (propices à l'occurrence de condensations) est encore fort insuffisante et ne progressera vraisemblablement que lentement (NORMAN, 1982)

Le plan de l'étude sera le suivant :

- Le chapitre B exposera les notions de mouillabilité et d'angle de contact et traitera de l'interception des couverts et de la dynamique de l'eau à l'interface végétation-atmosphère.
- Le chapitre C traitera de la modélisation des échanges de masse et d'énergie de surfaces partiellement mouillées, à l'échelle d'un organe et d'un couvert ; c'est là que nous proposerons la modélisation des transferts retenue pour le calcul des durées d'humectation à l'intérieur du couvert.
- Le chapitre D décrira les conditions expérimentales, techniques et méthodes retenues pour le contrôle du modèle.
- Le chapitre E exposera les résultats et discussions.

- B -

CARACTERISATION DE L'INTERCEPTION DU COUVERT

L'observation de différents couverts après une précipitation (pluie, rosée, brouillard, irrigation) montre une extrême variabilité du mode de répartition de l'eau à la surface des organes végétaux.

Cette variabilité est imputable à la forme des organes végétaux, leur disposition dans l'espace (en liaison avec l'égouttement et l'écoulement le long des tiges), la nature physico-chimique de la surface (qualité de l'épiderme, présence ou absence de cires hydrophobes et de poils), le type de précipitation.

Il est particulièrement difficile de prendre en compte cette variabilité ; néanmoins, il est possible de faire certaines distinctions entre les plantes en considérant la mouillabilité de la surface foliaire ou leur capacité d'interception à l'échelle du couvert (paramètre important de la dynamique de l'eau à l'interface végétation-atmosphère) en partie déterminante de la durée d'humectation.

I - MOUILLABILITE

a - Concepts

1 - Thermodynamique des interfaces fluides

La présence d'eau superficielle sur les organes végétaux résulte d'un équilibre entre forces d'adhésion et forces gravitaires. Les molécules d'un liquide à l'interface de deux phases (liquide et gaz) ne subissent pas une attraction uniforme comme celles qui sont présentes dans la masse du liquide ; cette attraction non uniforme est à l'origine de la tension interfaciale liquide gaz.

Pour une interface sphérique, l'équation de Kelvin-Laplace donne à l'équilibre de la goutte (SOUCHAY, 1968)

$$P_L - P_G = \frac{2\gamma}{r} \quad \begin{array}{l} \gamma : \text{tension interfaciale (liquide-vapeur)} \\ r : \text{rayon de la goutte} \end{array} \quad (B.1)$$

P_L : pression à l'intérieur de la goutte (phase liquide L)

P_G : pression à l'extérieur de la goutte (phase vapeur G)

Soit un système à un composant formé de 2 phases liquide et gaz (interface liquide-gaz d'une goutte) tout changement d'énergie interne d'un système considéré s'écrit :

$$dU = TdS + PdV + Yds + \mu dn \quad (B.2)$$

A l'équilibre de l'interface, si l'on considère les potentiels chimiques de chaque phase pour une transformation réversible, isochore, isotherme et sans réaction, la relation de Gibbs-Duhem donne :

$$\Delta\mu_G = \int_{P_\infty}^{P_G} \bar{V}_G dp$$

μ_G potentiel chimique gazeux

\bar{V}_G : volume molaire de l'eau vapeur

$$\Delta\mu_L = \int_{P_\infty}^{P_L} \bar{V}_L dp$$

μ_L potentiel chimique liquide

\bar{V}_L : volume molaire de l'eau liquide

P_∞ : pression de vapeur à l'équilibre pour une interface plane.

Si l'on suppose que la vapeur est un gaz parfait, l'égalité des potentiels chimiques donne :

$$RT \ln \frac{P_G}{P_\infty} = \bar{V}_L (P_L - P_\infty)$$

or $P_L - P_V = \frac{2\gamma}{r}$ (équation de Kelvin)

d'où finalement

$$\ln \frac{P_V}{P_\infty} = \frac{\bar{V}_L}{RT} \times \frac{2\gamma}{r} \quad (B.3)$$

lorsque le rayon diminue, la pression d'équilibre de la goutte augmente.

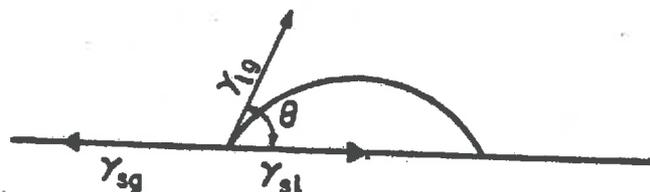
Une autre conséquence de l'équation de Kelvin est que la chaleur de vaporisation de petites gouttes est plus faible que celle donnée par la formule de Clausius-Clapeyron

$$\Delta H = \Delta H^{\infty} - \frac{2\gamma V_L}{r} \quad (\text{B.4})$$

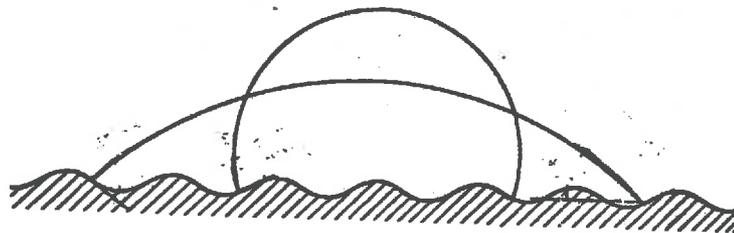
Pour de très petites gouttes, on ne peut pas considérer que la chaleur de vaporisation est indépendante du rayon de la goutte ; la modélisation ne retiendra pas cette remarque sachant que la rosée est hors de notre champ d'étude

Concernant les valeurs de γ , celles-ci varient en fonction de la température, mais on peut la considérer comme constante dans le domaine 10 - 30° C, de l'ordre de 7000 dyn.m⁻¹

2 - Angle de contact et cas des interfaces à 3 phases



Goutte d'eau à l'équilibre sur une paroi lisse



Deux configurations possibles pour l'équilibre d'une goutte sur une surface rugueuse

Soit une goutte d'eau soumise à la gravité et située sur un plan horizontal :

L'équation de Young donne la relation suivante entre les 3 tensions interfaciales à l'équilibre de la goutte (SOUCHAY, 1968) :

$$\gamma_{lg} \cos \theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl}$$

(B.)

où θ est l'angle de contact défini sur le schéma.

La notion d'angle de contact suppose une surface lisse et rigide permettant de définir une tension interfaciale γ_{sl} de manière analogue à γ_{lg} c'est là que se trouve le noeud du problème de la signification d'une mesure d'angle de contact sur des surfaces non homogènes.

b - Sources de variations de l'angle de contact.

1 - Caractéristiques biologiques

Il est bien connu (FOGG, 1947) que l'angle de contact va varier en fonction de l'âge de la feuille (les jeunes feuilles sont en général moins mouillables), du degré de salissure de celle-ci, de la plus ou moins grande richesse en substances hydrophobes de l'épiderme, des blessures foliaires éventuelles et de la rugosité, de la présence d'hyphes* mycéliennes

2 - Caractéristiques physiques

La nature des précipitations (brouillard, rosée, pluie, irrigation), la granulométrie, leur durée et intensité sont à l'origine de variations de l'angle de contact.

Dans le cas de la fève, plante retenue pour l'expérimentation, une pluie brève entrainera un dépôt de gouttes pour lesquelles l'angle de contact sera voisin de celui que l'on peut mesurer au laboratoire ; par contre, une averse ou un orage aboutiront à une humectation continue des feuilles en fin de journée. Sur des feuilles à maturité de fève, FOGG (1947) trouve un angle de contact variant de 29 à 60°.

* hyphe : filament à structure cellulaire ; l'ensemble des hyphes forme un mycélium d'un champignon.

Toutes ces sources de variation ne permettent pas de caractériser simplement le mode de répartition de l'eau. Cette complexité appelle des simplifications. Il faut cependant noter que ces simplifications ne sont pas sans conséquence sur le résultat final car pour une même quantité d'eau interceptée, le mode de répartition (grosses gouttes peu nombreuses ou très nombreuses petites gouttes) entraîne des différences non négligeables de pourcentage de feuilles mouillées et donc de répartition entre évaporation directe d'eau de pluie et évapotranspiration via les stomates.

c - formes de distribution de l'eau sur les feuilles.

Schématiquement, l'eau déposée sur les feuilles peut prendre 2 formes de mode de répartition : film continu ou gouttes distribuées sur la surface. Le mode de répartition de l'eau dépend de la nature de la feuille (fonction de l'espèce et de l'âge) et dépend également de la nature des précipitations. Ainsi, une pluie fine et continue (générée par des nimbostratus) ne mouillera que la face supérieure des feuilles et aura tendance à produire un film d'eau continu, tandis que la rosée ou une forte averse mouilleront les deux faces, la première distribuant de fines gouttelettes, la deuxième créant un film d'eau ; toutes les situations intermédiaires existent entre ces deux situations opposées.

Afin de mettre en oeuvre ultérieurement une modélisation de la durée d'humectation et excluant le cas de la rosée, il importe de voir comment s'effectue la résorption des gouttes consécutive à une pluie par rapport à celle d'un film d'eau.

BUTLER (1986) a proposé un modèle d'évaporation des gouttes dans lequel il montre que, à partir d'une distribution log-normale des diamètres de gouttes (sur couvert de blé), la durée d'humectation est essentiellement dépendante de l'évaporation des gouttes de plus grand diamètre.

A condition de ne considérer que des gouttes assez grosses (rayon de base \gg hauteur), on peut aboutir à suggérer que l'ensemble des situations se ramène à la résorption d'un film dont la surface pourra être une fraction importante (film d'épaisseur faible) ou faible (gouttes assimilées à des cylindres) de la surface foliaire. Pour s'en convaincre, il suffit d'effectuer la comparaison entre la résorption d'une goutte de type "calotte sphérique" proche de l'observation visuelle et celle d'une goutte de type "cylindre" inexistante dans la nature mais permettant de se ramener à la situation "film d'eau" (LECLERC, 1985).

Soient deux gouttes de même volume V dont la première est une calotte sphérique de rayon r_1 et de hauteur h_1

$$V = \frac{\pi}{6} h_1 (h_1^2 + 3 r_1^2) \quad (\text{B.1})$$

et l'autre un cylindre plat de rayon r_2 et de hauteur h_2

$$V = \pi r_2^2 h_2 \quad (\text{B.2})$$

$$\text{si } r_2 = r_1 \text{ alors } h_2 = \frac{h_1}{2} \left(1 + \frac{h_1^2}{3r_1^2} \right)$$

$$\text{soit } h_2 \sim \frac{h_1}{2} \text{ pourvu que } h_1 \text{ et } h_2 \ll r$$

Les surfaces d'échange des 2 gouttes sont respectivement :

$$S_1 = \pi (r_1^2 + h_1^2) \quad (\text{B.3})$$

$$S_2 = \pi r_2^2 + 2\pi r_2 h_2 \quad (\text{B.4})$$

et donc voisines

Leurs évaporations (et donc leurs variations de volume) sont donc quasiment identiques sur un même intervalle de temps.

Dès lors leurs variations de hauteur relative sont identiques (si leurs rayons restent égaux) parce que $dh_1 = 2dh_2$.

Les durées d'humectation sont donc les mêmes et le problème de résorption d'une goutte peut être ramené à celui d'un film. Ceci étant, reste comme nous le verrons plus tard à faire la part dans la résorption entre réduction de hauteur et de surface (ce qui dans le cas d'un film reviendra à paramétriser la pondération entre diminution de surface et diminution d'épaisseur).

Pour être exhaustif, il faudrait envisager un couvert avec zone d'accumulation, mais on arrive alors à une spécialisation fonction de chaque type de couvert. Cette spécialisation nuirait à l'aspect assez général que nous souhaitons conserver à la modélisation, même si l'on perd en précision le modèle ; en effet, on ne peut prétendre que l'humectation du couvert est identique dans les cas d'un blé, d'un maïs ou d'une féverole. Si nous avons

choisi cette dernière culture comme plante-modèle (en plus de l'intérêt manifesté par les pathologistes), c'est en raison de la structure simple de son port et de la simplicité relative de l'humectation des feuilles.

II - INTERCEPTION DES COUVERTS ET DYNAMIQUE DE L'EAU LIBRE A L'INTERFACE VEGETATION-ATMOSPHERE

Dans ce chapitre, on reprend brièvement les éléments classiques ayant trait à l'interception des couverts très largement étudiée dans le cas des forêts. La figure n° 19 permet de synthétiser les différentes variables utilisées pour décrire l'interception d'un couvert.

a - Définitions

1 - Précipitations brute et nette

La hauteur d'eau mesurée au-dessus du couvert constitue la précipitation brute P_b . La hauteur d'eau mesurée au sol est la précipitation nette P_n formée de l'écoulement le long des tiges, de l'égouttement à partir des feuilles et de la précipitation directe.

$$P_n = P_d + E_g + E_c$$

(B.10)

2 - Interception brute et nette

L'interception brute est la différence entre précipitation brute P_b et précipitation directe

$$I_b = P_b - P_d$$

(B.11)

L'interception nette est la partie de l'eau qui reste sur le couvert végétal, une fois soustraits à l'interception brute l'écoulement et l'égouttement

$$I_n = I_b - E_g - E_c = P_b - \underbrace{(P_d + E_g + E_c)}_{P_n} = P_b - P_n$$

(B.12)

L'interception nette est donc la différence entre la pluie brute et la quantité parvenant finalement au réservoir sol (c'est à dire la pluie nette).

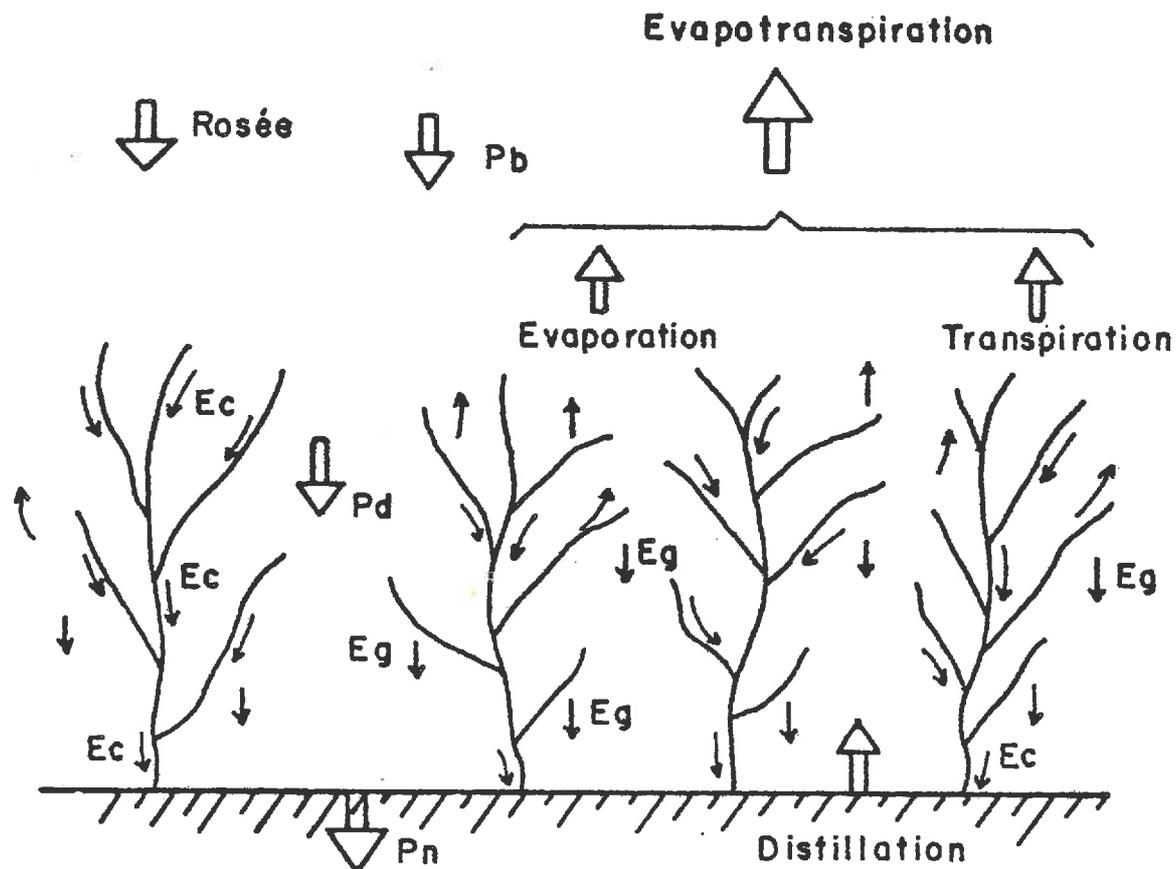


Fig. 19 - Schéma simplifié de la dynamique de l'eau dans le couvert végétal

Pb : précipitation brute ; Pd : précipitation directe

Pn : précipitation nette ; Ec : écoulement ; Eg : égouttement

Dans le cas qui nous intéresse, c'est l'interception nette qui sera un paramètre du modèle ; il s'agit alors de l'estimer : on rapporte ici les valeurs trouvées dans la littérature, les mesures que nous avons effectuées seront présentées dans les résultats de l'expérimentation.

b - Paramétrisation de l'interception. et capacité de stockage du couvert

Une bibliographie considérable traite de l'interception des couverts forestiers, en raison de l'importance que revêt celle-ci en hydrologie. Citons, pour mémoire, les modèles de RUTTER, GASH, CHASSAGNEUX ; on va en retirer quelques idées.

L'interception nette d'un couvert est fonction de très nombreux paramètres. Les facteurs suivants sont déterminants : P_b , LAI, type et durée de précipitation.

I - Couvert considéré globalement

Pour trouver la valeur de la capacité de stockage du couvert à saturation (C_{max}), LEYTON (1967) propose de tracer le nuage de points P_n en fonction de P_b (cf figure n° 20)

Le nuage est théoriquement limité par la droite de pente égale à 1 et d'ordonnée à l'origine - C_{max} ; cette droite représente la relation $P_n = f(P_b)$ pour des conditions d'évaporation minimale.

Il faut pour tracer cette courbe un nombre de points élevé, ce qui est difficile à concilier avec la croissance d'une plante annuelle, la relative rareté des situations météo favorables, et la technologie délicate de mesure de l'interception sous couvert bas. On proposera un ensemble de mesures sur féverole susceptibles d'estimer cette capacité de stockage, sachant que celle-ci détermine très largement (comme le montre le modèle) la durée d'humectation des feuilles.

BURGY & POMEROY (1958), MERRIAM (1961), LEYTON (1967), COUTURIER & RIPLEY (1973) ont publié sur l'interception d'écosystèmes prairiaux ; KOLODZIEJ, LINIEWIEZ, ORZEL (1973), BUTLER & HUBAND (1985) sur blé.

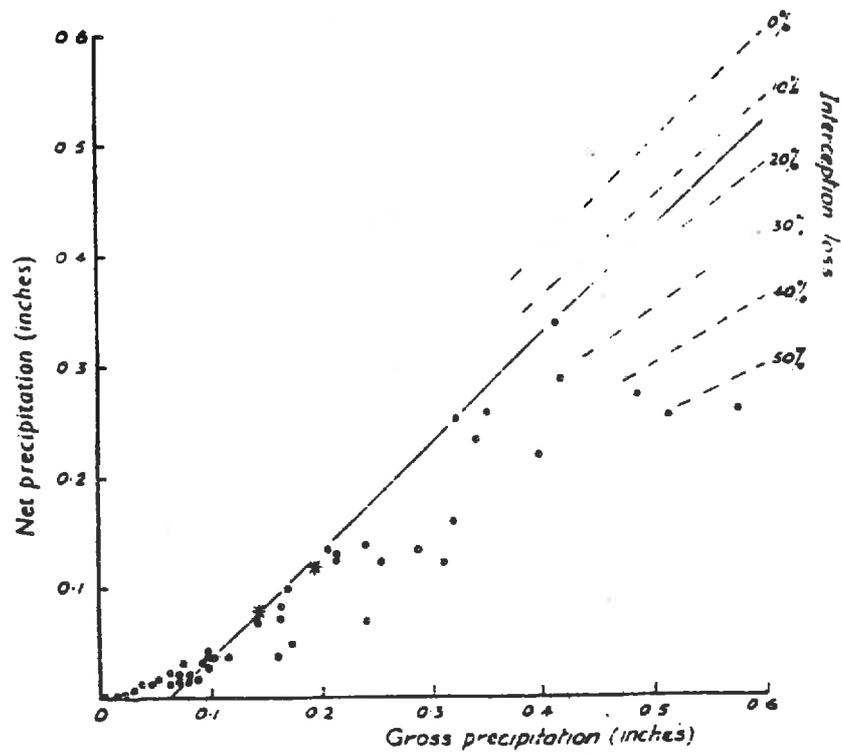


Fig. 20 - Précipitation nette en fonction de la précipitation brute pour différentes conditions d'évaporation sur une plantation de sapins (LEYTON, 1967)

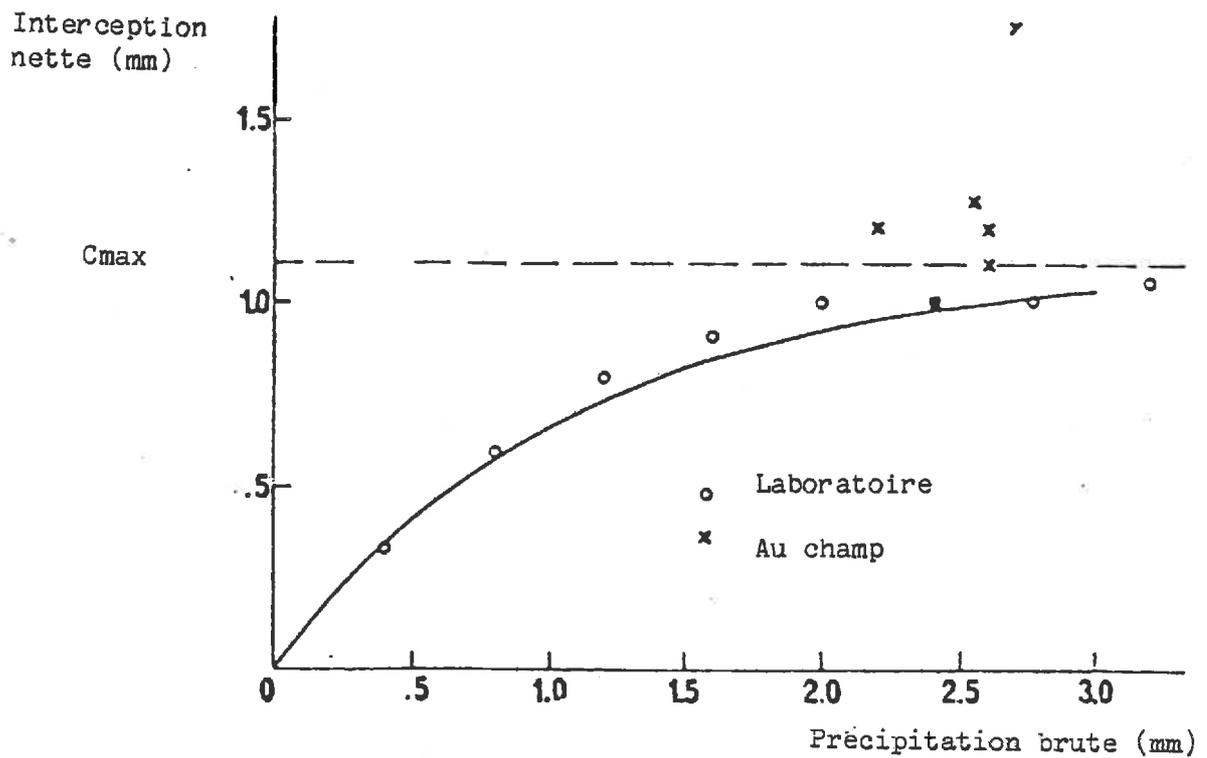


Fig. 21 - Interception nette en fonction de la précipitation brute sur une prairie mixte (tiré de COUTURIER & RIPLEY, 1973)

Le tableau suivant donne des résultats expérimentaux tirés de la littérature (MONTEITH, 1975).

Végétation	Epaisseur totale de la lame d'eau interceptée (mm)
Conifères	1,0 - 2,1
Feuillus	0,4 - 1,0
Ericacées	2,0
Plantes herbacées	
Maïs	0,4 - 0,7
Prairie	1,0 - 1,2
Autres	0,5 - 2,8

Dans le cas d'une prairie mixte, COUTURIER & RIPLEY (1973) ont montré l'importance du feuillage mort dans l'interception, du fait de son hydrophilie : la quantité d'eau moyenne retenue par Agropyron sp. et ramenée à la matière sèche passe de 0,4 (0,2 - 0,6) pour des feuilles jeunes à 3,5 (2,0 - 4,5) pour des feuilles sénescentes. Par ailleurs, ces auteurs présentent une formulation mathématique donnant l'interception nette en fonction de P_b et C_{max} relativement bien vérifiée expérimentalement (cf figure n° 21).

Pour un couvert dont le LAI est couvrant on a les deux conditions :

$$\frac{d I_n}{d P_b} = 1 \text{ quand } P_b \rightarrow 0 \text{ et } I_n(\infty) = C_{max}$$

La courbe suivante satisfait à ces conditions :

$$I_n(P_b) = C_{max} \left(1 - \exp \left(- \frac{P_b}{C_{max}} \right) \right) \quad (B.13)$$

Mais ce type de formulation cache une très grande variabilité en fonction du type de précipitation (intensité, durée), du stade de croissance, du type de culture ; l'ensemble de ces paramètres est difficile à prendre en compte à même hauteur de pluie, l'interception sera plus élevée pour une pluie fine par rapport à un orage.

2 - Couvert divisé en strates

Dans le cas d'une pluie inférieure à la capacité de stockage du couvert il convient de répartir la lame d'eau totale sur les différentes strates.

En l'absence de mesures et face à la difficulté qu'une telle estimation représenterait, on se contentera d'une répartition simulée. Chaque strate est caractérisée par sa capacité de stockage proportionnelle au LAI partiel celle-ci, et l'on suppose que l'on peut écrire, pour un angle d'incidence la pluie égale à 90° par rapport aux feuilles horizontales, que la fraction d'interception de la strate i est donnée par (RUTTER & MORTON, 1977) par analogie avec le transfert radiatif abondamment décrit dans la littérature

$$f_i = \exp(-0,5 F_{(i)}) - \exp(-0,5 F_{(i-1)}) \quad (B)$$

où F est la fonction cumulative d'indice foliaire depuis le sommet du couvert ; ainsi la fraction atteignant le sol est donnée par $\exp(-0,5 LAI)$.

Dans la modélisation, on raisonnera, avec un couvert saturé d'eau libre ce qui est le cas le plus fréquent dans les situations dépressionnaires avec pluie continue suivies par une période avec forte couverture nuageuse humidité élevée pendant laquelle on cherche à modéliser la cinétique d'évaporation.

Les considérations précédentes pourront être employées dans l'utilisation récurrente du modèle sur un ensemble de périodes pluvieuses entrecoupées de périodes d'évaporation avec l'objectif de repérer les longues durées d'humectation dans les zones basses du couvert qui sont naturellement les plus longues à sécher.

Le chapitre suivant traite de la modélisation, à savoir les paramétrisations retenues et expose les choix effectués. Ce chapitre sera divisé en deux : dans un premier temps, on reprend brièvement les éléments bibliographiques relatifs à la durée d'humectation d'un organe végétal ; dans un deuxième temps, on décrit la modélisation retenue à l'échelle du couvert divisé en strates.

- C -

MODELISATION DES TRANSFERTS DE MASSE ET D'ENERGIE

DE SURFACES VEGETALES PARTIELLEMENT MOUILLEES

Il existe deux échelles classiquement retenues dans la modélisation des transferts de masse et d'énergie au niveau des surfaces végétales.

A l'échelle d'un organe (feuille, fruit), on trouve quelques modèles de durée d'humectation : durée de rosée sur une gousse de cacaoyer, durée de rosée sur une feuille du sommet d'un couvert, durée d'humectation (pluie ou rosée) d'un capitule de tournesol ; à l'échelle du couvert, certains auteurs présentent des simulations de durée d'humectation consécutive à une pluie ou à une rosée.

Après une description de ces modèles, on fera quelques rappels sur les transferts turbulents au-dessus et à l'intérieur du couvert. On présente ensuite la modélisation retenue (type de modèle, hypothèses, variables de forçage, schéma mis en oeuvre, paramétrisations, conditions initiales et finales).

I - A L'ECHELLE D'UN ORGANE

Un certain nombre de publications s'intéressent à la modélisation de la durée d'humectation d'un organe particulier :

- durée de rosée sur un capteur d'humectation (MINTAH, 1977)
- durée de rosée sur une gousse de cacaoyer (MONTEITH & BUTLER, 1979 ; BUTLER, 1980)
- durée de rosée sur une feuille du sommet du couvert (PEDRO & GILLESPIE, 1982)
- durée d'humectation (pluie ou rosée) d'un capitule de tournesol (PAYEN, 1983)

Tous ces exemples de modélisation se fondent sur le bilan d'énergie de la feuille, l'organe ou le capteur calculé à partir des variables de forçage du microclimat ou des variables météorologiques standard. A titre d'illustration, on va développer les trois modèles les plus récents.

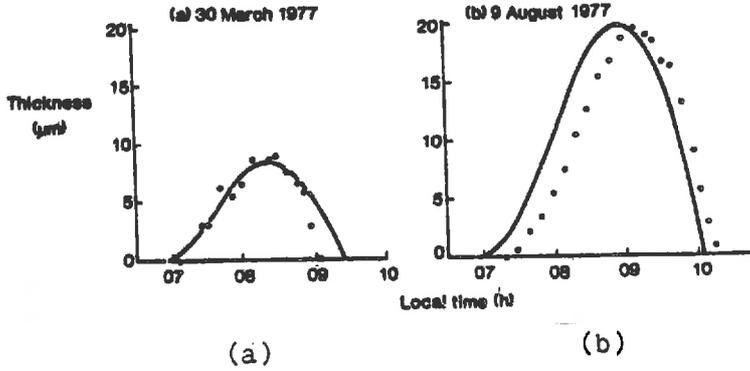


Fig. 22 a & b - Comparaison valeurs calculées et mesurée hauteur d'eau condensée sur gousses de cacao lors de 2 joi (BUTLER, 1980)

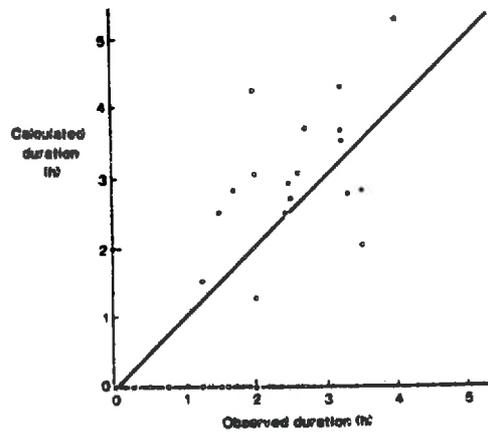
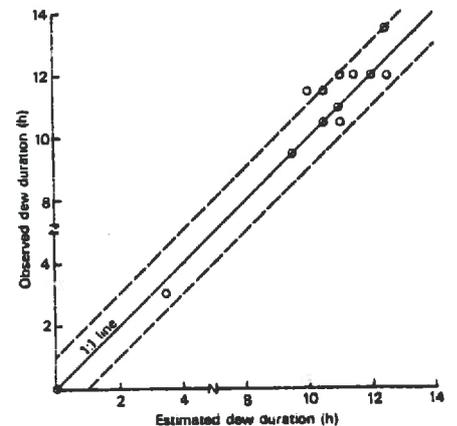
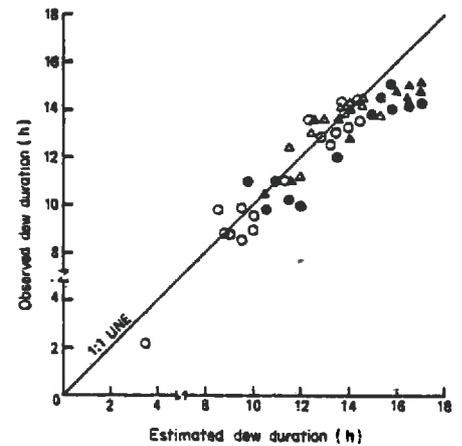


Fig. 22 c - Comparaison des duré rosée observées et calculées à l de données météorologiques de ro (BUTLER, 1980)

Fig. 23 a & b - Comparaison de durée de rosée observées et estimées (a) (PEDRO & GILLESPIE, 1982) : Maïs Soja

- : feuille exposée au rayonnement direct
- : feuille non exposée

(b) (GILLESPIE & BARR, 1983) : feuille cylindrique (culture d'oignons)



(a)

(b)

a - Modèle "BUTLER & MONTEITH" (1979)

Il s'agit de simuler la formation de rosée préjudiciable aux gousses de cacao en rapport avec le champignon *Phytophthora palmivora* dont les zoospores germent dans un film d'eau.

Ce modèle décrit la durée et l'épaisseur moyenne du film d'eau calculées à partir du bilan d'énergie de la gousse considérée comme un corps isotherme avec des propriétés thermiques homogènes ; le modèle calcule une épaisseur d'eau condensée de 10 à $20 \cdot 10^{-6} \text{m}$ qui se dépose quand l'air au lever du soleil est presque saturé.

BUTLER (1980) présente une version modifiée du modèle utilisant des données météorologiques standard. La température de la gousse et la quantité d'eau condensée calculées à partir du maximum et du minimum de température et de l'humidité à 9 h TU sont en bonne correspondance avec les valeurs mesurées. Les figures n° 22a, b et c permettent d'apprécier la concordance entre les valeurs mesurées et calculées de durée de rosée sur les gousses.

b - Modèle "GILLESPIE" (1982)

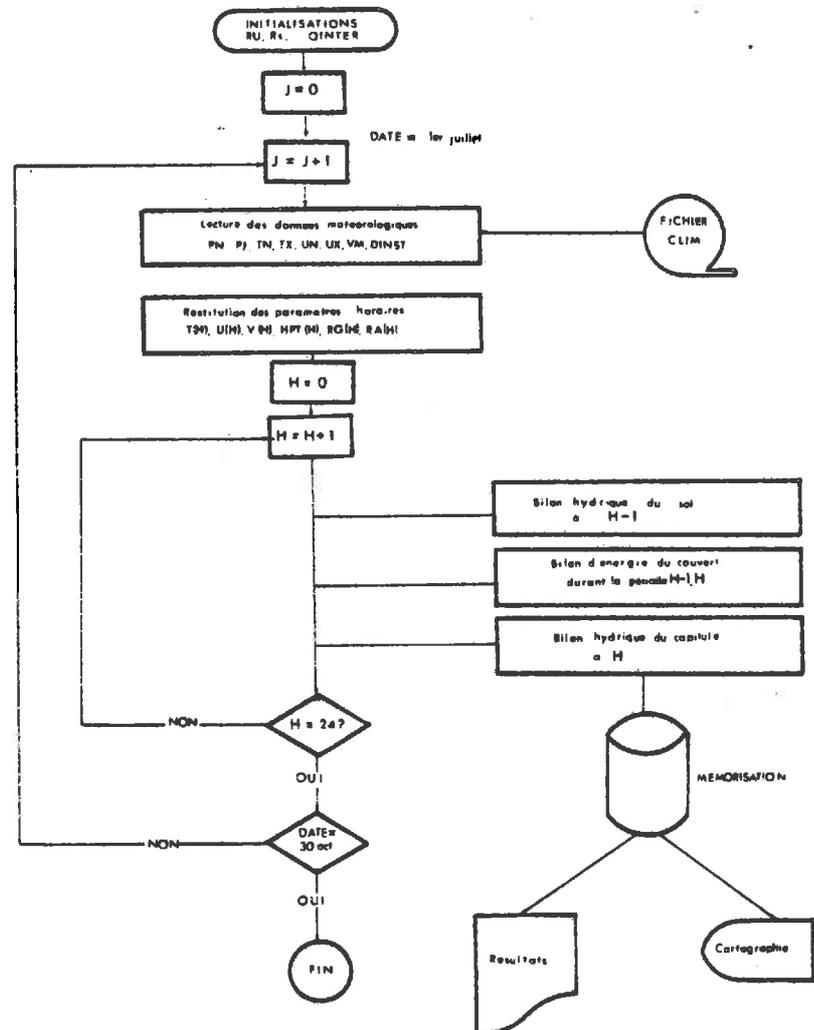
Trois articles (PEDRO & GILLESPIE, 1982, 1983 ; GILLESPIE & BARR, 1984) présentent l'utilisation d'une approche de bilan d'énergie pour simuler, soit à partir des données micrométéorologiques (1er article), soit à partir des données standard du parc météo (2ème article), la durée de rosée d'une feuille au sommet du couvert.

On distingue le cas de deux positions de la feuille, selon qu'elle est ou non soumise au rayonnement direct.

La résolution de l'équation du bilan d'énergie de la feuille permet de trouver sa température par itération à partir des valeurs connues de température de l'air et humidité relative, rayonnement, vitesse du vent (pour le calcul des coefficients d'échange). A partir de cette température foliaire, on calcule le flux de chaleur latente :

- si LE est négatif, il y a occurrence de rosée
- la rosée dure le matin jusqu'à ce que la hauteur déposée se soit évaporée.

On peut juger de la validité du modèle au vu de la comparaison modèle-mesures (fig. n° 23 a et b)



- | | |
|---|---|
| DINST : Durée d'insolation | Rs : résistance du couvert végétal |
| HPT(H) : pluie supposée tombée pendant la période H-1,H | RU : réserve utile du sol |
| PJ : pluie de jour | T(H) : température à l'heure H |
| PN : pluie de nuit | TN : température minimale du jour |
| QINTER : capacité maximale d'interception d'eau par le capitule | TX : température maximale du jour |
| RA(H) : rayonnement atmosphérique durant la période H-1,H | U(H) : humidité relative à l'heure H |
| RG(H) : rayonnement global durant la même période | UN : humidité relative minimale du jour |
| | UX : humidité relative maximale du jour |
| | V(H) : vent à l'heure H |
| | VM : vent maximal du jour |

Fig. 24 a - Organigramme simplifié du modèle Sclerotinia (PAYEN, 1983)

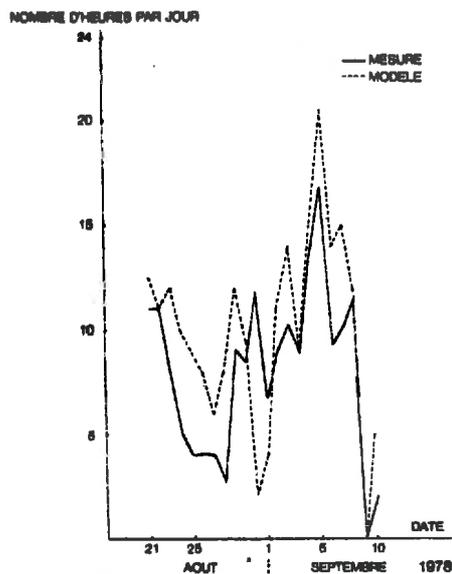


Fig. 24 b - Simulation du modèle Sclerotinia sur la période 15/08 - 15/09/78 et comparaison avec l'humectographe du STEFCE

c - Modèle "PAYEN" (1983)

Ce modèle calcule à partir des données météo standard la durée d'humectation d'un capitule de tournesol ; à partir d'une valeur estimée de 0,45 mm pour la capacité de stockage du capitule, le modèle gère ce stock en fonction de données météo : les entrées sont constituées par la pluie et les condensations, les sorties par l'évaporation de l'eau libre à la surface du capitule. La figure n° 24a donne l'organigramme du modèle "Sclerotinia". Ce modèle a en effet été mis au point pour repérer les longues durées d'humectation déterminantes (au moins 40 h) dans la contamination du capitule de Tournesol par le champignon *Sclerotinia sclerotiorum* ; la figure n° 24 b illustre une application du modèle sur la période du 15/08 au 15/09/1978 avec le calcul du nombre d'heures d'humectation par jour. Ce modèle a été utilisé pour déterminer la potentialité climatique de la maladie en France. Un des résultats importants du modèle est que la durée d'humectation va surtout dépendre de la situation météorologique (3 types de situation avec un effet important du topoclimat)

Valable à l'échelle d'un organe, ce modèle demeure d'usage difficile en particulier à cause des chutes de pluie qui ne sont connues que par périodes de 12 heures, ce qui est évidemment limitatif. L'intérêt essentiel de ce modèle est son utilisation en zonage climatique de potentialité de développement du champignon. Par rapport à la modélisation que l'on va présenter, il a l'avantage de fonctionner sur des fichiers climatologiques standard, par contre, sa capacité de prévision est nettement moins précise : cela tient d'une part au pas de temps pris en compte (3 h) alors que nous utilisons un pas de temps de l'ordre du quart d'heure. D'autre part, et surtout, cela tient à ce que ce type de modèle ne fournit qu'une seule durée d'humectation. Acceptable lorsque l'organe susceptible de la contamination est bien identifié et se trouve au sommet du couvert (cas du *Sclerotinia* sur tournesol) il est inopérant dès lors que l'on veut le transposer à un couvert végétal où les choses ne se passent plus aussi simplement (cas de *Sclerotinia* sur colza). Il faut également signaler que, dans le cas du *Sclerotinia* sur le capitule de tournesol, la durée d'humectation nécessaire (42 heures consécutives) est très longue.

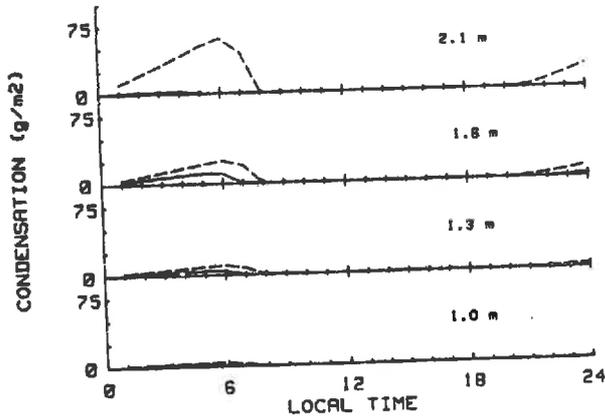


Fig. 25 a - Simulation des épaisseurs de condensation par le modèle CUPIL (NORMAN, 1982) sur une journée et dans 4 strates d'un couvert de maïs

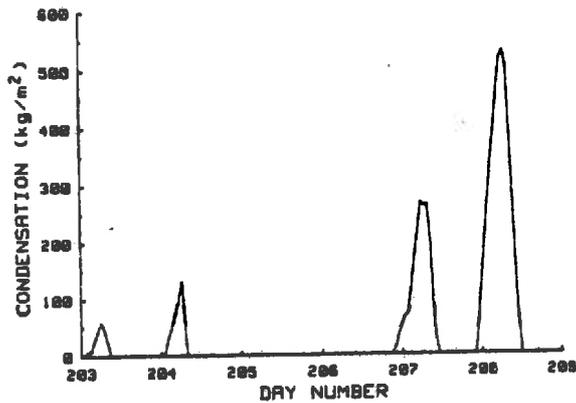


Fig. 25 b - Simulation sur plusieurs jours de l'évolution de la hauteur d'eau totale condensée sur l'ensemble d'un couvert de maïs (NORMAN CAMPBELL, 1983)

Fig. 26 a, b, c et d - Comparaison des pourcentages de surface mouillée par des gouttes prévus par le modèle avec une observation (obs.) visuelle des feuilles de 4 niveaux

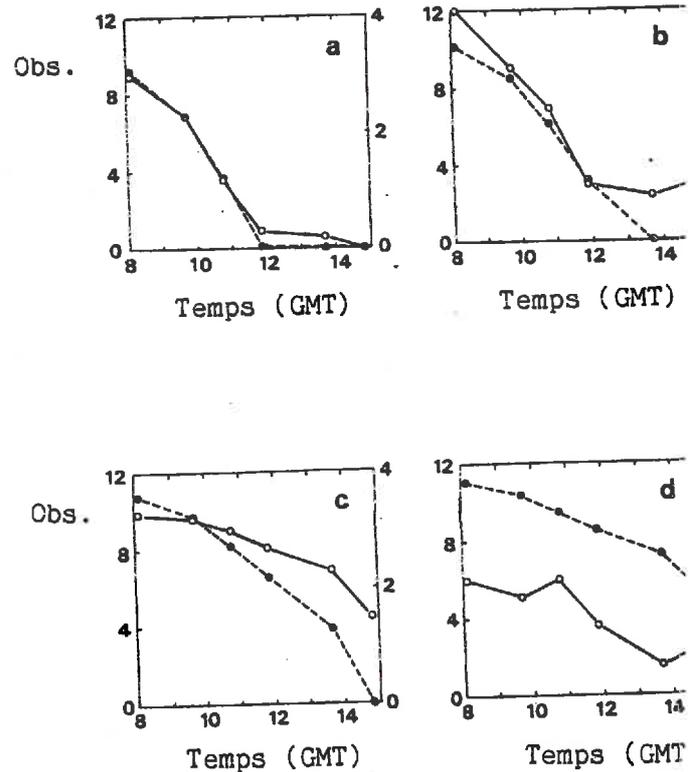
(a) : $z = 0.9 H_c$

(b) : $z = 0.7 H_c$

(c) : $z = 0.5 H_c$

(d) : $z = 0.3 H_c$

L'humectation est estimée avec une échelle de 0 à 5 sur un échantillon de 6 feuilles par niveau (BUTLER, 1985)



II - A L'ECHELLE DU COUVERT

a - Modèles existants

Plusieurs auteurs ont abordé le problème de la modélisation de la durée de mouillage à cette échelle. Nous présenterons rapidement les trois qui nous semblent les plus caractéristiques.

1 - Modèle de THOMPSON (1981)

Il s'agit d'un modèle multi-couche analogue à celui que l'on va développer, mais plus simple ; en particulier, on suppose que chaque couche est caractérisée par une seule température de surface et que l'eau est distribuée en film continu tout le long de l'évaporation.

THOMPSON propose des simulations postérieurement à une pluie ou à une rosée mais sans comparaison avec des résultats expérimentaux.

L'application du modèle à l'évaporation d'eau interceptée par les céréales montre que les couches basses du couvert restent longtemps mouillées pour des périodes prolongées même si l'humidité relative au-dessus du couvert descend en-dessous de 70 %.

Pour la rosée, le modèle montre que le dépôt maximum est observé au sommet du couvert.

2.- Modèle de NORMAN (1982)

Il s'agit d'un modèle du 1er ordre assez élaboré destiné à étudier le bilan hydrique complet d'une culture ; ce modèle constitue un essai d'intégration des mécanismes physiques et physiologiques qui décrit les interactions plante-environnement, il est similaire au modèle SPAM (LEMON & al, 1971) mais plus complet car SPAM n'inclut pas le stress hydrique, les condensations, l'interception des précipitations.

Dans la prévision de la durée d'humectation, NORMAN (1983) insiste sur le fait que la difficulté réside dans l'existence de périodes de rosée postérieurement à une pluie ayant humecté le couvert. Le modèle prévoit des condensations maximales sur maïs de 0,54 mm ; cet ordre de grandeur est

cohérent avec des mesures effectuées par SHARMA (1976), mais NORMAN présente pas de comparaisons modèle-mesure. Sur la figure 25 a et b, on observe les résultats de simulation du modèle CUPID en termes de hauteur de rosée par strate sur une journée et de hauteur totale déposée sur l'ensemble du couvert sur plusieurs jours.

3 - Modèle de BUTLER (1985)

Ce modèle de simulation décrit les flux de chaleur et de vapeur d'eau dans un couvert et inclut l'évaporation de gouttes d'eau sur les feuilles. BUTLER emprunte à COWAN (1968) la méthode d'analyse et de nombreuses hypothèses.

BUTLER utilise une répartition statistique des gouttes (distribution log-normale) et suppose que le rayonnement intercepté par les feuilles est proportionnel à la surface non mouillée des feuilles tandis que le complément est intercepté par la surface obtenue par projection des gouttes normalement sur la feuille.

Une originalité du modèle consiste à introduire un flux de conduction entre les gouttes et les feuilles (BUTLER, 1985). Les auteurs ne sont pas d'accord sur l'importance à accorder à ce flux de conduction (GILLESPIE et DUAN, 1987)

L'auteur propose des simulations des profils et des flux pour différentes conditions aux limites constantes ; il propose également la comparaison entre les sorties du modèle et une observation visuelle de l'humectation sur du couvert d'hiver pour une journée, pour quatre feuilles à différentes hauteurs dans le couvert (cf fig. 26a, b, c, d). Cette comparaison, satisfaisante pour ce qui concerne les feuilles du sommet du couvert est bien moins bonne pour la strate inférieure où l'on constate une sous-estimation de 50 % sur le pourcentage de couverture des feuilles par des gouttes d'eau. Le fait que la durée maximale d'humectation concerne principalement les strates inférieures (et sachant que la connaissance de cette durée est cruciale pour une prévision de contamination) conduit à chercher une amélioration de la modélisation existante.

b - Rappel sur les transferts turbulents

1 - Transferts au-dessus du couvert

Dans les conditions de convection turbulente qui règnent au-dessus des couverts végétaux, on peut, en négligeant le transfert par simple conduction, écrire les flux convectifs sous la forme (PERRIER, 1975) :

- flux de quantité de mouvement $\tau = \rho u'w'$
- flux de chaleur sensible $H = -\rho c_p \theta'w'$
- flux de chaleur latente $LE = -L q'w'$

De plus, au voisinage de la végétation et pour autant que celle-ci soit suffisamment étendue de façon à créer un anneau de garde autour de la zone étudiée ($D > 50$ m), les flux précédemment définis sont conservatifs

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial LE}{\partial z} = 0$$

(C.1)

Par ailleurs, l'analogie de Reynolds permet de définir une diffusivité turbulente et d'écrire les flux convectifs sous la forme d'un produit entre diffusivité turbulente et gradient des scalaires.

$$\tau = \rho K_m \frac{\partial U}{\partial z} \quad H = \rho c_p K_c \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad LE = \rho L K_v \frac{\partial q}{\partial z}$$

On retrouve pour $u(z)$, $\theta(z)$ et $q(z)$ les profils logarithmiques classiques qui, par l'introduction d'une hauteur de déplacement du plan de référence D dans le cas des couverts à faible développement vertical, s'écrivent :

$$u(z) = (u^*/k) \ln ((Z-D)/Z_0) \quad (C.2)$$

$$\theta(z) - \theta_0 = (\theta^*/k) \ln ((Z-D)/Z_{\theta 0}) \quad (C.3)$$

$$q(z) - q_0 = (q^*/k) \ln ((Z-D)/Z_{q 0}) \quad (C.4)$$

Dans les conditions météorologiques qui nous intéressent (humidité élevée, ciel couvert, gradient thermique faible), on peut raisonnablement estimer se trouver en conditions de neutralité thermique (tout à fait vrai après une pluie). Cette considération fait que l'hypothèse de neutralité a été retenue dans la modélisation.

Pour les couverts bas à moyennement développés (sol nu, végétation hauteur inférieure à 1,5 m) les formulations utilisant la notion de diffusivité turbulente fournissent un outil satisfaisant pour l'estimation des flux et des profils au-dessus du couvert ; en revanche sur forêts et couverts à grand développement vertical, la recherche s'attache à trouver des outils de calcul des flux (CELLIER, 1986). La modélisation mise en oeuvre ici ne pourra donc pas être applicable à ce genre de couvert.

2 - Transferts à l'intérieur du couvert

Ce paragraphe constitue le point le plus important ; on présente les différentes démarches proposées dans la littérature afin de simuler les flux et profils au sein de la végétation.

α) Formulation du problème

Le système d'équations à résoudre est le suivant, sachant qu'il existe des termes de production (quantité de mouvement, chaleur, vapeur d'eau) :

Sur un pas de temps inférieur à 10 mn (les moyennes spatio-temporelles de θ , q peuvent être considérées comme constantes sur ce pas de temps.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 = - \frac{\partial(w' u')}{\partial z} + fD + fV \quad \begin{array}{l} fD : \text{trainée de forme} \\ fV : \text{trainée de viscosité} \end{array} \quad (C.1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 = - \frac{\partial(w' \theta)'}{\partial z} + a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (C.2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = 0 = - \frac{\partial(w' q')}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad (C.3)$$

Cette écriture suppose que l'on peut effectuer une intégration spatiale et temporelle des équations de Navier-Stokes et que les opérations d'intégration horizontale commutent au sens mathématique avec la différenciation spatiale (RAUPACH & THOM, 1981).

β) Fermeture des équations

i) au premier ordre (modèle de diffusion locale)

- profil de vent

Les 20 dernières années ont vu se développer de nombreuses modélisations fondées sur une prise en compte simple de la turbulence, à savoir les modèles de diffusion locale (WAGGONER & REIFSNYDER, 1968 ; PERRIER, 1976 ; GOUDRIAN, 1977)

On pose $\tau(z) = \rho u' w' = \rho K_m \frac{\partial U}{\partial z}$ (C.8) pour le flux de quantité de mouvement.

Par ailleurs, l'équation (C.5) donne

$$\frac{\rho \partial u' w'}{\partial z} = f_D + f_V = F \quad (C.9)$$

Il est couramment employé une paramétrisation simple des forces de traînée (essentiellement traînée de forme et de pression, prépondérante devant la viscosité), de la forme

$$F = \rho \frac{C_m(u)}{P_m} f(z) u^2(z) \quad (C.10)$$

où F est la force de traînée totale sur un élément isolé du couvert, $f(z)$ la densité de surface foliaire, $C_m(u)$ le coefficient de traînée, P_m représente le "shelter effect" de THOM (1971) qui traduit les effets de voisinage au champ par comparaison aux valeurs de C_m déterminées en soufflerie.

LANDSBERG & THOM (1971) ont montré sur des branches de sapin qu'on peut relier la valeur de P_m à la densité du feuillage (exprimé comme le rapport entre la surface projetée des différents éléments séparés d'une branche et la surface projetée dans la direction du vent de la branche constituée de ces mêmes éléments). THOM (1971) propose une valeur de 3.5 pour le coefficient réducteur P_m sur un couvert de fêverole, coefficient qui divise le coefficient de traînée d'un élément isolé "moyen" du couvert pour obtenir celui d'un même élément pris au sein du couvert.

Sur ce sujet, les résultats dans la littérature sont peu abondants, du fait de la complexité de la turbulence dans le couvert (intensité et échelle de la turbulence, interférence aérodynamique entre éléments du couvert).

Les équations (C.8) et (C.10) permettent d'écrire l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial K_m}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + K_m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = f(z) \cdot u^2(z) \quad (C.11)$$

On remarque que cette théorie est mise en défaut par l'expérience sur forêts ou autres couverts développés (SHAW, 1977 ; RAUPACH, 1979 ; LI & al, 1985) pour lesquels on a observé l'existence de flux à contre-gradient.

- Profil des autres scalaires

De même que pour les flux de quantité, de mouvement, les flux de vapeur d'eau et de chaleur sensible sont paramétrés au premier ordre, on écrit :

$$H = \rho c_p w' \theta' = \rho c_p K_c \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (C.12) \quad E = \rho w' q' = \rho K_v \frac{\partial q}{\partial z} \quad (C.13)$$

L'analogie de Reynolds suppose l'égalité des diffusivités turbulentes conditions proches de la neutralité thermique

En pratique, dans un schéma au 1er ordre, on résout d'une part problème mécanique (profil de vitesse du vent) et d'autre part les équations couplées de conservation, de l'énergie et de la vapeur d'eau, en paramétrant les termes de production (à la surface des organes végétaux) à l'aide d'une formulation du type :

$$\begin{aligned} H_p &= h_c \cdot \rho \cdot c_p \cdot f(z) \cdot (\theta_s - \theta_a) & (C.14) \\ E_p &= h_v \cdot \rho \cdot f(z) (q_s - q_a) & (C.15) \end{aligned}$$

h_c et h_v sont les coefficients d'échange dépendant de la vitesse du vent calculés à partir des coefficients de traînée définis précédemment.

ii) A un ordre supérieur

Une équation de diffusion locale est insuffisante pour décrire correctement la turbulence ; aussi trouve-t-on, sous l'impulsion de travaux dans la CLP (DONALDSON, 1973) des modèles d'ordre supérieur à 1 : WILSON et SHAW (1977) ont élaboré un modèle du 2ème ordre pour la quantité de mouvement en conditions neutres sur un couvert de maïs, plus récemment, MEYERS (1981) présente un modèle du 3ème ordre en conditions de neutralité pour la quantité de mouvement, la chaleur et la vapeur.

III - PRESENTATION DU MODELE

a - type de modélisation retenue

Les années 70-75 voient s'élaborer de nouvelles modélisations (modèles eulériens d'ordre supérieur) qui seront de plus en plus l'outil de recherche sur les transferts à l'intérieur du couvert, dans la mesure où ceux-ci prennent en compte de manière beaucoup plus juste la turbulence ; en particulier, l'hypothèse de proportionnalité entre le flux et le gradient d'un scalaire constitue, dans un modèle du premier ordre, une approximation parfois assez éloignée de la réalité des phénomènes turbulents. Toutefois, la réussite relative des modèles du 1er ordre (WAGGONER & REIFSNYDER, 1968 ; PERRIER, 1976 ; GOUDRIAAN, 1977) nous a conduit à choisir ce type de modèle (cf tableau n° 2). En effet, les modèles d'ordre supérieur resteront longtemps encore un outil de recherche ; ils pourraient constituer, si leur maîtrise était plus avancée, un terme de référence pour effectuer des comparaisons. Par ailleurs, si la recherche fondamentale se doit de poursuivre l'élaboration de tels modèles, une recherche plus orientée vers des objectifs agronomiques opérationnels, mais soucieuse d'intégrer les résultats des dernières années, va naturellement se porter vers un modèle du premier ordre. Une telle modélisation est considérée par SHUTTLEWORTH (1985) comme un compromis pratique entre la rigueur physique et l'applicabilité agronomique. La fermeture au 1er ordre minimise le nombre d'équations à résoudre ; la discrétisation du couvert en strates ramène alors le problème à la résolution d'un système d'équations linéaires. On retiendra deux méthodes :

- résolution matricielle (inversion classique)
- méthode itérative (CHEN, 1984)

Cette dernière méthode est décrite dans des termes élogieux par MONTEITH dans un congrès à Chicago en 1985 (MONTEITH, 1985)

Un tel choix permettra une utilisation du modèle sur micro-ordinateur simple, avec des temps de calcul très rapides, sachant que, par ailleurs, le nombre des paramètres du modèle est relativement faible.

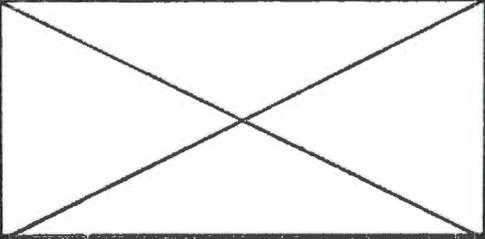
Modèles	Dynamique	Stationnaire
Continus		PHILIP (1964) COWAN (1968) PERRIER (1976) SHUTTLEWORTH (1976)
Discrets		GOUDRIAAN (1977)

Tableau n° 2 - Représentation des différents types de modèles du premier ordre selon le mode de résolution

b - Hypothèses du modèle (rappel)

On fait les hypothèses suivantes :

- le couvert est considéré comme homogène horizontalement (une seule variable d'espace).
- on néglige la variation d'énergie stockée du système air-végétation sur de courtes échelles de temps ($\sim 1/4$ h à $1/2$ h) (régime permanent)
- l'advection latérale est supposée négligeable. (conservativité des flux)
- les flux verticaux de vapeur d'eau et de chaleur sensible dans l'air sont proportionnels aux gradients d'humidité et de température (fermeture au 1er ordre) ; les coefficients de proportionnalité K_v et K_c sont égaux.
- les termes de source de vapeur et de chaleur sont introduits moyennant un coefficient d'échange, respectivement h_v et h_c .
- l'air dans les stomates est saturé et la résistance à l'évaporation entre l'intérieur et l'orifice des stomates est égale à la résistance stomatique
- enfin, très classiquement, on néglige l'énergie mise en jeu par la respiration et la photosynthèse.

c - Variables de forçage

Ce sont à une hauteur de référence (H_r) au-dessus du couvert, les températures de l'air (T_a) et du point de rosée (T_r), la vitesse du vent (V) et le rayonnement net (R_n).

d.- Schéma mis en oeuvre

Ce schéma est décomposable en deux parties : le calcul des profils des variables appelées précédemment "indépendantes" (cf A.II.a) pour lesquelles on utilisera les modélisations déjà existantes et le calcul des profils des variables d'état (T_a , T_r) pour lesquelles les profils des variables "indépendantes" (U , R_n) serviront de variables de forçage locales.

1 - Modélisation de l'évolution des variables de forçage.

a) profil de vitesse du vent

La littérature sur ce sujet est particulièrement abondante ; THOM (1971), LANDSBERG & JAMES (1971) donnent les éléments propres à une simulation simple.

i) $H_r < z < H_c$

Le profil de vent est donné par l'équation suivante :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z-D}{Z_{om}} \quad \text{avec } D = 0.75 H_c \text{ et } Z_{om} = 0.13 H_c$$

On en tire $Ra(1)$ la résistance aérodynamique entre le niveau de référence H_r et le sommet du couvert H_c

$$Ra(1) = \frac{1}{k^2 V} \ln \left(\frac{H_r - D}{Z_{om}} \right) \times \ln \left(\frac{H_r - D}{H_c - D} \right) \quad (C.)$$

ii) $H_c/3 < z < H_c$

Dans un modèle de premier ordre, le choix du profil de diffusivité turbulente conditionne l'ensemble des résultats. Dans la littérature, on trouve un certain nombre de propositions pour la fonction $K(z)$. On peut rappeler les formulations classiques suivantes :

$$\begin{cases} K(z) = 1.25 K(H_c) \cdot \frac{H_c}{3} < z < H_c & \text{sur un couvert artificiel} \\ K(z) = K(H_c) \cdot 4z/H_c & 0 < z < H_c/3 \end{cases} \quad (\text{THOM, 1971})$$

$$\begin{cases} K(z) \sim K(H_c) & H_c/3 < z < H_c & \text{sur un couvert de féverole} \\ K(z) \sim K(H_c) \cdot 3z/H_c & 0 < z < H_c/3 \end{cases} \quad (\text{THOM, 1971})$$

$$K(z) = K(H_c) \cdot \exp(-m(1-z/H_c)) \quad \text{avec } 2.5 \leq m < 4 \quad (\text{DENMEAD, 1976})$$

$$K(z) = A_0 B_0 U(z)/f(z) \quad (\text{PERRIER, 1976})$$

Conformément aux résultats de THOM (1971), on peut raisonnablement faire l'hypothèse d'une diffusivité $K(z)$ constante pour $H_c/3 < z < H_c$. On écrit :

$$\tau(z) = \rho K(z) \frac{dU}{dz} \quad \text{et} \quad \frac{d\tau}{dz} = C_d(z) \rho v^2 f(z) \quad (C.)$$

soit en combinant

$$\frac{d}{dz} \left(K(z) \frac{dU}{dz} \right) = C_d(z) f(z) U^2(z) \quad (C.)$$

Moyennant une hypothèse sur $C_d(z) \cdot f(z)$ ($= C_d \cdot f = \text{constante}$), on aboutit à une expression analytique simple

$$U(z) = U(H_c) \left[1 + \alpha \left[1 - \frac{z}{H_c} \right] \right]^{-2} \quad (C.)$$

$$\text{avec } \alpha = H_c \frac{\sqrt{C_d \cdot f \cdot U(H_c)}}{\sqrt{6K}} \quad (C.)$$

Sur un couvert de féverole, on peut exprimer $\frac{Cd}{K}$ grâce à la relation suivante (LANDSBERG & JAMES, 1971) : $\frac{Cd}{K} = 2,2 U(Hc)^{-2,59}$, d'où α peut s'exprimer uniquement en fonction de Hc, LAI et V au niveau de référence

$$\alpha = 0.6 \cdot LAI^{1/2} Hc^{1/2} \cdot u(Hc)^{-0,8} \quad (C.21)$$

iii) $z < Hc/3$

On utilise un profil logarithmique du type suivant :

$$u(z) = \frac{u^*s}{k} \ln \frac{z + Zos}{Zos} \quad \text{avec } Zos : 0.5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad (C.22)$$

et u^*s calculé de manière à avoir la continuité du profil au niveau $Hc/3$

La diffusivité turbulente suit l'équation $\frac{K(z)}{K(Hc)} = \frac{3 \cdot z}{Hc}$

8) profils de rayonnements net et global

Conformément à des résultats classiques (MONTEITH, 1975), on prendra $Rn(z) = Rn(h) \times \exp(-B \cdot F(z))$ où $F(z)$ est la fonction cumulative d'indice foliaire. Dans l'article de IMPENS & LEMEURE (1969), on trouve pour B la valeur de 0.3 à 0.4 sur des couverts de plantes à port planophile (tournesol, haricot). Par ailleurs, B est relativement constant au cours de la journée lorsque la couverture nuageuse est permanente (forte proportion de lumière diffuse). On retiendra pour le féverole une valeur de 0.3 (valeur également retenue pour B sur blé dans le modèle de BUTLER, 1976).

L'estimation du rayonnement global est nécessaire pour le calcul de la résistance stomatique. En utilisant les résultats de FASHEUN & DENNETT (1982) sur féverole, on retient la relation :

$$Rg(z) = Rg(Hc) \times \exp(-k^* \cdot F(z)) \quad \text{avec } k^* = (0,192 LAI + 1,65)^{-1} \text{ pour } LAI \geq 3$$

Sur le lieu d'expérimentation, et en conditions de couverture nuageuse homogène, on a établi une relation entre Rg et Rn au-dessus du couvert.

$$Rg(Hc) = 1,6 \cdot Rn(Hc) + 10,5 \quad (r^2 = 0,9)$$

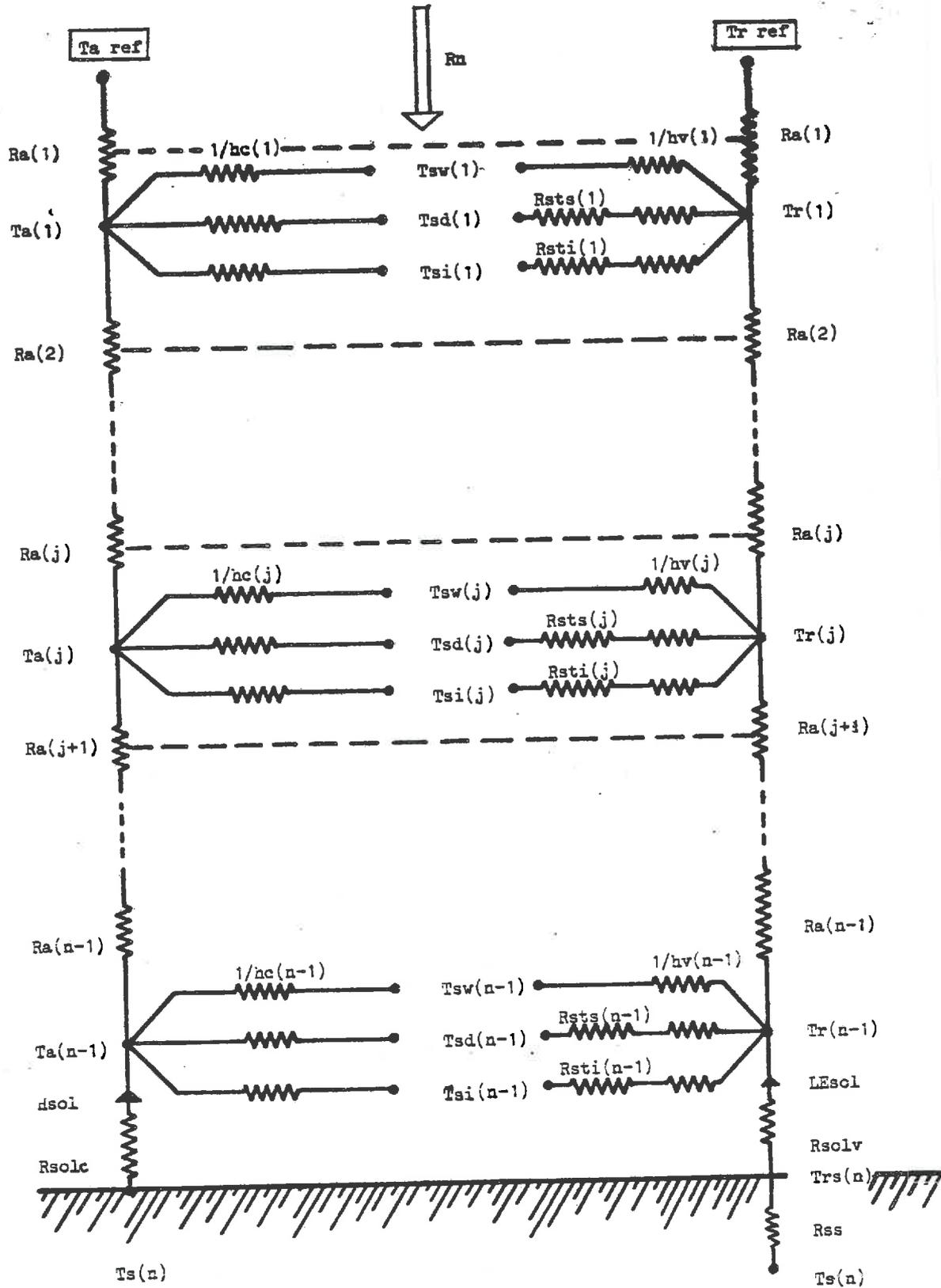


Fig. 27 - Schéma retenu pour la modélisation du couvert

2 - Modélisation des variables d'état (température, humidité)

Il s'agit d'un modèle discret unidimensionnel ; le couvert est divisé en (n-1) strates (cf figure n° 27). Le sol constitue la n^e strate ; on suppose connue une équation donnant le profil de diffusivité turbulente à l'intérieur du couvert ainsi que les coefficients d'échange air-végétation pour la chaleur et la vapeur.

Chaque strate i du couvert est divisée en trois sous-strates :

- la fraction mouillée de la face supérieure W_j
- la fraction sèche de cette même face $(1-W_j)$
- la face inférieure supposée sèche.

Dans chaque strate, l'air est caractérisé par les températures de l'air $T_a(j)$ et du point de rosée $T_r(j)$; on se trouve donc devant un réseau de résistances analogues à des résistances électriques. On connaît les potentiels aux bornes du système $T_{a,ref}$ et $T_{r,ref}$; il s'agit de trouver les flux et les potentiels sur l'ensemble du réseau. La figure 28 représente les résistances et les flux propres aux surfaces mouillée et sèche dans les deux cas des transferts de chaleur et de vapeur.

Chaque strate est caractérisée par 5 températures, (les températures de l'air $T_a(j)$ et du point de rosée $T_r(j)$ et les températures de surface) :

$T_{sw}(j)$: température de surface de la fraction mouillée

$T_{sd}(j)$: température de surface de la fraction sèche

$T_{si}(j)$: température de surface de la face inférieure.

Discuter l'homogénéité de T_{sd}

Pour les résistances au transfert de chaleur, on a :

$R_{cw}(j) = [h_c(j) \cdot LAI_j \cdot W_j]^{-1}$ pour la fraction mouillée de la face supérieure

$R_{cd}(j) = [h_c(j) \cdot LAI_j \cdot (1-W_j)]^{-1}$ pour la fraction sèche de la face supérieure

$R_{cj}(j) = [h_c(j) \cdot LAI_j]^{-1}$ pour la face inférieure.

Pour les résistances au transfert de vapeur, on a :

$R_{vw}(j) = [h_v(j) \cdot LAI_j \cdot W_j]^{-1}$

$R_{vd}(j) = [(R_{sts}(j) + 1/h_v(j)) / (LAI_j \cdot (1-W_j))]$

$R_{vj}(j) = [(R_{stj}(j) + 1/h_v(j)) / (LAI_j)]$

La résistance aérodynamique en conditions de neutralité thermique entre le niveau supérieur du couvert et le niveau de référence est donnée par :

$$Ra(1) = \frac{1}{ku^*} \log \left[\frac{Hr - D}{Hc - D} \right] \quad (C.)$$

Les résistances aérodynamiques entre strates sont calculées à la limite entre deux strates

$$Ra(j) = \frac{\Delta z}{K(j)} \quad \text{pour } j \leq n - 1 \quad (C.)$$

Les coefficients $hc(j)$ et $hv(j)$ sont obtenus en fonction de la vitesse du vent dans la strate j .

Pour la strate n représentative du sol, on introduit les deux résistances suivantes :

$$Rsolc = \frac{1}{hc(n)} \quad (C.)$$

$$Rsolv = \frac{1}{hv(n)} \quad (C.)$$

La résistance Rss est introduite pour paramétriser le flux de vapeur d'eau issu du sol : nulle pour un sol saturé en surface, cette résistance va varier en fonction de l'état d'humidité du sol.

$Rsts(j)$ et $Rsti(j)$ représentent les résistances stomatiques relatives aux faces supérieures et inférieures des feuilles de la strate j . LAI_j représente la surface foliaire de la strate j .

Pour calculer les flux et les potentiels sur l'ensemble du réseau, on envisage deux méthodes de résolution :

α) Méthode matricielle (WAGGONER, 1968 ; FURNIVAL, 1975)

soit H_i le flux de chaleur sensible issu de la sous-strate i
 LE_i le flux de chaleur latente issu de la sous-strate i
 $\Delta R_n(i)$ rayonnement absorbé par la sous-strate i
 G flux de conduction dans le sol.

Soyent les vecteurs colonnes définis comme suit :

$$\begin{array}{ccccccc}
 H & = & H1 & & LE & = & LE1 & & \Delta Rn & = & \Delta Rn1 & & G & = & 0 \\
 & & H_i & & & & LE_i & & & & \Delta Rn_i & & & & 0 \\
 & & H_{3h-2} & & & & LE_{3h-2} & & & & \Delta Rn_{3n-2} & & & & G
 \end{array}$$

$1 \leq i \leq 3n - 2 : 3(n-1)$ sous-strates et la strate du sol.

L'écriture du bilan d'énergie de chaque strate conduit à l'équation vectorielle suivante :

$$\Delta Rn - G = H + LE \quad (C.27)$$

avec

$$\begin{array}{ll}
 \Delta Rn_{3i-2} = \Delta Rnw(i) = W_i \cdot \Delta Rn(i) & \text{Le rayonnement net dans une strate} \\
 & \text{est réparti entre zones mouillée} \\
 \Delta Rn_{3i-1} = \Delta Rnd(i) = (1-W_i) \Delta Rn(i) & \text{et non mouillée proportionnellement} \\
 & \text{à la surface de chacune d'elles ; on} \\
 \Delta Rn_{3i} = \Delta Rni(i) = 0 & \text{suppose que la face inférieure} \\
 & \text{présente un bilan radiatif nul.}
 \end{array}$$

Pour les transferts de chaleur, en suivant la loi d'Ohm, on peut écrire

$$\begin{aligned}
 \rho_{cp} (T_{si} - T_{a_{ref}}) &= \rho_{cp} [T_s(i) - T_a(i)] + [T_a(i) - T_a(i-1)] + \dots + [T_a(i) - T_{a_{ref}}] \\
 &= R_c(i) H_i + R_a(i) \sum_{p=1}^{3n-2} H_p + \dots + R_a(2) \sum_{p=2}^{3n-2} H_p + R_a(1) \sum_{p=1}^{3n-2} H_p
 \end{aligned}$$

$$\text{sachant que } H_i = \rho_{cp} \frac{(T_s(i) - T_a(i))}{R_c(i)}$$

$$D'où \rho_{cp} (T_s(i) - T_{a_{ref}}) = R_a(1) H_1 + (R_a(1) + R_a(2)) H_2 + \dots$$

$$+ \sum_{p=1}^{i-1} R_a(p) H_{i-1} + [R_c(i) + \sum_{p=1}^i R_a(p)] H_i + [\sum_{p=1}^i R_a(p)] \left(\sum_{j=i+1}^{3n-2} H_j \right)$$

$$\text{Si l'on pose } R_{som}(j) = \sum_{p=1}^{p=j} R_a(p)$$

soit finalement :

$$\rho_{cp} (T_s(i) - T_{a_{ref}}) = \sum_{j=1}^{i-1} R_{som}(j) H_j + (R_v(i) + R_{som}(i)) H_i + R_{som}(i) \sum_{j=i+1}^{3n-2} H_j \quad (C.28)$$

De la même manière pour les transferts de vapeur, on peut écrire :

$$\frac{\rho_{cp}}{\gamma} (e_s(Ts(i)) - e_s(Tr_{ref})) = \sum_{j=1}^{i-1} R_{som(j)} LE_j + (Rv(i) + R_{som(i)}) LE_i + R_{som(i)} \sum_{j=i+1}^{3n-2} LE_j \quad (C.2)$$

On a donc un jeu de $3 \times (3n-2)$ équations à $3 \times (3n-2)$ inconnues, à savoir

$$LE_i, H_i, T_{s_i} \text{ pour } i \in [1, 3n-2]$$

Une résolution matricielle simple est possible à condition de linéariser l'expression $e_s(T_{s_i}) - e_s(T_{r_{ref}})$. Mais on se trouve alors devant des matrices de rang assez élevé, ce qui justifie l'utilisation d'une méthode plus simple faisant appel à un calcul itératif.

β) Méthode itérative (CHEN J., 1984)

Cette méthode simplifie les calculs, puisqu'elle évite l'inversion matricielle ; elle suppose également la linéarisation de la courbe de pression de vapeur saturante, cette approximation est faisable dès lors que la région linéarisée n'est pas trop large. L'erreur relative commise sur une différence de pression partielle n'excède pas 5 % pour un écart de 10° C dans la gamme 10-40°C.

Dans chaque strate, on écrit :

$$H_i + LE_i = \Delta Rn(i) \text{ au flux de conduction près pour la couche du sol} \quad (C.3)$$

$$H_i = \rho_{cp} \frac{T_{s_i} - T_{a_i}}{Rc(i)} \quad (C.4)$$

$$LE_i = \frac{\rho_{cp}}{\gamma} \frac{e_s(T_{s_i}) - e_a(i)}{Rv(i)} \quad (C.5)$$

On transforme l'équation (3) comme suit :

$$\begin{aligned} LE_i &= \frac{\rho_{cp}}{\gamma} \frac{e_s(T_{s_i}) - e_s(T_{a_i}) + e_s(T_{a_i}) - e_a(i)}{Rv(i)} \\ &= \frac{\rho_{cp}}{\gamma} p' \frac{(T_{s_i} - T_{a_i})}{Rv(i)} + \rho_{cp} \frac{p'}{\gamma} \frac{(T_{a_i} - T_{r(i)})}{Rv(i)} \\ &= \frac{Rc(i)}{Rv(i)} \frac{p'}{\gamma} \rho_{cp} \frac{(T_{s_i} - T_{a_i})}{Rc(i)} + \rho_{cp} \frac{p'}{\gamma} \frac{(T_{a_i} - T_{r(i)})}{Rv(i)} \end{aligned}$$

$$= \frac{Rc(i)}{Rv(i)} \frac{P'}{\gamma} Hi + \rho cp \frac{P'}{\gamma} \frac{(Ta(i) - Tr(i))}{Rv(i)}$$

$$= \frac{Rc(i)}{Rv(i)} \frac{P'}{\gamma} (\Delta Rn_{(i)} - LEi) + \rho cp \frac{P'}{\gamma} \frac{(Ta(i) - Tr(i))}{Rv(i)}$$

$$\text{Soit } LEi = \frac{P' Rc(i) \Delta Rn(i) + \rho cp P' (Ta(i) - Tr(i))}{P' Rc(i) + \gamma Rv(i)} \quad (C.33)$$

$$Hi = \frac{\gamma Rv(i) \Delta Rn(i) - \rho cp P' (Ta(i) - Tr(i))}{P' Rc(i) + \gamma Rv(i)} \quad (C.34)$$

$$\text{On pose ensuite: } Ji = Hi - \frac{\gamma}{P'} LEi \quad (C.35)$$

En utilisant les expressions (C.33) et (C.34), on trouve :

$$Ji = \left[\left(1 - \frac{Rc(i)}{Rv(i)}\right) \Delta Rn(i) - \rho cp \left(1 + \frac{P'}{\gamma}\right) \frac{Ta(i) - Tr(i)}{Rv(i)} \right] / \left(\left(1 + \frac{P'}{\gamma}\right) \frac{Rc(i)}{Rv(i)} \right)$$

$$Ji = \frac{\alpha Rd(i) \cdot \Delta Rn(i) - \rho cp (Ta(i) - Tr(i))}{Rc(i)} \quad (C.36)$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{\gamma}{P' + \gamma} \text{ et } \begin{cases} Rd(i) = Rv(i) - Rc(i) \\ R(i) = Rc(i) + \alpha Rd(i) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{Soit } Ji^* &= \sum_{j=1}^{j=n} Hj - \frac{\gamma}{P'} \sum_{j=1}^{j=n} LEj \\ &= \frac{\rho cp}{Ra(i)} (Ta(i-1) - Tr(i-1)) - \frac{\rho cp}{Ra(i)} (Ta(i) - Tr(i)) \end{aligned} \quad (C.37)$$

$$\text{On a évidemment : } Ji = Ji^* - Ji+1^* \quad (C.38)$$

avec (C.36), (C.37) et (C.38), on peut encore écrire :

$$R(i) (Ji^* - Ji+1^*) = \alpha Rd(i) \cdot \Delta Rn(i) - \rho cp Y(i)$$

$$Ji^* = \frac{\rho cp}{Ra(i)} [Y(i) - Y(i-1)] \quad (C.39)$$

$$\text{avec } Y(i) = Ta(i) - Tr(i) \quad (C.40)$$

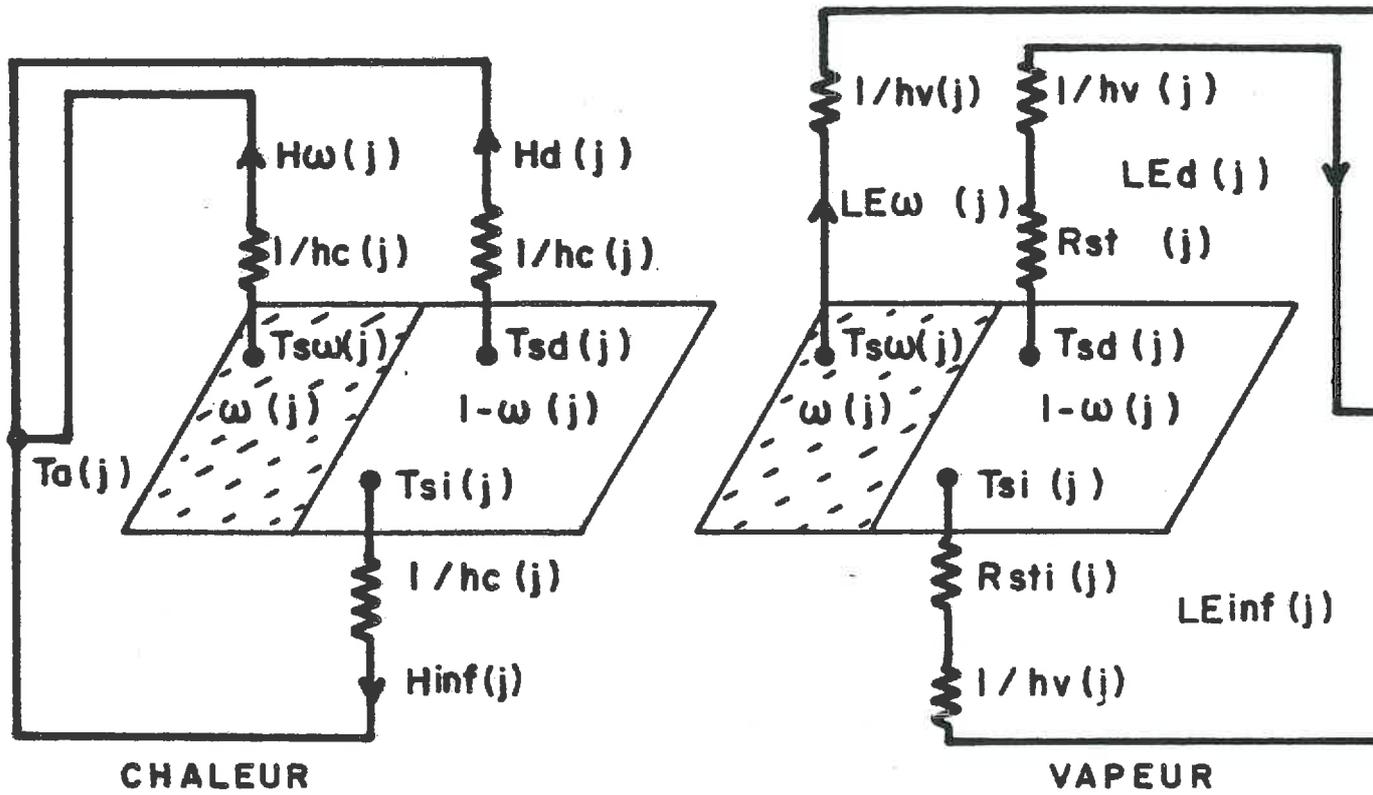


Fig. 28 - Paramétrisations et variables relatives à la strate j

$$\text{d'où } \left(1 + \frac{Ra(i)}{R(i)}\right) J_{i+1}^* - J_i^* = \frac{\alpha R_d(i) \Delta R_n(i) - \rho c p Y(i-1)}{R(i)} \quad (\text{C.41})$$

Si l'on décompose l'équation (C.41) comme suit :

$$\left(1 + \frac{Ra(i)}{R(i)}\right) J_{i+1}^* - J_i^* = \frac{\alpha R_d(i) \Delta R_n(i) - \rho c p Y(0)}{R(i)} - \frac{1}{R(i)} \sum_{j=1}^{j=i-1} \rho c p [Y(j) - Y(j-1)]$$

$$\text{soit } \left(1 + \frac{Ra(i)}{R(i)}\right) J_{i+1}^* - J_i^* = \frac{\alpha R_d(i) \Delta R_n(i) - \rho c p Y(0)}{R(i)} - \frac{1}{R(i)} \sum_{j=1}^{j=i-1} Ra(j) J_j^*$$

Finalement, on obtient entre les J_i^* la relation de récurrence suivante, en posant $b(i) = \frac{\alpha R_d(i) \Delta R_n(i) - \rho c p Y(0)}{R(i)}$

(C.42)

$$J_{i+1}^* = J_i^* + \frac{1}{R(i)} \sum_{j=1}^{j=i-1} Ra(j) J_j^* - b(i) \quad i \in [0, 3n-2] \quad (\text{C.43})$$

On connaît $J_{n+1} = 0$ par définition ; l'écriture des n équations donne un système linéaire facilement résolu :

En posant $A_n = 1$ et la relation récurrente (CHEN Jialin, 1984) entre certains sous-déterminants correctement choisis de la matrice correspondante

$$A_i = A_{i+1} + Ra(i+1) \sum_{j=i+1}^n (A_j / R(j)) \quad i \in [0, 3n-2] \quad (\text{C.44})$$

$$J_1^* \text{ s'écrit : } J_1^* = \sum_{j=1}^{3n-2} (A_j / A_0) b(j) \quad (\text{C.45})$$

et la relation (C.43) donne les J_i^* pour $i = 2$ à $3n-2$

Les équations (C.33), (C.34) et (C.38) permettent de calculer les vecteurs [LE] et [H].

e - Paramétrisations des résistances aux transferts.

Chaque strate du couvert est caractérisée par 3 résistances en parallèle pour la chaleur et 3 résistances en parallèle pour la vapeur ; les résistances stomatiques sont placées en série avec les résistances de couche limite (cf fig. 28).

1 - Résistance de couche limite des feuilles

.Type de convection et régime d'écoulement.

Il existe classiquement deux types de convection (forcée ou libre) deux types d'écoulement (laminaire ou turbulent).

Compte tenu des faibles valeurs de rayonnement qui prévalent lorsque pose le problème d'une longue durée d'humectation, le rapport $\frac{Gr}{Re^2}$ (nombre Grashof divisé par le carré du nombre de Reynolds) est le plus souvent tel qu'on puisse considérer que l'échange entre les feuilles et l'air correspond à la convection forcée ($Gr/Re^2 < 0,1$, MONTEITH, 1973). Mais dans certaines situations (rayonnement global élevé après une averse), il se peut que l'on trouve en conditions de convection mixte ($0,1 \leq \frac{Gr}{Re^2} \leq 16$)

Pour ce type de convection, il existe un lien entre le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds. Selon que la convection est laminaire ou turbulent les relations fournies par la littérature diffèrent. Pour les feuilles de 5 cm de diamètre, le nombre de Reynolds est inférieur au Reynolds critique conduisant à un échange laminaire pour des gammes de vitesse du vent allant de 1 à 5 m/s. Cela impliquerait donc que l'échange est laminaire si l'échange de l'air n'était pas lui-même turbulent. Sachant que les valeurs du nombre de Nusselt obtenues sont proches l'une de l'autre dans la gamme $10^3 < Re < 10^5$ (CLARKE & WIGLEY, 1975), on a utilisé la relation $Nu = 0,6 Re^{0.5}$ pour obtenir la valeur du coefficient d'échange hc par la relation (pour une face de feuille)

$$hc = \frac{KNu}{d_p C_p} \quad \text{soit} \quad Re = \frac{1}{hc} = 307 \left(\frac{d}{u}\right)^{1/2}$$

Pour la résistance au transfert de vapeur, sa valeur est voisine de la valeur de la résistance au transfert de chaleur si l'on considère que l'échange est turbulent.

.Difficultés d'estimation des coefficients d'échange au champ.

Les valeurs utilisées pour les coefficients varient dans une large gamme ; ces valeurs sont le plus souvent calculées à la suite d'expériences de soufflerie, sauf pour PEARMAN & al (1972) dont les mesures ont été obtenues au champ. La précision sur la valeur des coefficients d'échange est de $\pm 50\%$.

Il faut ajouter le fait que les feuilles peuvent battre au vent ("fluttering"), ce qui détermine des augmentations conséquentes des échanges (jusqu'à 40%, SCHUEPP, 1972).

2 - Résistance stomatique

La littérature (KASSAM, 1973) fournit des valeurs précises sur féverole au laboratoire et va permettre d'ajuster une équation simple donnant la résistance stomatique en fonction du rayonnement global incident.

AVISSAR & al (1985) proposent un modèle semi-empirique simple :

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{sM}} + \left(\frac{1}{R_{sm}} - \frac{1}{R_{sM}} \right) f_{Rg} \cdot f_T \cdot f_{DPV} \cdot f_{CO_2} \cdot f_{\psi}$$

où R_{sM} et R_{sm} sont respectivement les résistances stomatiques maximale et minimale.

Les fonctions f_i se rapportent à l'influence de chaque facteur microclimatique spécifique (R_g : rayonnement global ; T : température ; DPV : déficit de pression de vapeur, ψ : potentiel hydrique du sol). Dans les conditions qui nous intéressent ($10 < T_a < 25^\circ\text{C}$, DPV faible, ψ proche de 0), on supposera raisonnablement que le seul facteur influençant la résistance stomatique est le rayonnement global incident.

On a les valeurs suivantes (KASSAM, 1973)

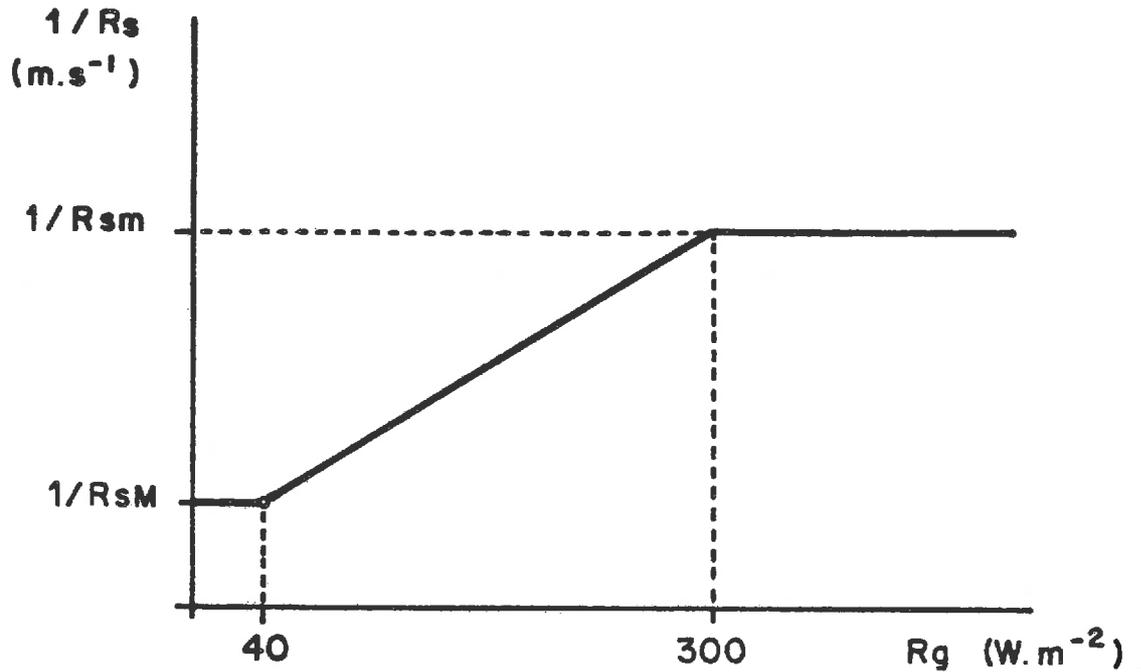
$$\begin{aligned} R_{sim} &= 40 \text{ s.m}^{-1} & R_{siM} &= 550 \text{ s.m}^{-1} \text{ pour la face inférieure} \\ R_{ssm} &= 50 \text{ s.m}^{-1} & R_{ssM} &= 420 \text{ s.m}^{-1} \text{ pour la face supérieure} \end{aligned}$$

On propose pour f_{Rg} une fonction linéaire simple supposant l'ouverture maximale pour $R_g = R_{g1}$ et l'ouverture minimale pour $R_g = R_{g0}$; on a donc

$$f_{Rg} = \frac{R_g - R_{g0}}{R_{g1} - R_{g0}} \quad \text{Avec } R_{g1} = 300 \text{ W.m}^{-2}$$

$$R_{g0} = 40 \text{ W.m}^{-2}$$

La figure suivante récapitule la forme de réponse des stomates :



Forme de la réponse stomatique à l'éclairement

3 - Résistances au transfert sol-air

On utilise deux types de résistance :

- 2 résistances de couche limite aux transferts de chaleur et de vapeur R_{sc} et R_{solv} de manière analogue aux résistances de couche limite des feuilles.
- 1 résistance au transfert de vapeur depuis le sol (R_{ss}) de façon analogue à la résistance stomatique pour schématiser le transfert d'eau à partir du sol (résistance introduite par MONTEITH (1981) et reprise par SHUTTLEWORTH (1984) ; le flux est donc supposé proportionnel au gradient de pression partielle de vapeur d'eau $[P_s(T_s(n)) - P_s(T_{rs}(n))]$ moyennant cette résistance R_{ss} ; cette hypothèse est susceptible de critiques car l'interprétation physique de cette résistance n'est pas évidente. Les résistances R_{ss} et R_{solv} sont en série.

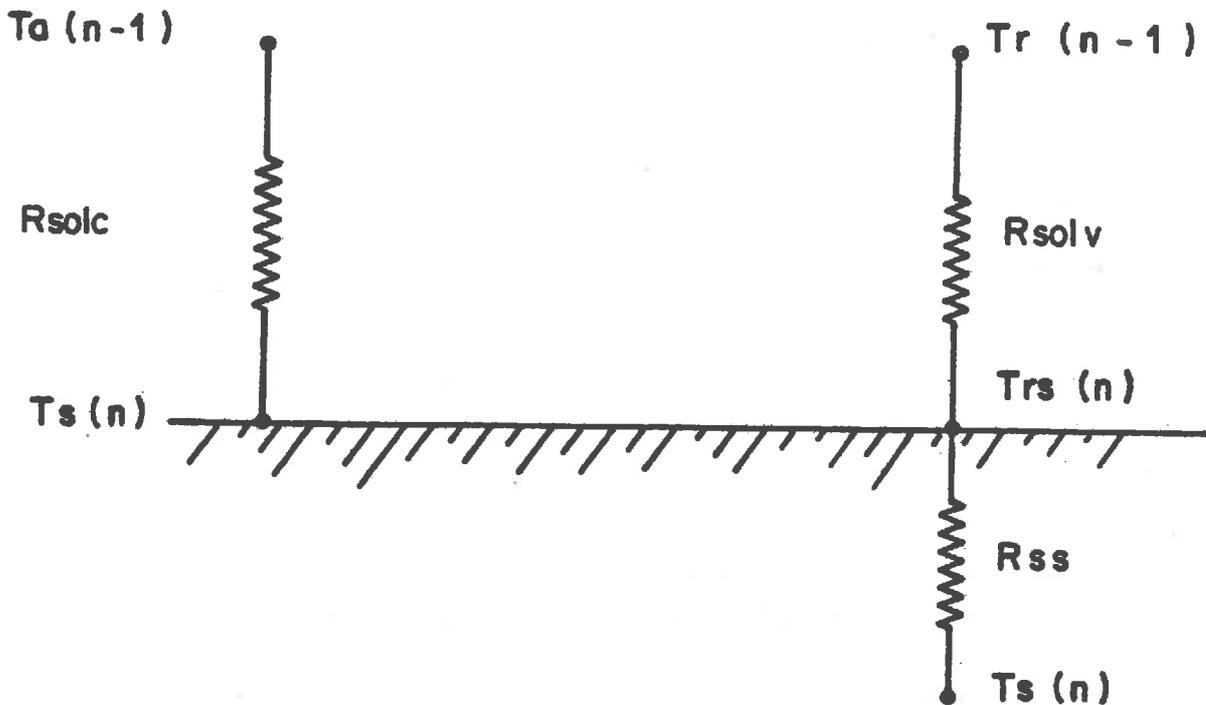


Schéma des résistances au transfert de chaleur et de vapeur depuis le sol

Dans son modèle à deux strates, SHUTTLEWORTH choisit de faire varier R_{ss} de 0 à 2000 s.m^{-1} entre l'état saturé de la surface du sol (0 s.m^{-1}), l'état humide (100 à 1000 s.m^{-1}), l'état totalement sec (2000 s.m^{-1}). Cette résistance pourrait être estimée à l'aide de la distribution des pluies des jours précédents (GRANT, 1975).

Concernant la résistance de couche limite, GOUDRIAN (1977) propose de prendre une formulation unique pour la chaleur et la vapeur de la forme

$$R_{sol} = 180 \left(\frac{D_s}{u} \right)^{1/2}$$

de la même manière que pour les feuilles avec D_s dimension caractéristique des mottes et u vitesse du vent au voisinage du sol.

f - Paramétrisation de l'humectation

Nous avons vu au paragraphe B.I.c que l'humectation sous forme de grosses gouttes se ramenait à celle sous forme de film. Il nous suffira dès lors de paramétrer la résorption de ce dernier mode d'humectation.

Soit une strate foliaire j d'indice LAI_j , pour laquelle on peut considérer une fraction sèche $(1 - W_j) \times LAI_j$ et une fraction mouillée surface d'échange $(W_j \times LAI_j)$ sur laquelle repose l'ensemble de l'eau interceptée

Fraction sèche	Fraction mouillée
$(1 - W_j) \cdot LAI_j$	$W_j \cdot LAI_j$

Il suffit de trouver une relation entre $W_j(t)$ et $W_j(t+1)$ (2 pas de temps successifs dans le déroulement de la cinétique. A l'instant t , le modèle calcule la quantité d'eau $Q(j, t+1)$ restante dans la strate j avec les données du pas de temps t , et à la fin du pas de temps t , on cherche la nouvelle valeur de W_j . Une solution consiste à écrire la relation de récurrence suivante :

$$W_j(t+1) = W_j(t) \left[\frac{Q(j, t+1)}{Q(j, t)} \right]^\beta$$

de manière à traduire une diminution de surface du film en introduisant un nombre β nommé "facteur de résorption"

$\beta = 0$: évaporation à surface de film ou de goutte constante

$\beta = 1$: évaporation à épaisseur de film ou de goutte constante

$0 < \beta < 1$: la surface du film diminue en même temps que l'épaisseur (hypothèse la plus vraisemblable).

Seule l'expérimentation permettra de voir s'il existe une valeur ou une plage de valeurs de β permettant d'exprimer valablement la part des diminutions de surface mouillée et d'épaisseur dans la résorption moyenne d'un film ou d'une distribution de gouttes sur un couvert ou une strate de couvert.

g - Conditions initiales et finales

Le but de la modélisation envisagée consiste à suivre l'évolution du couvert saturé d'eau depuis la fin de la pluie (ou de l'irrigation) jusqu'au moment où l'ensemble des strates du couvert a perdu l'eau superficielle. On choisit donc une hauteur d'eau retenue par le couvert et une forme de répartition de cette eau sur les feuilles, à savoir un pourcentage de surface mouillée par rapport à la surface totale (indépendant des strates).

Le pourcentage de surface mouillée varie considérablement d'une culture à l'autre. Pour un maïs, environ 20 % de la surface foliaire est mouillée après pluie (NORMAN, 1983), 10 à 15 % pour le blé (BUTLER, 1986) sous forme de gouttes ; pour la féverole, on a un film quasi uniforme sur la face supérieure des feuilles et on a pris une valeur initiale de la surface mouillée de 0,95. Quant à l'épaisseur d'eau initiale, les diverses expérimentations nous ont amené à choisir une valeur de 0,07 mm après confrontation du modèle avec les résultats obtenus.

Le modèle calcule donc sur chaque pas de temps la valeur de la hauteur d'eau restante (Stock(i)) entre l'instant initial où le couvert est totalement saturé et l'instant final où la dernière strate mouillée du couvert est devenue sèche. La durée d'humectation relative à la strate i est donc calculée comme le nombre de pas de temps entre le début de la cinétique et le moment où Stock(i) est égal à zéro.

Le tableau n° 3 reprend brièvement les différents éléments de la modélisation.

Tableau n° 3 - Tableau récapitulatif des éléments du modèle

1. Variables de forçage mesurées à une hauteur de référence au-dessus du couvert

- température de l'air Tare
- température du point de rosée de l'air Trre
- vitesse du vent V
- rayonnement global Rg

2. Paramètres

- couvert :
 - hauteur de déplacement D
 - épaisseur de rugosité Zom
 - dimension caractéristique des feuilles d
 - densité de surface foliaire f(z)
 - hauteur d'eau interceptée Cma
 - facteur de résorption β
- sol :
 - dimension caractéristique des mottes Ds
 - résistance au transfert de vapeur du sol Rss
 - épaisseur de rugosité Zos

3. Paramétrisations

- profil de diffusivité turbulente K(z)
- profil de vitesse du vent U(z)
- types de convection et d'écoulement Nu=f(Re)
- résistance stomatique Rsts(z)
Rsti(z)
- extinction des rayonnements net et global B, k

4. Variables d'état

- indépendantes : K(j), U(j), hc(j), hv(j), Rg(j), Rn(j)
Rsts(j), Rsti(j)
- complexes : Ta(j), Tr(j), Tsw(j), Tsd(j), Tsi(j)
Hw(j), Hd(j), Hinf(j), LEw(j), LE(j)
LEinf(j)

5. Variables de sortie

- hauteur d'eau par strate Stock(j)

- D -

EXPERIMENTATIONS

On présente successivement :

- les conditions expérimentales, à savoir le modèle de couvert retenu, le site expérimental, et le dispositif propre à simuler des situations d'humectation du couvert ;
- les techniques et méthodes employées dans les mesures microclimatiques et lors des essais en laboratoire.

I - CONDITIONS EXPERIMENTALES

a) Choix de la plante

La féverole a été retenue pour plusieurs raisons :

- tout d'abord, c'est une plante qui suscite l'intérêt des pathologistes en raison de l'antracnose (Ascochyta fabae) ; cette maladie s'est développée les deux années, en particulier fortement sur la zone irriguée du site expérimental
- elle fournit un support commode pour le modèle (homogénéité spatiale de la culture, humectation des feuilles principalement sous forme de films)
- semée avec un interrang de 30 cm, on peut facilement pénétrer dans la culture et introduire des appareils de mesure au sol et dans le couvert
- il s'agit d'une féverole de printemps semée respectivement dans le courant des mois de mars de 1985 et 1986, la culture n'a pas présenté d'incident majeur pendant les périodes d'étude (15 Mai - 15 Juillet de chaque année)

L'étude épidémiologique et l'étude microclimatique ont été menées de front ; le but des épidémiologistes était de comparer les parcelles irriguée et non irriguée et de voir l'influence de l'irrigation sur le développement de l'antracnose à l'échelle de la saison de végétation. Concernant le microclimat, c'est la cinétique d'évaporation de l'eau libre après une pluie qui fait l'objet de l'étude et donc sur une échelle de temps n'excédant pas la demi-journée.

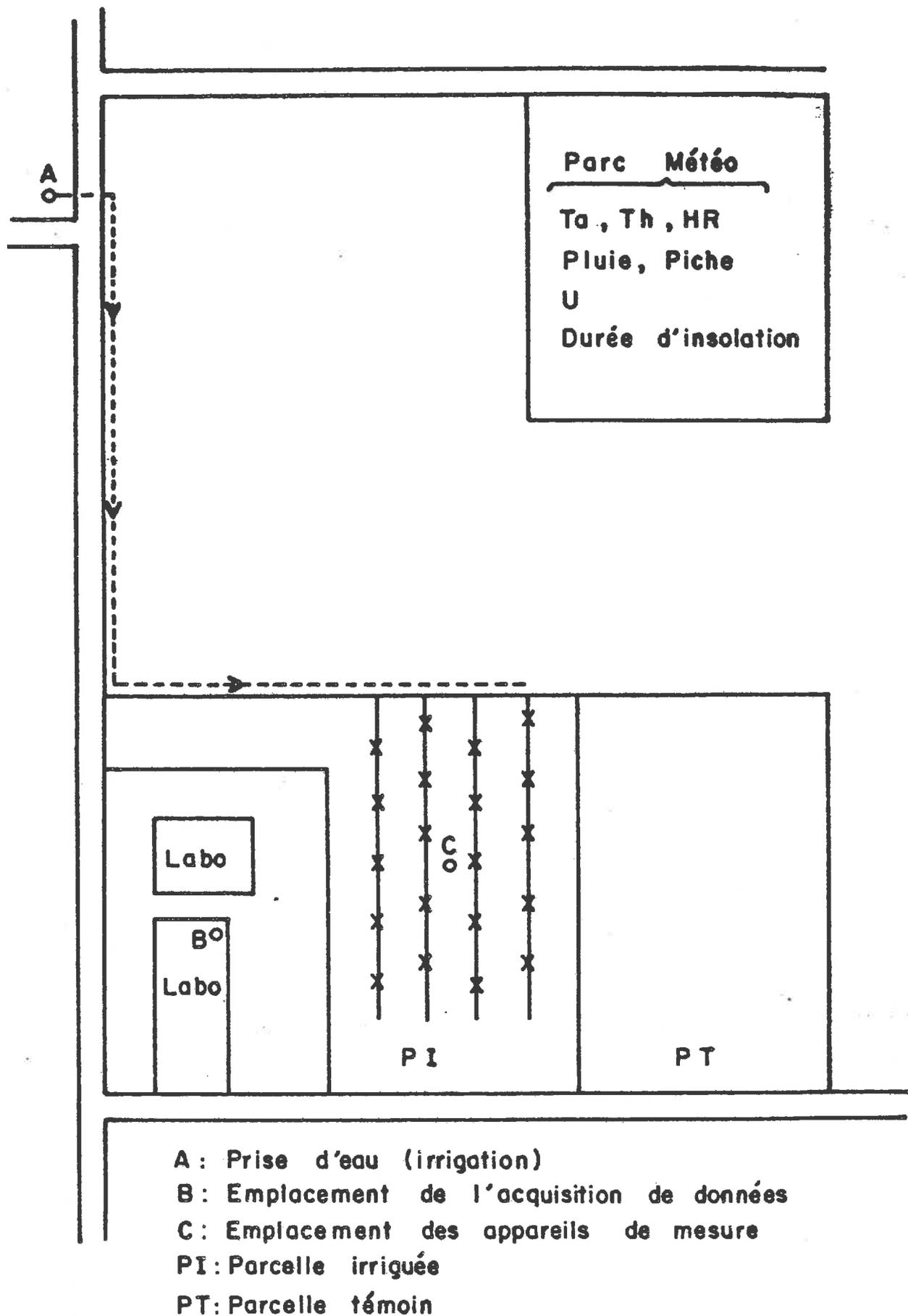


Fig. 29 - Schéma du dispositif expérimental

La féverole a donc permis de mener conjointement ces deux études, mais on n'utilisera pas l'étude microclimatique dans le but d'expliquer la progression de la maladie, mais seulement dans le but de souligner l'hétérogénéité du séchage du couvert et d'illustrer les longues périodes d'humectation que l'on peut rencontrer dans les zones basses, ce qui contribue évidemment à favoriser la germination des spores et influence la colonisation à l'intérieur de l'hôte. Cette observation de l'humectation servira de support de validation à la modélisation de la cinétique.

b - Site expérimental

Celui-ci est situé à une dizaine de km de Versailles, sur le domaine expérimental de la Minière. Il s'agit d'un plateau limoneux ; le sol a été décrit par JONGERIUS (1954). Une parcelle d'environ 5000 m² était affectée à l'étude. A coté de cette parcelle, à une centaine de mètres, est installé un parc météo qui a fourni la référence mésoclimatique.

Le site a été choisi pour trois raisons (fig. n° 29) :

- proximité d'un bâtiment pouvant abriter une acquisition de données
- existence d'un dispositif d'irrigation nécessaire à la simulation de la pluie
- présence d'un parc météorologique à une centaine de mètres.

c - Situations météorologiques favorables et simulation de la pluie

Comme nous avons pu le dire déjà, ce sont les situations météorologiques de temps nuageux faisant suite à une pluie qui nous intéressent, puisque ce sont celles-là qui favorisent les longues durées d'humectation. Mais ce type de situation reste relativement rare ; aussi a-t-on été amené à utiliser une pluie artificielle sous la forme d'une aspersion du couvert grâce à un dispositif d'une vingtaine d'asperseurs (10 m entre lignes, 12 m entre asperseurs sur une même ligne) soit une surface arrosée d'environ 2500 m², le reste constituant une surface destinée à éviter des effets advectifs importants. L'arrosage était effectué le matin de bonne heure (entre 2 et 4 h TU) afin de minimiser le taux d'évaporation pendant cette opération.

Peu d'expérimentations ont été effectuées postérieurement à une pluie réelle, du fait surtout de la difficulté d'être présent juste au moment de la pluie et sachant que la pluie est rarement l'occurrence d'un seul événement mais plutôt une succession d'épisodes pluvieux qui perturbent la cinétique que l'on veut observer. C'est donc postérieurement à une irrigation et pendant une période de temps couvert que l'on a pu obtenir des mesures, mais il faut être conscient du biais introduit, en particulier, la mise en jeu de transferts par advection. Le choix de la taille de la parcelle peut être critiquée, mais la limitation vient ici de la surface pouvant être irriguée avec le débit disponible.

II - TECHNIQUES ET METHODES

a - Mesures microclimatiques

Le dispositif de mesures est destiné à enregistrer les variables d'entrée du modèle (encore appelées variables de forçage).

1 - Rayonnement net

La mesure est effectuée à une hauteur de 2 m au-dessus du couvert avec un pyrromètre différentiel SWISSTECO muni d'une ventilation intérieure en air sec. Cet appareil délivre $40 \cdot 10^{-6} \text{V/W.m}^{-2}$. On prend soin de protéger ce capteur pendant la période d'irrigation précédant le suivi de l'évaporation du couvert.

2 - Vitesse du vent

Celle-ci est mesurée à deux hauteurs au-dessus du couvert ; le niveau de référence est situé à 2 m au-dessus du couvert. Il s'agit d'anémomètres optoélectroniques MCB délivrant $0,1 \text{ Volt/m.s}^{-1}$ et dont le seuil de démarrage est de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$, on prend soin d'essuyer les coupelles au début de chaque expérimentation.

3 - Température de l'air et température humide

La température de l'air T_a et la température humide T_h sont mesurées à 3 niveaux (variant avec le temps) :

- 2 m au-dessus de la végétation
- au sommet de la végétation
- à mi-hauteur de la végétation

Toutes les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples cuivre-constantan ($40.10^{-6}V/^\circ C$). La référence de température est prise à 1,2 m dans le sol (une mesure de cette température est faite au début de l'expérimentation avec un thermomètre TASTOTERM à affichage). Les mesures de T_a sont faites par rapport à cette référence, la température T_h est obtenue par la mesure de la différence ($T_a - T_h$).

4 - Mesures de durées d'humectation

Pendant l'année 1985 étaient installés des capteurs de durée d'humectation au-dessus et dans la végétation ; 4 séries de 2 capteurs à différentes hauteurs ont permis de tester l'efficacité de ceux-ci pour saisir les variations de durée dans la végétation (utilisation de capteurs du STEFCE : voir PINGUET, 1983 et fig. n° 14)

Parallèlement à ces mesures automatisées, on a effectué des observations visuelles de l'humectation des feuilles. En fonction de la hauteur du couvert ont été observées de 1 à 4 strates de végétation à l'aide d'un échantillon de 20 feuilles dans chaque strate pour lesquelles on notait l'état d'humectation à une fréquence de 1 à 2 observations par heure suivant la vitesse d'évaporation.

L'ensemble des mesures automatisées est centralisé sur une acquisition de données IMP Microconsultant située à l'abri dans le laboratoire voisin de la parcelle.

b - Mesures au parc météorologique

Pendant les expérimentations nous avons effectué des lectures régulières des températures T_a et T_h au-dessus de la surface engazonnée du parc météorologique afin de pouvoir faire des comparaisons avec l'évolution de l'humidité relative au-dessus de la végétation.

En 1985, les hauteurs de pluie étaient mesurées au parc météo par un pluviomètre enregistreur (surface : 2000 cm², incrément : 0,1 mm). En 1986, l'étude de l'interception du couvert a rendu nécessaire l'utilisation de pluviomètres pour avoir une mesure précise de la précipitation brute.

c - Mesures de l'interception

En 1986, on a voulu cerner de plus près la hauteur d'eau interceptée par le couvert, malgré la difficulté à expérimenter dans ce domaine.

1 - Utilisation de gouttières

En s'inspirant de BUTLER (1985), on a utilisé des gouttières installées dans l'interrang de 30 cm. Les dimensions des gouttières sont de 11 cm de diamètre sur 2 m de longueur (5 répétitions). Après une pluie, le contenu de chacune était vidé dans une bouteille pesée au laboratoire. La surface totale de 1,1 m² semble suffisante pour avoir une estimation correcte de l'eau arrivant au sol. Toutefois, la rareté des pluies et certains doutes sur la méthode ont incité à employer une autre méthode utilisable à la suite des irrigations.

2 - Prélèvements d'échantillons

A la suite d'un certain nombre d'aspersions du couvert, on a procédé avant le lever du soleil au prélèvement de deux échantillons de 25 pieds de féverole :

- un échantillon prélevé sur la zone irriguée, en prenant soin d'éviter les chutes d'eau et mis dans un sac en plastique
- un échantillon prélevé sur la zone non irriguée et mis également dans un sac en plastique.

Soit P_{Fm} et P_{Fs} les poids frais des échantillons mouillés et secs, P_{Sm} et P_{Ss} les poids secs (après passage à l'étuve) des mêmes échantillons, on peut calculer la quantité d'eau retenue à la surface de l'échantillon mouillé en faisant l'hypothèse que les humidités pondérales des 2 échantillons sont les mêmes (hypothèses raisonnables le matin avant le lever du soleil). On a alors :

$$\text{Quantité d'eau interceptée} = P_{Fm} - P_{Sm} \left(1 + \frac{P_{Fs} - P_{Ss}}{P_{Ss}}\right) = P_{Fm} \frac{P_{Sm}}{P_{Ss}} \times P_{Fs}$$

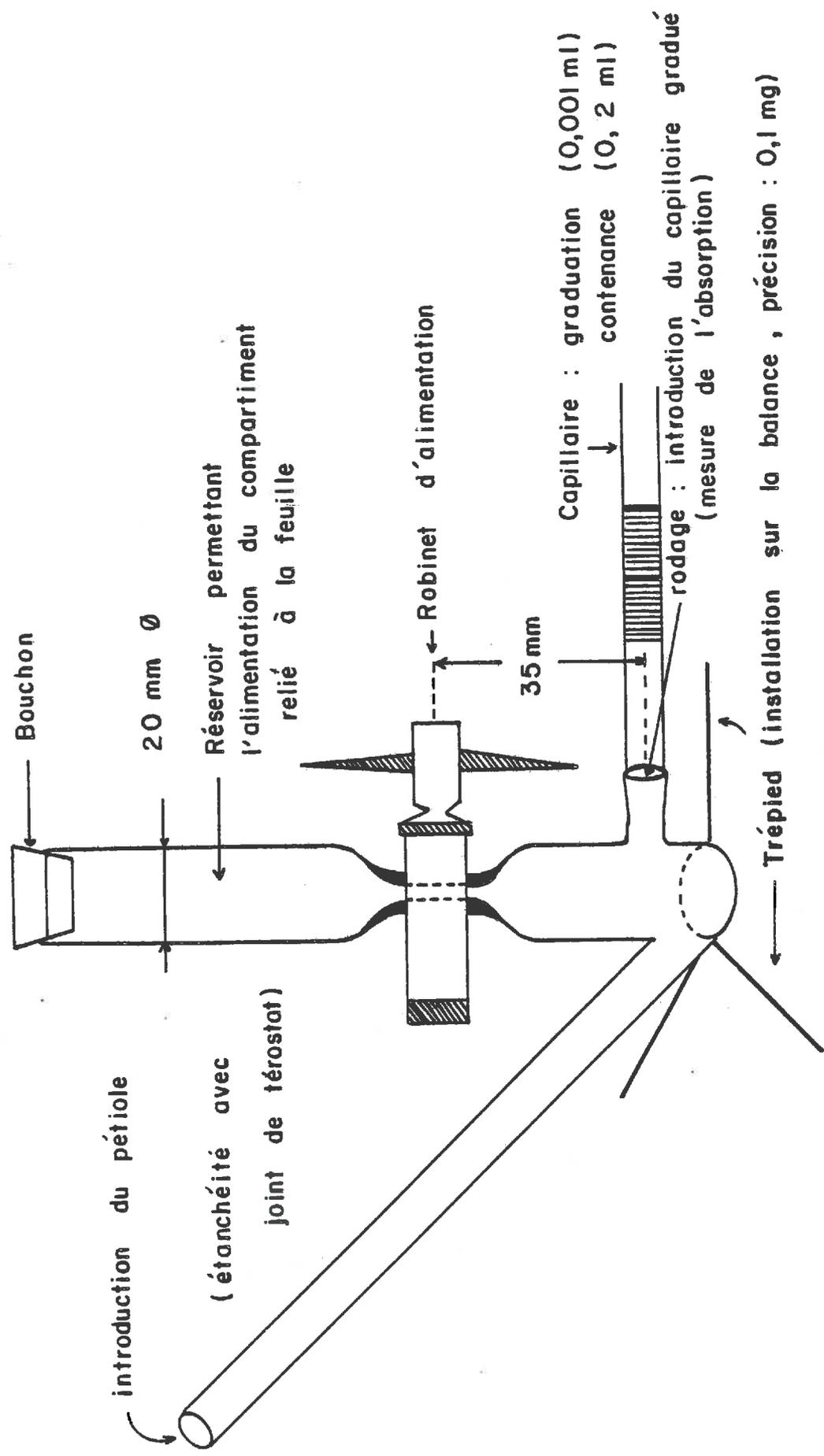
3 - Mesures au laboratoire

On a pesé des pieds de féverole (obtenus en serre) avant et après aspersion à saturation ; la mesure de la surface foliaire de chaque pied a permis de calculer la hauteur d'eau moyenne par pied, l'opération a été répétée sur trente pieds en aspergeant les faces supérieures des feuilles uniquement, avec un pulvérisateur de jardin.

d - **Expériences de laboratoire concernant les relations surface-volume lors de l'évaporation**

Dans le but de mettre en relation la quantité d'eau restante et la surface mouillée sur la feuille (cf discussion en C III f) nous avons effectué le suivi de l'évaporation de gouttes d'eau déposées sur des feuilles sectionnées de tournesol correctement alimentées en eau grâce à l'utilisation d'un potomètre (HUBER, 1983) et à des prises de vues régulières au cours de l'évaporation. La figure n° 30 représente le potomètre utilisé (la technique utilisée n'a pas permis d'obtenir des résultats probants sur des feuilles de féverole en raison de leur taille et de la forme de leur pétiole).

La méthode consiste à introduire de la fluoresceine dans la solution utilisée pour l'aspersion de la feuille et à prendre des clichés grâce à une source de lumière de Wood, permettant d'obtenir un bon contraste entre surfaces mouillée et non mouillée. Les images ont été traitées après numérisation grâce à un programme faisant le cumul des surfaces mouillées. La précision de la mesure est de l'ordre de 10 à 15 %, et tient au choix du niveau de coupure entre zones mouillées et non mouillées sur l'image numérisée.



Le potomètre mesure l'absorption de la feuille ; celui-ci est posé sur une balance qui mesure la variation pondérale de l'ensemble feuille + potomètre. Si l'on suppose que l'absorption est égale à la transpiration (teneur en eau dans la feuille constante), ces deux mesures permettent de calculer depuis un instant initial la quantité d'eau évaporée directement sur les feuilles et donc la quantité d'eau restante.

On peut cependant formuler quelques critiques à l'encontre du protocole :

- l'utilisation de feuilles de tournesol qui ne présentent pas la même structure superficielle que les feuilles de féverole
- l'introduction de fluoresceine dans l'eau qui modifie sans doute le processus d'évaporation
- l'absence de convection forcée

Malgré ces critiques, on supposera les résultats utilisables dans une modélisation de l'évaporation de l'eau interceptée par le couvert de féverole, dans la mesure où la paramétrisation établie à la suite de ces essais est facilement extrapolée de l'échelle de la feuille à celle d'une strate de végétation.

- E -

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie est divisée en quatre chapitres :

- en premier lieu, les résultats expérimentaux
- puis l'analyse de sensibilité du modèle aux paramètres et variables de forçage, ainsi qu'à quelques paramétrisations
- vient ensuite la comparaison entre les résultats du modèle et ceux des expérimentations
- enfin, on présente la hiérarchie d'importance des divers paramètres ou variables d'entrée.

I - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire ou au champ (cf chapitre D) ont trait à trois types de paramétrisations ou variables nécessaires au fonctionnement ou au test du modèle : la quantité d'eau interceptée par le couvert, la relation existant entre la diminution de surface et la diminution de volume lors de la résorption des gouttes et les durées d'humectation.

a - Interception de l'eau

1 - au laboratoire

La figure n° 31 présente les résultats d'épaisseur de film d'eau sous la forme d'un histogramme donnant la répartition par classe d'épaisseur ; la hauteur moyenne retenue par unité de surface foliaire est de 0,14 mm avec un coefficient de variation de 19 %. Il existe un rapport 3 entre le minimum et le maximum ; on peut donc imaginer la forte variabilité pouvant exister au champ.

2 - au champ

Quelques chiffres ont été obtenus au moyen de gouttières (tableau n° 4) ; à la faveur de pluies, on a pu comparer la précipitation brute et la précipitation nette (cf chapitre B III A 1) au cours de deux épisodes pluvieux. Pour l'épaisseur moyenne de la lame d'eau retenue sur l'unité de surface foliaire (C_{max}), le chiffre de 0,4 - 0,5 mm obtenu lors d'un orage surestime très largement la réalité. Cela est dû à une sous-estimation de la

Nombre de pieds

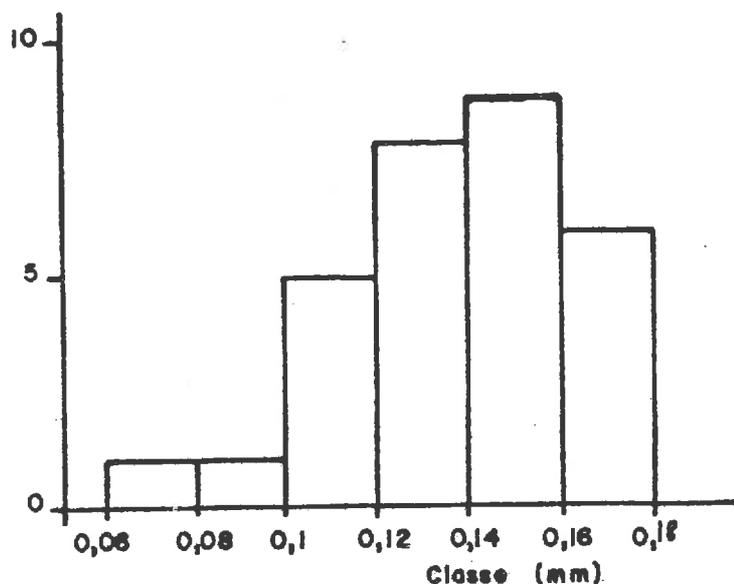


Fig. 31 - Estimation au labor de l'épaisseur du film d'eau s feuilles de féverole (par pesée classes d'épaisseur de film relatives à l'unité de s foliaire

Hauteur d'eau (mm)

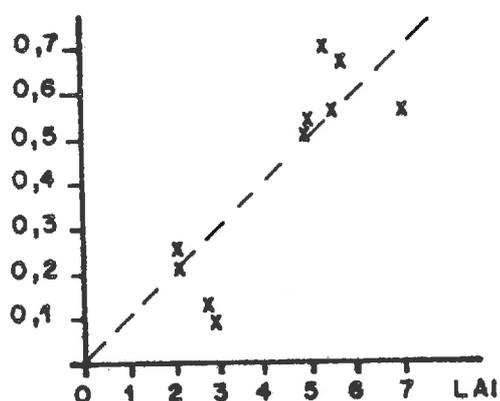


Fig. 32 - Estimation au champ de la quantité d'eau interceptée par le couvert (à l'aide de prélèvements). La hauteur d'eau est relative à l'ensemble du couvert

	ORAGE (23/06/86) (2 jeux de 5 gouttières)		AVERSE (08/07/86) (1 jeu de 5 gouttières)
LAI	4,4		5,7
Précipitation brute (mm)	5,9		1,1
Interception nette (mm)	1,8	2,1	0,6
C _{max} (mm)	0,4	0,5	0,1

Tableau n° 4 - Capacité d'interception obtenue au moyen de gouttières placées dans l'interrang ; l'interception nette est relative à l'ensemble du couvert et C_{max} = In/LAI

précipitation nette par les gouttières, soit qu'il y ait rebond des gouttes hors de celles-ci, que l'on ait un écoulement préférentiel le long des tiges ou encore qu'il y ait perte d'eau lors de la manipulation des gouttières pour effectuer la mesure. En revanche, la valeur de 0,1 mm lors d'une faible averse est vraisemblable.

BUTLER & HUBAND (1985) desquels est inspirée la méthode, trouvent eux aussi des résultats très élevés sur céréales (jusqu'à 5 mm d'interception nette) ; il semble donc raisonnable de remettre en cause cette méthode.

En ce qui concerne les prélèvements (cf chapitre D II c 2)), la figure n° 32 montre, avec une forte variabilité autour de la tendance moyenne, une épaisseur d'eau interceptée légèrement inférieure à 0,1 mm par unité de LAI (première bissectrice) cohérente avec les résultats de laboratoire.

Il faut, par ailleurs, signaler qu'il peut y avoir une légère surestimation de cette valeur, liée à l'hypothèse que les humidités pondérales des prélèvements des parcelles irriguées et non irriguées sont égales.

b - Relation surface-volume lors de la résorption des gouttes ou des films

Les figures n° 33, 34 montrent l'évolution de la surface mouillée par rapport à la surface mouillée à l'instant initial (surface relative) en fonction du volume d'eau restant relativement à la quantité d'eau initiale (volume relatif).

Ces courbes s'ajustent à une fonction du type $\frac{W}{W_0} = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^\beta$ avec β variant entre 0,1 (grosses gouttes ou film décroissant uniquement en épaisseur) et 0,55 (film ou goutte de surface variable) ; cette différence de valeur de β concrétise le fait que les gouttes perdent surtout en épaisseur au cours de l'évaporation (LECLERC, 1985) tandis que les films voient aussi bien leur surface que leur épaisseur diminuer au cours du temps.

Le paramètre β permettant donc de caractériser simplement le mode de résorption des surfaces mouillées, on choisira sa valeur pour la modélisation en fonction de l'aspect moyen du dépôt d'eau sur la culture considérée. Sur la féverole, on a essentiellement des films, de même que sur le maïs. Par contre,

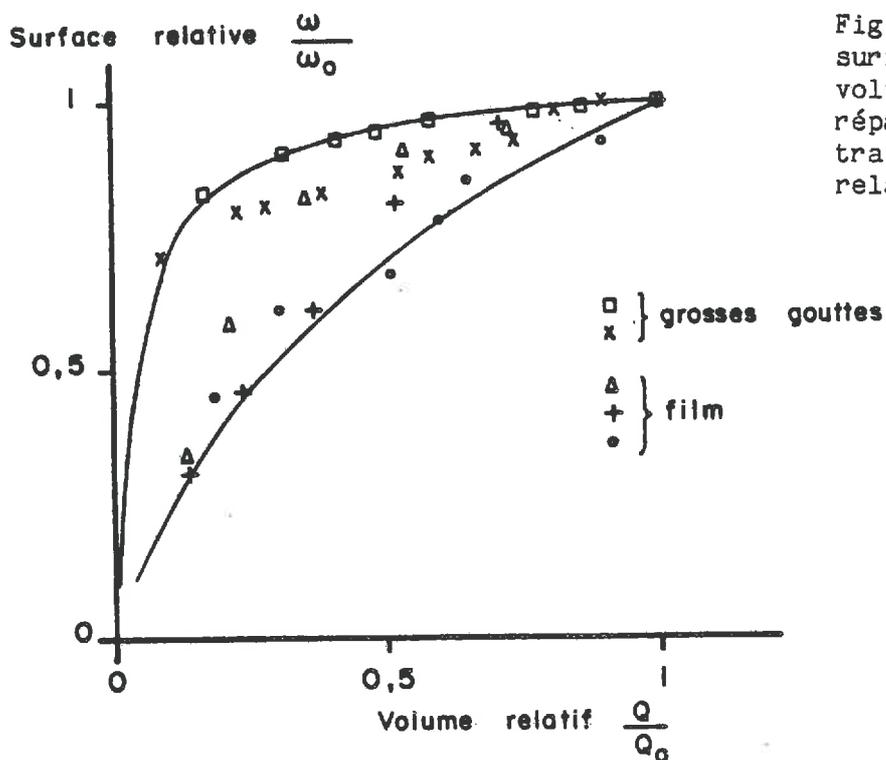


Fig. 33 - Courbes d'évolution surface relative en fonction volume relatif pour deux modes de répartition de l'eau. Les courbes trait plein délimitent la zone de relation entre $\frac{W}{W_0}$ et $\frac{Q}{Q_0}$

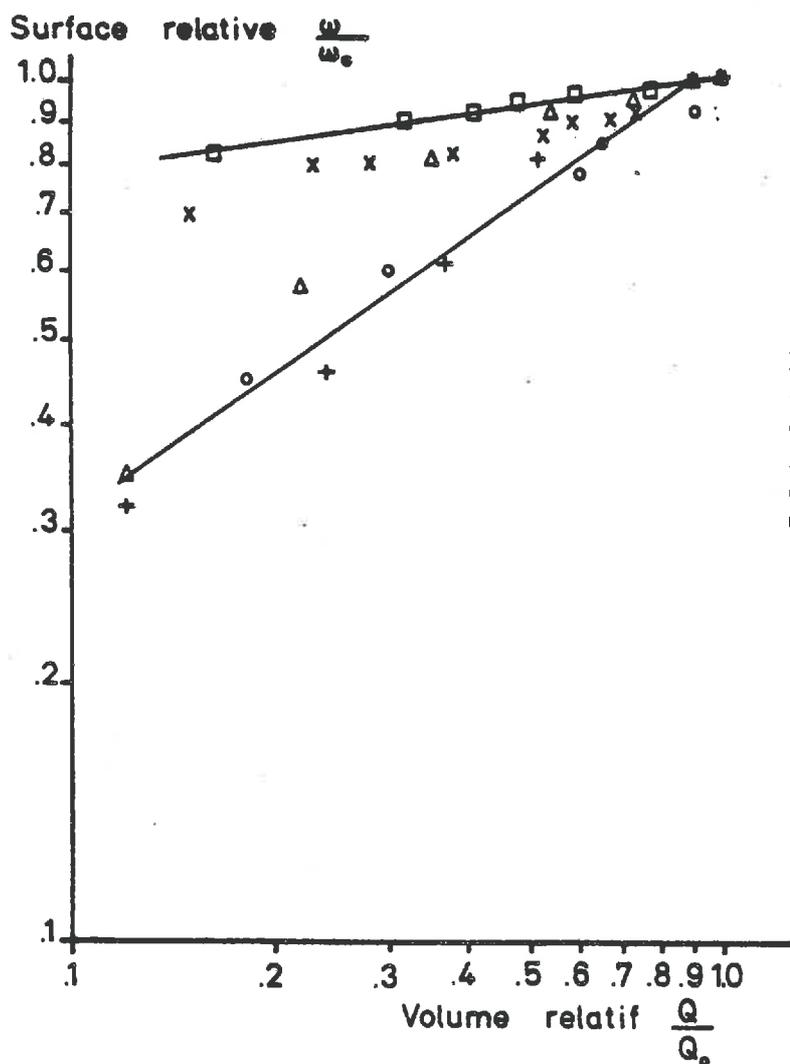


Fig. 34 - Courbes équivalentes coordonnées log-log (b : pente courbe ; r^2 : carré du coefficient de la régression). Les deux courbes correspondent à la zone telle que $0.1 \leq \beta \leq 0.55$

Mois	n° Jour	Rn	U(2m)	Ta	Tr	HR %
Mai 85	143	10-300	1,9-2,5	13-15	9,5-10	95-60
Mai 85	148	10-200	0,8-1,2	12-19	10-10,5	95-60
Mai 85	149	10-200	0,4-0,6	10-14	9-11	90-80
Juin 85	157	10-100	1,0-2,5	12,5-19,5	12,5-15	100-75
Juin 85	163	50-250	3,7-5,1	10,5-12	8-9	80-70
Juin 85	165	0-500	0,2-2,3	8,5-15	7,5-8,5	95-50
Juin 85	169	150-500	0,5-1,6	12,5-19,5	8,5-10,5	65-50
Juin 85	170	25-200	1,4-2,1	11,0-15	9,0-9,5	85-70
Juin 85	176	100-400	0,9-2,9	11,0-14,5	9,0-9,5	90-70
Juin 85	177	100-500	2,3-3,8	13,5-17	10-12	90-80
Juin 85	179	50-250	1,3-3,5	11,0-13,5	8,5-9,5	90-70
Juin 86	157	10-400	1,6-4,6	6,0-8,5	5-6	95-90
Juin 86	162	150-400	0,6-2,1	10,5-13	6,5-7	75-70
Juin 86	163	40-250	2,0-3,5	8,5-9,0	8-8,5	95-85
Juin 86	171	0-300	1,2-2,2	12-12,5	10-10,5	90-80
Juin 86	175	0-400	2,0-3,0	11-13,5	10-11	100-85
Juillet	182	20-500	2,0-2,5	14,5-15	11,5-13,0	90-80
Juillet	184	20-500	1,2-3,2	17-19	12,5-14,5	85-65
Juillet	197	20-500	0,3-2,3	14-19	11,0-14,0	100-60
Juillet	201	0-500	1,2-2,8	13,5-17	13,0-10,5	80-65

Tableau n° 5 - Gamme de variation des variables météorologiques au cours des journées d'expérimentations de 1985 et 1986

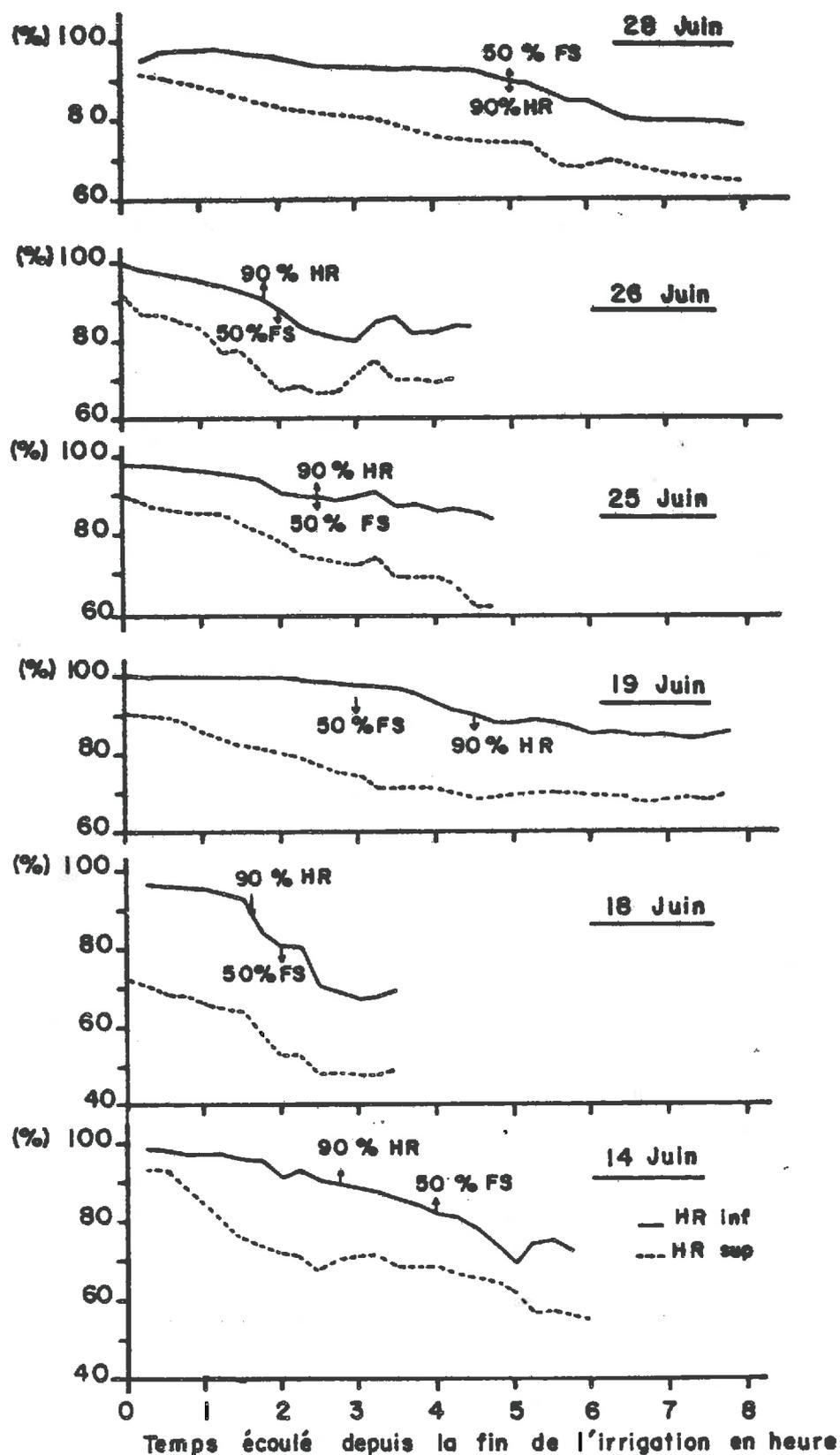


Fig. 35 - Evolution de l'humidité relative à 2 hauteurs au-dessus du couv
 (HRsup : 2,6 m) et dans le couvert (HRinf = 0,6 m) pour 6 journées 1985
 "50 % FS" désigne le moment où 50 % des feuilles de l'échantillon
 sont sèches et sert de critère de fin de durée d'humectation

sur le blé, le dépôt d'eau se fait principalement sous forme de gouttes. Le tableau suivant donne une idée de ce que pourraient être trois paramètres de modélisation pour la durée d'humectation.

Culture	Blé	maïs	féverole
Mode de dépôt	gouttes (BUTLER, 1986)	film (NORMAN, 1983)	film
Epaisseur d'eau	0,1 mm	0,15 mm	0,1 mm
Wo	12 %	20 %	95 %
β	0,1	0,5	0,1

c - Durées d'humectation

1 - journées utilisables

Au total, sur les deux campagnes, on dispose d'une vingtaine de journées de mesure. Il n'y a pas toujours correspondance entre le tableau n° 5 et les figures représentatives de certaines journées car l'on ne dispose pas toujours simultanément des enregistrements météorologiques et des observations de l'humectation pour des causes diverses : panne de secteur, évènement pluvieux postérieur au début de la cinétique d'évaporation, débit du réseau d'irrigation insuffisant...

Les journées vraiment intéressantes se caractérisent comme suit :

- $R_n \leq 250 \text{ W.m}^{-2}$ (couverture nuageuse permanente)
- Vent (2 m) : $U \geq 1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (convection forcée dans le couvert)
- La gamme d'humidité relative est comprise dans l'intervalle 60-100 % au niveau de référence.

La gamme de vitesse du vent est telle que l'on puisse encore calculer un profil à l'intérieur du couvert ; mais il est évident que les plus longues durées de mouillage correspondent à des valeurs faibles tant du rayonnement net que de la vitesse du vent.

Les courbes de la figure n° 35 montrent l'évolution de l'humidité au-dessus et à l'intérieur du couvert ; l'humidité varie au cours du temps dans une gamme assez importante, mais cela est surtout dû à l'évolution de la

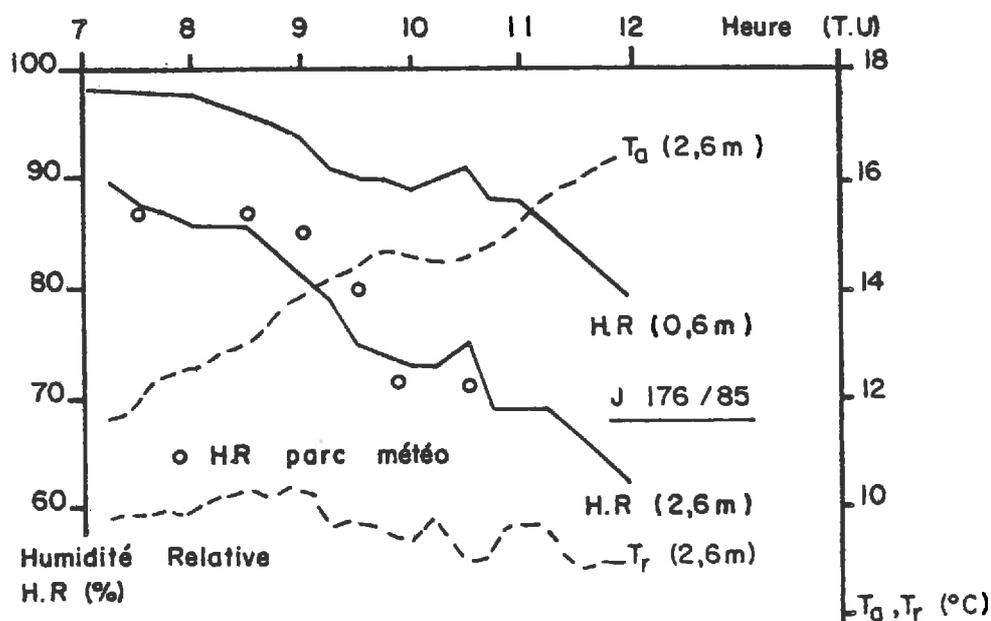


Fig. 36 a - Evolution de Ta, HR à 2 niveaux (dans et au-dessus de la végétation) et de Tr au niveau de référence (J. 176/1985)

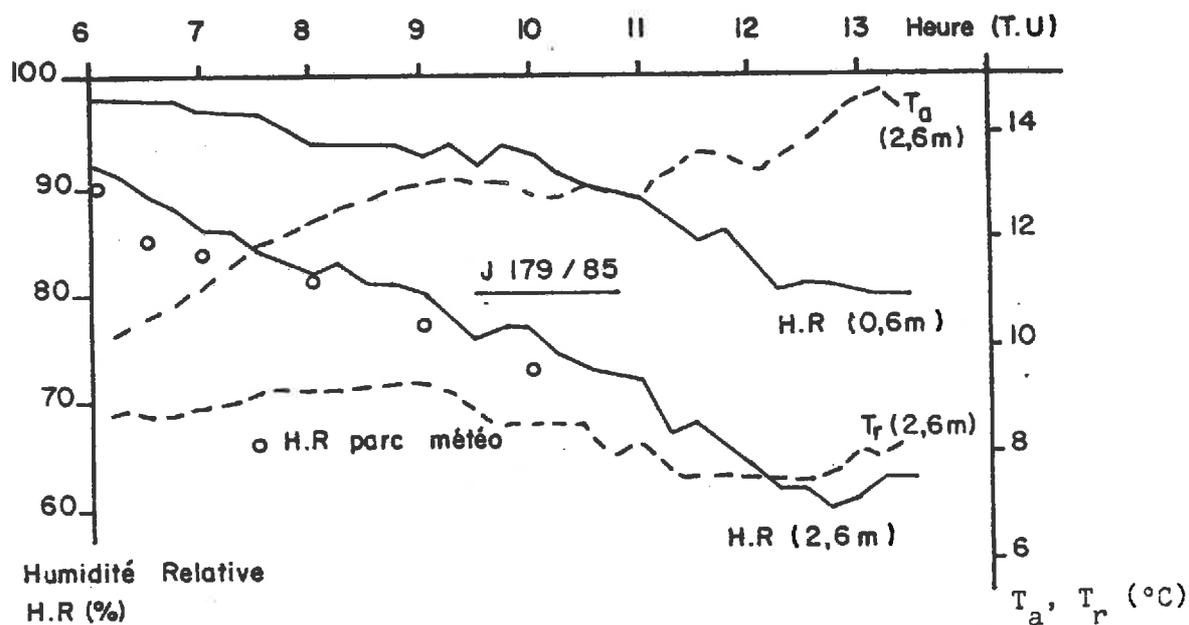


Fig. 36 b - Evolution de Ta, Hr à 2 niveaux (dans et au-dessus de la végétation) et de Tr au niveau de référence (J. 179/1985))

température de l'air ; en revanche, la variation de la température du point de rosée est moins importante (cf fig. n° 36a et b) : c'est donc à partir de T_a et T_r qu'il faut effectuer la modélisation, sachant que l'on pourra considérer T_r comme fixe sur plusieurs heures ; l'humidité relative doit être considérée comme une variable secondaire. On a indiqué sur les courbes de la figure 35 les instants où $HR_{inf} = 90 \%$ et où on observe visuellement que 50 % des feuilles de la strate centrée sur 0,6m approximativement sont sèches ; il n'y a pas correspondance entre ces deux instants dans la plupart des cas et encore moins si l'on retient $HR_{sup} = 90 \%$ comme seuil d'humidité relative ; on confirme donc ici l'impossibilité d'utiliser l'humidité relative au parc météo pour repérer les durées d'humectation (cf A, II, b, 2, a).

L'ensemble des manipulations présentées ici correspond à des épisodes de temps couvert mais faisant suite à une irrigation de la culture et non pas une pluie réelle. Dans le cas normal, l'évolution de T_r au niveau de référence est gouvernée par celle de la masse d'air résultant de l'équilibre avec une région entièrement mouillée, tandis que lors des expérimentations, il est certain qu'interviennent des effets advectifs dus à la présence d'un environnement sec (effet oasis).

2 - mesure de la durée d'humectation au moyen de capteurs

Les résultats obtenus (cf fig. n° 37 a & b) montrent clairement que l'on ne peut pas se fier aux capteurs pour estimer la durée d'humectation à l'intérieur du couvert. En effet, à partir des deux journées présentées à titre d'exemples, on peut tirer un certain nombre de conclusions :

- deux capteurs situés à une même hauteur peuvent présenter des réponses très différentes (jusqu'à 7 heures de différence)
- cette réponse va être fonction de leur position dans le couvert ; elles vont en particulier dépendre des conditions d'environnement local (feuilles au-dessus du capteur déterminant en partie la quantité d'eau interceptée par celui-ci) ainsi que de l'orientation de l'organe sensible par rapport au vent et au rayonnement.

On observe malgré tout une augmentation de la durée d'humectation au fur et à mesure que l'on descend dans le couvert végétal ; on pourrait multiplier le nombre des capteurs à chaque niveau, ce qui aboutirait peut être à une meilleure représentativité. Toutefois il faut tenir compte du coût des capteurs et de la difficulté de maintenance. Dans l'état actuel, la mesure ne fournit donc pas de solution simple.

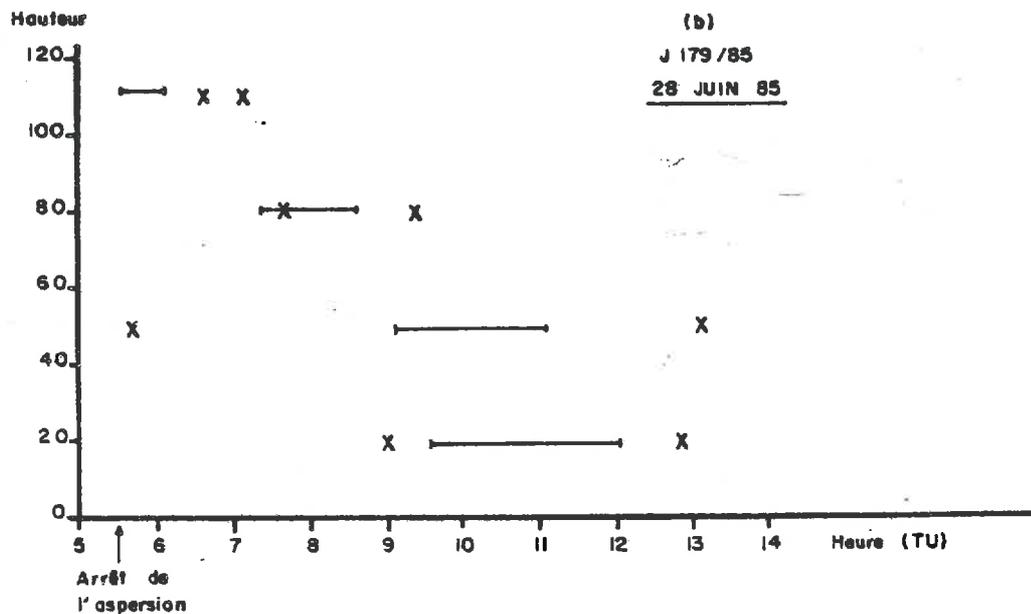
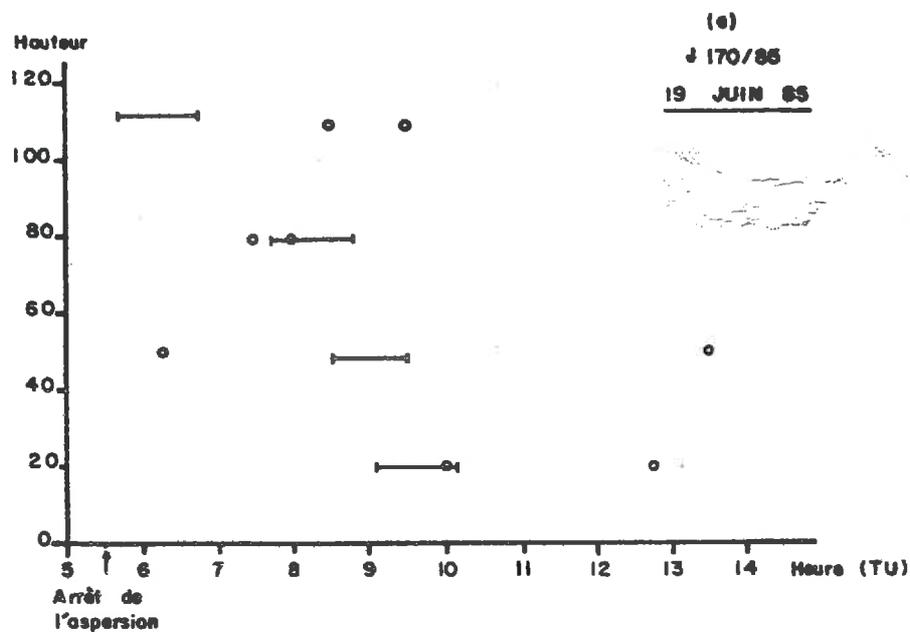


Fig. 37 a & b - Durées d'humectation mesurées à l'aide de capteurs installés à 4 hauteurs dans le couvert (2 capteurs par niveau)
Les traits pleins correspondent à l'observation visuelle
(75 % - 25 % de feuilles mouillées dans l'échantillon de chaque strate

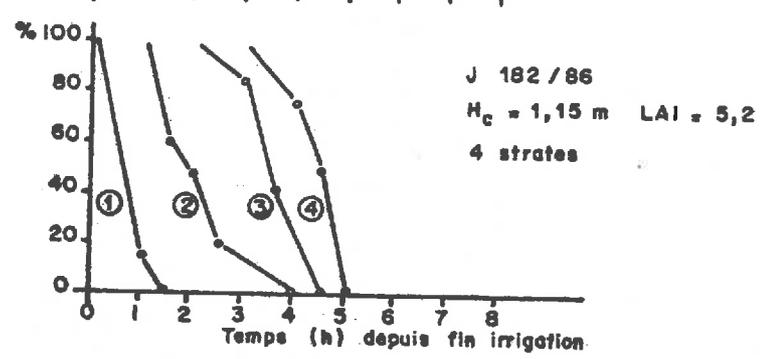
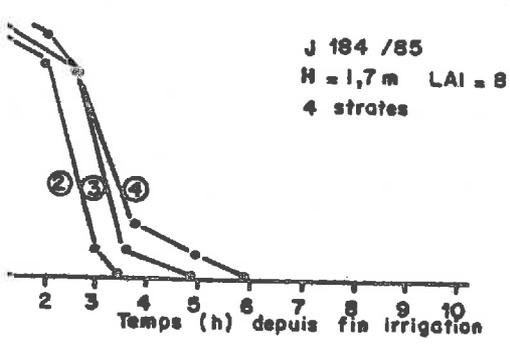
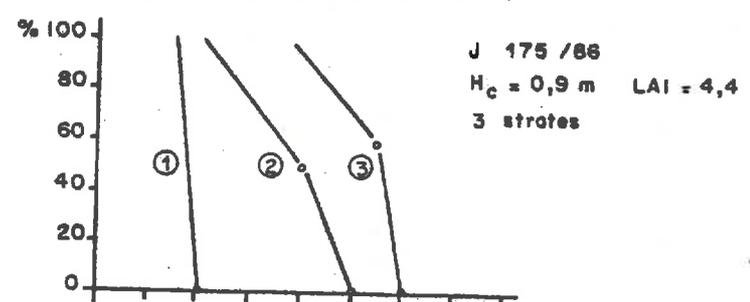
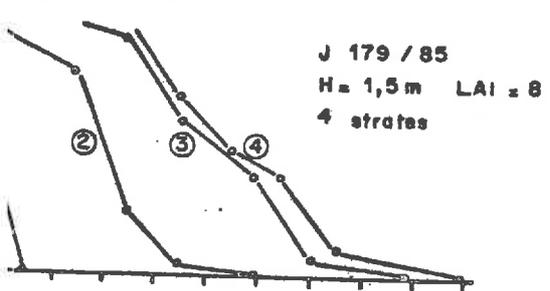
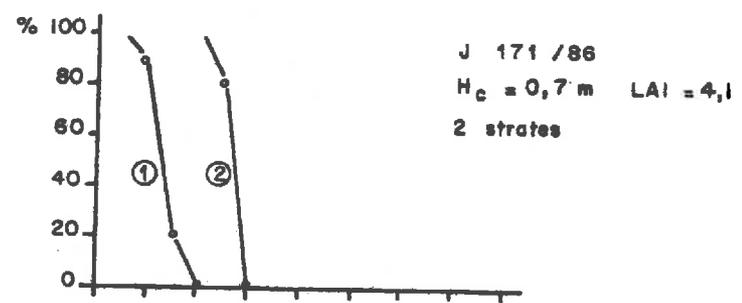
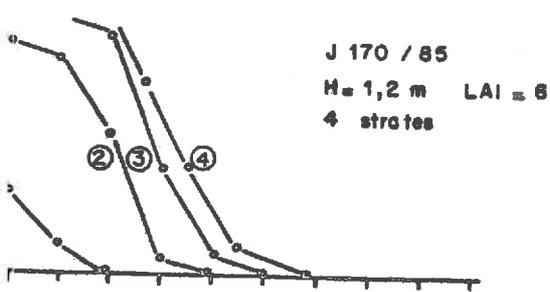
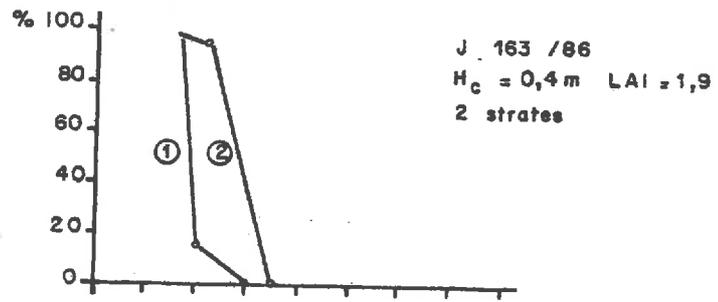
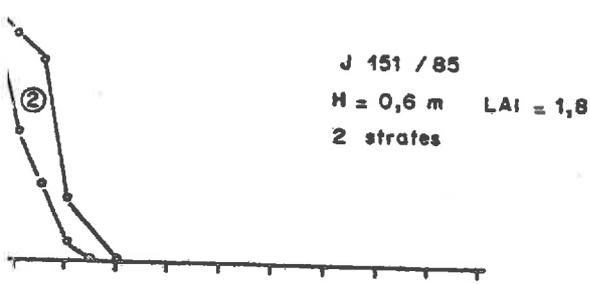
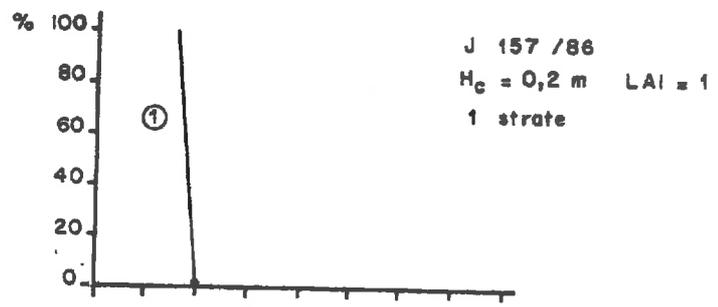
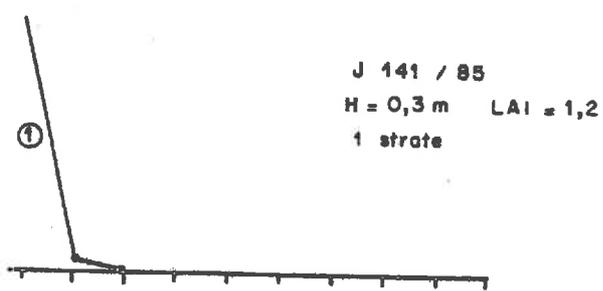


Fig. 38 - Evolution, en fonction du temps après l'arrêt de l'irrigation, du pourcentage de feuilles mouillées dans 1 à 4 strates de végétation (1 : strate supérieure, 4 : strate inférieure) (les strates ont une épaisseur d'environ 30 cm)

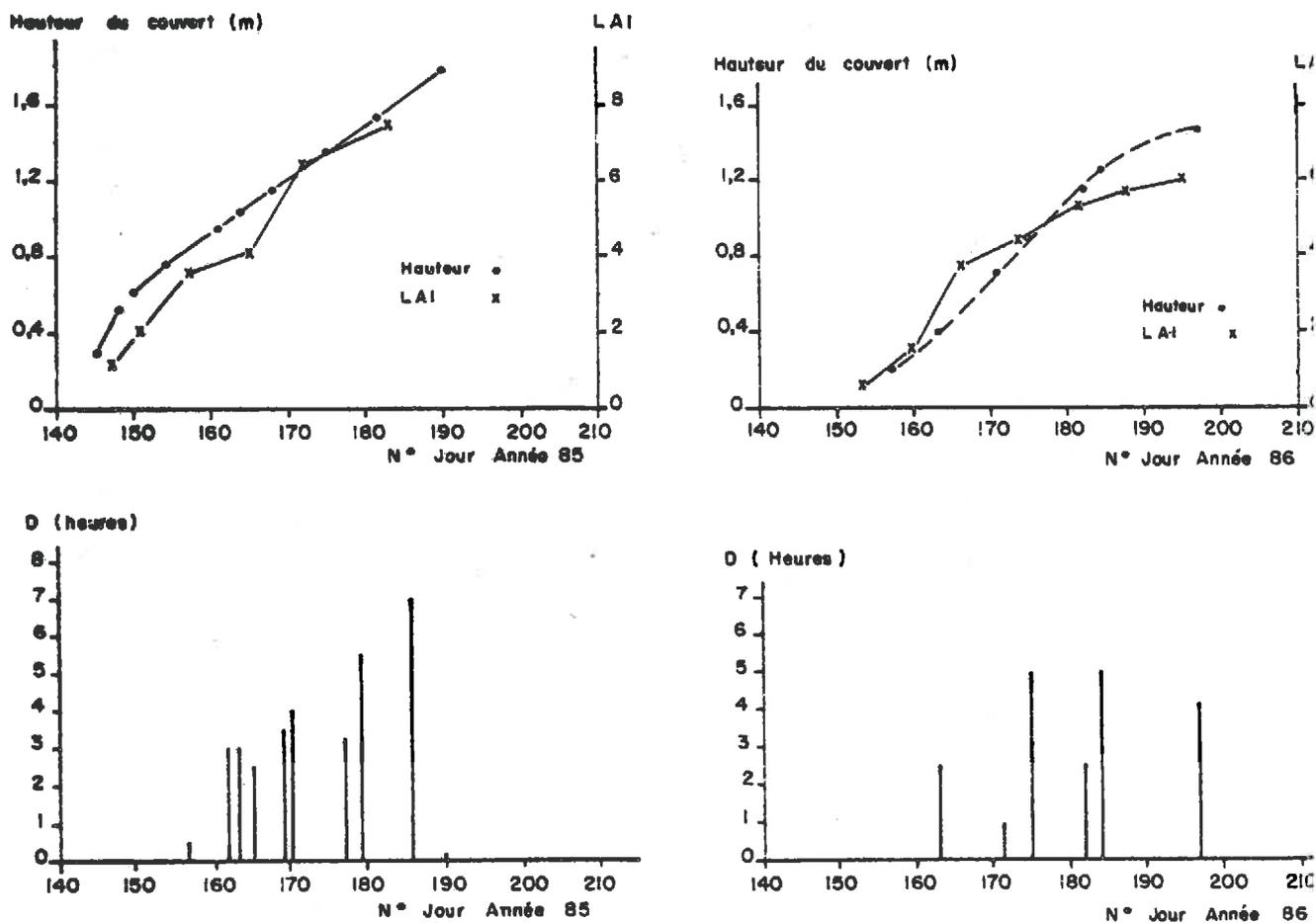


Fig. 39 - Evolutions comparées de caractéristiques du couvert (LAI, hauteur) et des différences de durées d'humectation entre les parties supérieure et inférieure du couvert pour les campagnes de 1985 et 1986

3 - estimation de la durée d'humectation par observation visuelle.

Les capteurs électroniques donnent une réponse en tout ou rien ; l'observation montre au contraire l'humectation comme un phénomène variant continûment dans l'espace et dans le temps : on est donc amené à se donner un critère. Dans une strate donnée, on choisit un échantillon d'une trentaine de feuilles ; on considère que la strate est sèche dès lors qu'il ne reste plus de trace d'eau que sur 50 % d'entre elles, ce qui correspond à la disparition de la quasi totalité de l'eau interceptée, le mouillage sur les feuilles encore humectées représentant une fraction négligeable quantitativement (de l'ordre de 5 %).

La figure n° 38 décrit l'évolution de pourcentage de feuilles mouillées en fonction du temps pour dix journées au cours du cycle de végétation. Sur la figure 39, on constate que la durée d'humectation de la strate inférieure est corrélée avec la hauteur du couvert de manière plus ou moins étroite en fonction des variations d'autres grandeurs. Il n'est pas toujours facile de caractériser la strate du bas, surtout lorsqu'elle est sénescence. La durée d'humectation qui lui est attribuée n'est donc qu'indicative.

Dans les conditions correspondant aux expérimentations, une strate met en moyenne une heure pour traverser la gamme de mouillage correspondant à l'intervalle (75 % de feuilles mouillées - 25 % de feuilles mouillées).

Si, au lieu de 50 %, on prend 10 % de feuilles encore mouillées comme critère de séchage, la durée d'humectation serait multipliée par 1,1 à 1,3 environ selon les cas, mais cette durée correspondrait à la quantité d'eau marginale restant sous forme de loupes ou de grosses gouttes disséminées en quelques points sur les feuilles.

II - ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE

a - Conditions standard

Afin de voir l'influence respective de différents paramètres (qu'il s'agisse de caractéristiques du couvert ou de variables météorologiques) nous avons défini des conditions standard autour desquelles varieront séparément

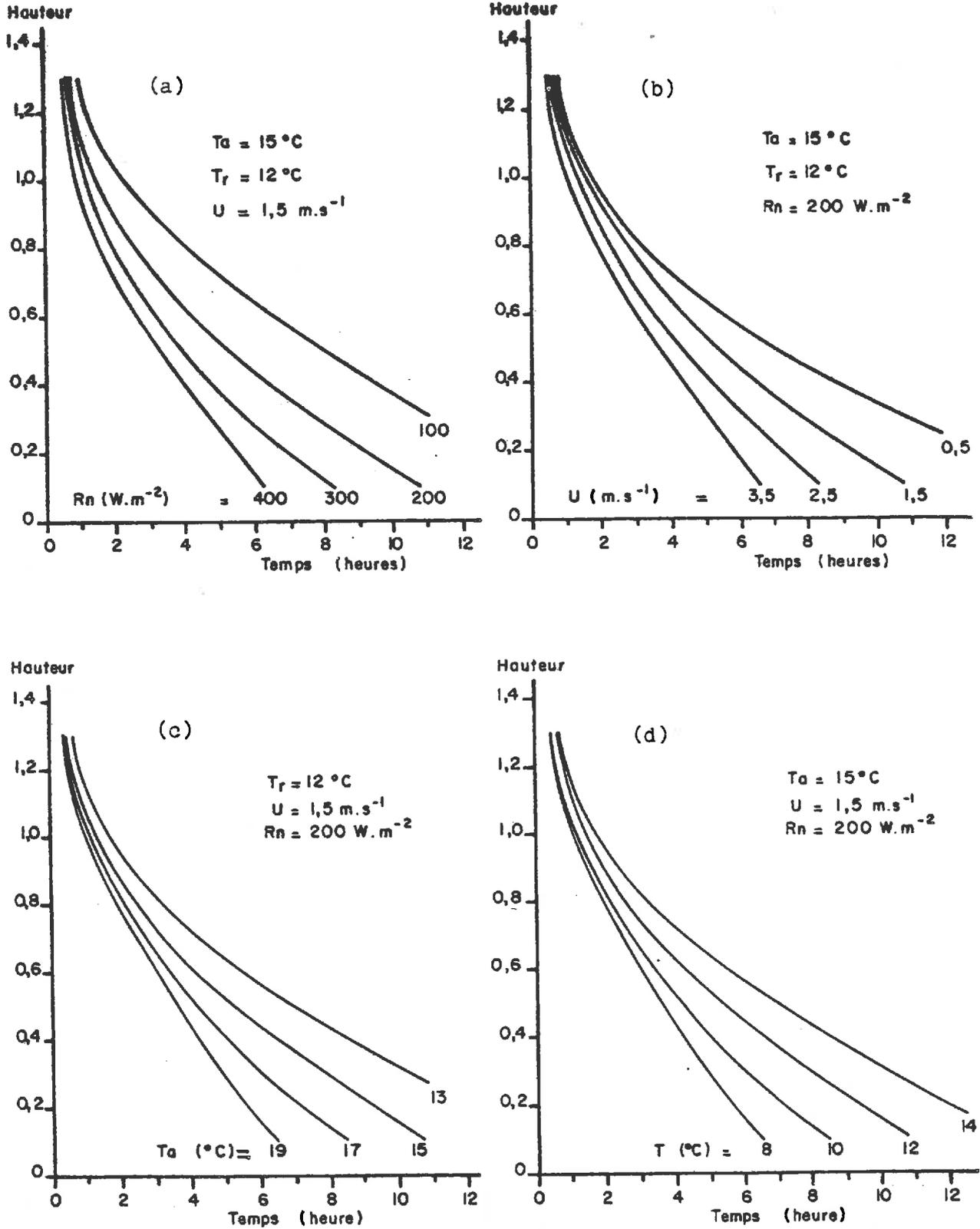


Fig. 40 a, b, c et d - Analyse de sensibilité aux variables de forçage (R_n , V , T_a , T_r) : les courbes représentent les profils de durées d'humectation calculées

les paramètres analysés. Ces conditions doivent correspondre à des situations conduisant à des durées d'humectation conséquentes : ainsi faut-il que le rayonnement soit faible et l'humidité élevée. Par ailleurs, l'humidité relative étant un paramètre secondaire, on caractérisera la masse d'air sous l'angle du contenu en de la vapeur d'eau par la température du point de rosée.

Les conditions standard retenues sont les suivantes :

i) paramètres météorologiques

$R_n = 200 \text{ W.m}^{-2}$	$v = 1.5 \text{ m/s}$	à 2 m au-dessus
	$T_r = 12^\circ\text{C}$	du couvert
	$T_a = 15^\circ\text{C}$	

(soit une humidité relative voisine de 80 %)

ii) paramètres d'humectation

- . épaisseur d'eau : 0,07 mm
- . exposant de la résorption des gouttes $\beta = 1/3$
- . proportion initiale de surface mouillée : 95 %

iii) paramètres du couvert

Le LAI total est égal à 6,8 réparti de bas en haut comme suit en densité de surface foliaire par tranches de 20 cm : 3.3, 3.9, 4.8, 5.4, 6.6, 5.8, 4.4.

b - Sensibilité aux variables météorologiques

Les figures 40a et b donnent l'évolution de la durée d'humectation à différentes hauteurs pour des valeurs de R_n et V variant autour des valeurs standard retenues.

A 50 cm de hauteur, on obtient une augmentation de durée d'augmentation d'environ 50 % pour une diminution de moitié du rayonnement net (par une journée très couverte d'été, on peut descendre à un R_n de 100 W.m^{-2}) ou une diminution de moitié de la vitesse du vent.

Les figures 40c et d donnent l'évolution de la durée d'humectation pour différentes valeurs de T_a et T_r . La comparaison des deux figures permet de constater que les valeurs de DH sont proches lorsque $(T_a - T_r)$ reste constant, ce qui correspond pratiquement à une situation où l'on aurait HR % à peu près constante. On constate globalement que lorsque T_a augmente, la durée d'humectation diminue, car $(T_a - T_r)$ croissant, l'air est beaucoup plus sec.

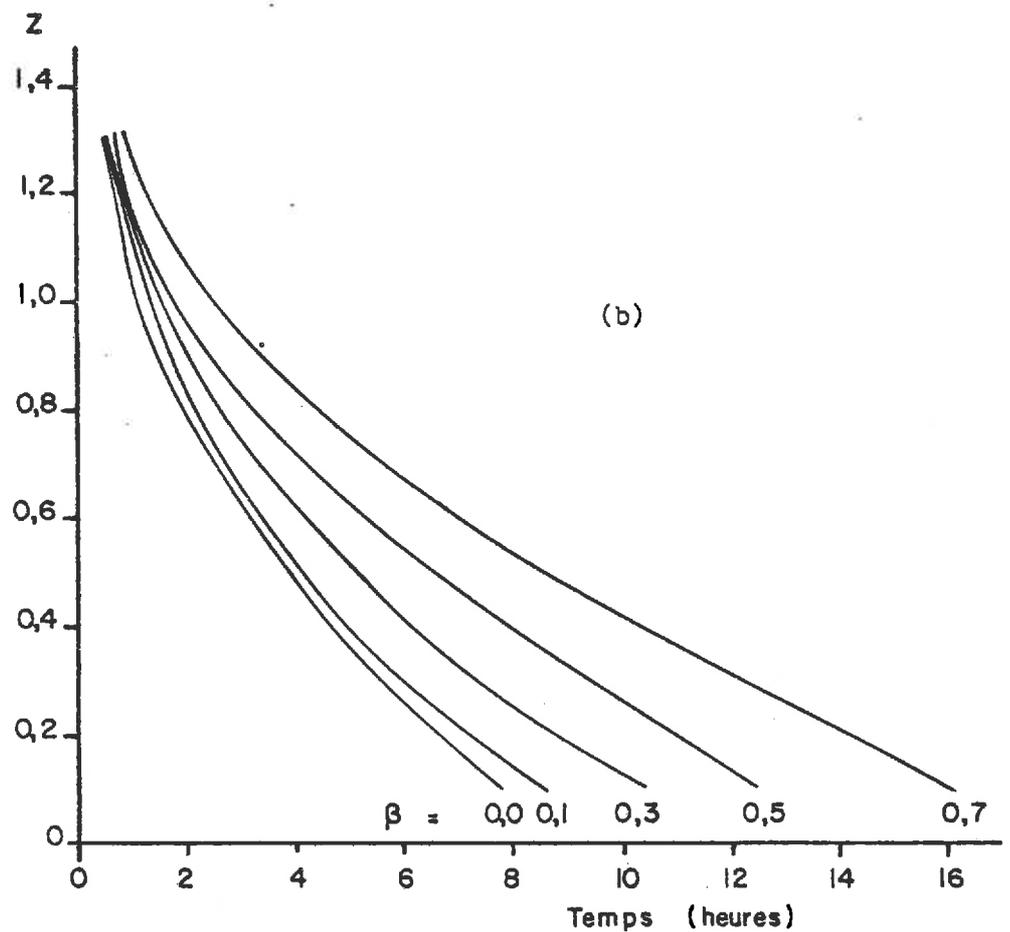
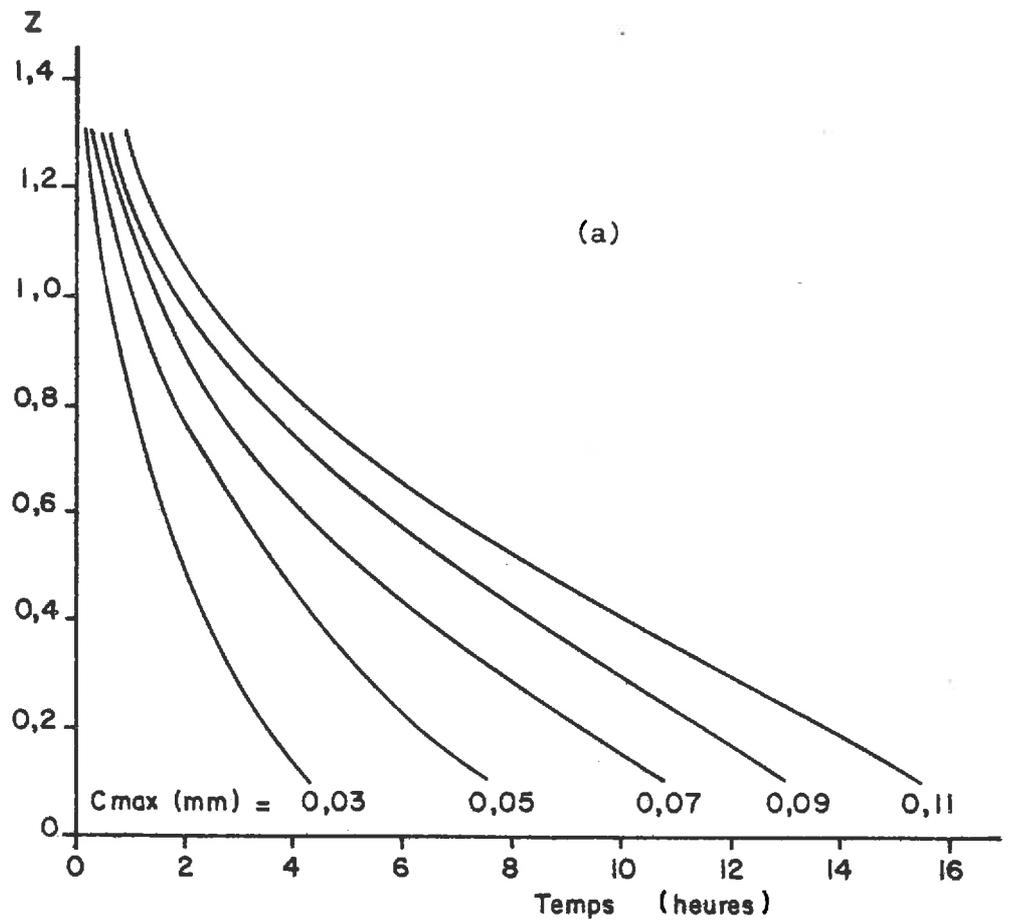


Fig. 41 a & b - Profils de durées d'humectation calculées montrant la sensibilité du modèle aux paramètres relatifs au dépôt d'eau (C_{max} , β)

c - Sensibilité aux paramètres de l'humectation

1 - épaisseur d'eau

La figure 41a permet de constater que la durée d'humectation est légèrement plus que proportionnelle à la quantité d'eau présente sur les feuilles. Ceci est dû au fait que l'humidité de l'air dans les strates basses du couvert est maintenue à un niveau élevé tant que les couches du haut du couvert ne sont pas asséchées, le taux d'évaporation d'une strate s'accroissant dès lors que celles du dessus sont sèches. Il en résulte que le paramètre de caractérisation de l'interception nette est crucial pour la modélisation, ce qui justifie les efforts accomplis pour avoir une estimation correcte de sa valeur (cf D II c).

2 - résorption des gouttes

On observe sur la figure 41b qui sera utilisée pour la comparaison modèle-mesures que le mode de résorption des gouttes n'est pas sans conséquence sur la durée d'humectation. Ainsi, pour $\beta = 2/3$ (cas proche d'une résorption de type goutte hémisphérique conservant leur forme au cours de l'évaporation), la durée est fortement supérieure au cas où $\beta = 0$, ce qui correspond à une résorption en film dont l'épaisseur diminue uniformément sans affecter la surface. Ceci est parfaitement logique dans la mesure où le fait d'avoir asséché une partie de la feuille ne conduit pas à une perte d'eau nulle dans cette partie puisque l'évapotranspiration prend le relais de l'évaporation de l'eau interceptée.

À une hauteur de 50 cm, le fait de passer d'un mode de résorption à surface constante ($\beta = 0$) à un mode de résorption à surface variable ($\beta = 0,5$) conduit à augmenter la durée d'humectation par un facteur 2 (cf Fig. n° 41b)

d - Sensibilité aux paramètres du couvert

1 - surface foliaire

La surface foliaire intervient à deux titres :

Tout d'abord, elle joue sur la quantité d'eau interceptée dont on a vu que c'était un facteur crucial, et ensuite modifie la pénétration du rayonnement ainsi que la vitesse du vent (cf Fig. n° 42a) au sein du couvert.

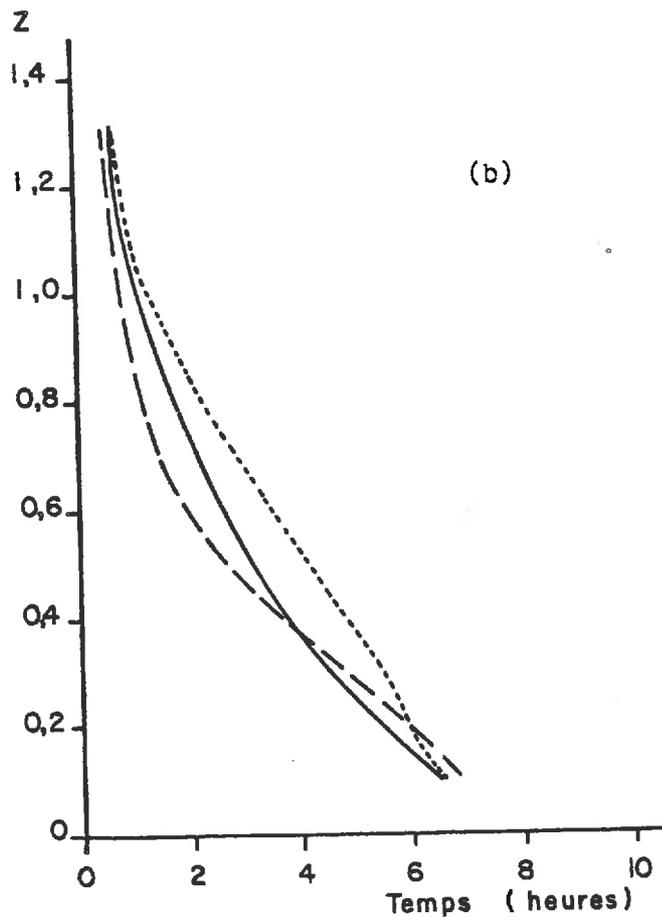
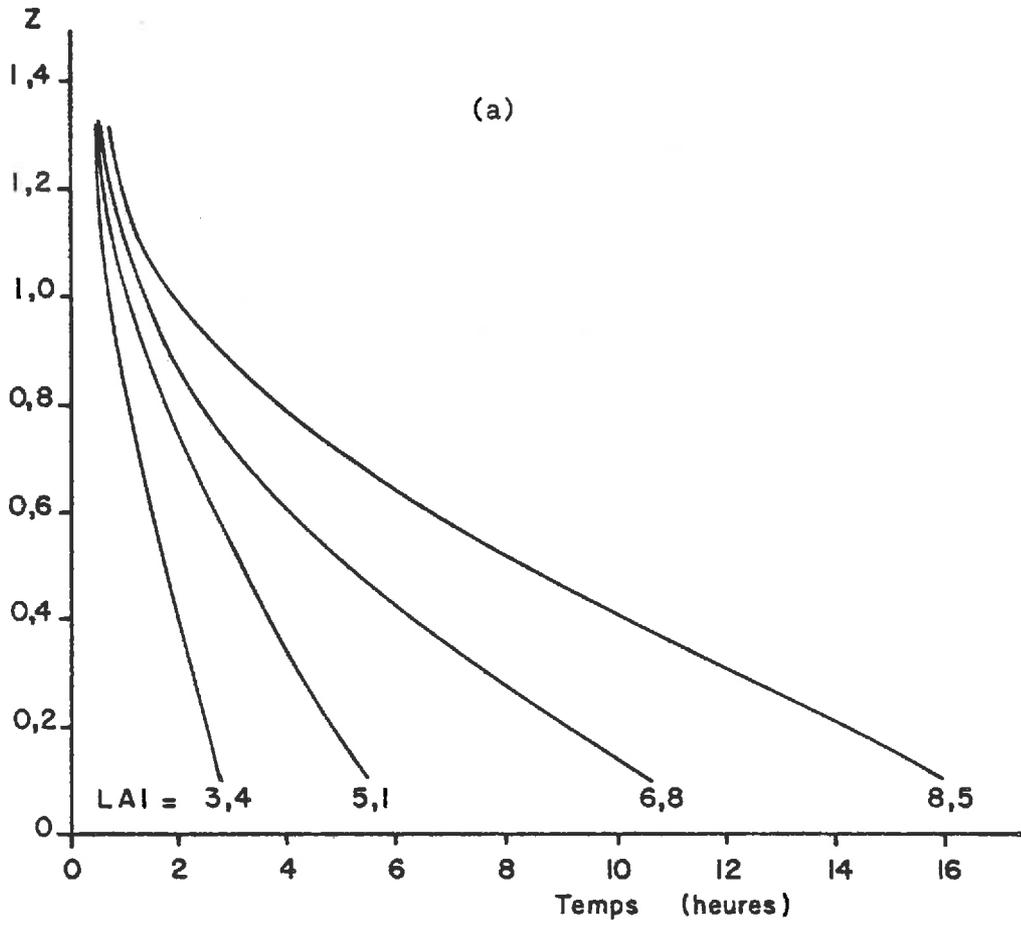


Fig. 42 a & b - Sensibilité du mc aux paramètres relatifs au couve LAI total (a) et répartition du selon la position du maximum densité de surface foliaire (b)
maximum en haut :
au milieu : ———
en bas : - - - -
(le LAI est égal à 5.1)

On constate dès lors que le doublement de surface foliaire conduit à une multiplication par un facteur voisin de 3 de la durée d'humectation à 50 cm. Ceci est à mettre en relation avec le fait qu'une végétation plus développée est plus sensible à une épidémie (WEISS & al, 1980 ; cf A I b 4 i).

2 - répartition de la surface foliaire

Pour une même surface foliaire totale, il n'est pas sans intérêt de s'interroger sur les conséquences de la répartition des feuilles ; cette répartition joue sur la pénétration du rayonnement, du vent, sur la distribution de l'eau dans le couvert ; on constate sur la figure n° 42b que la répartition n'a que peu d'influence sur les durées d'humectation des parties hautes et basses de la végétation. C'est dans la partie centrale que la situation vis-à-vis de ce facteur est la plus contrastée ; ceci est dû au fait que le facteur déterminant à un niveau donné est la surface foliaire cumulée depuis le sommet.

3 - résistance stomatique

Dans le domaine de rayonnement global inférieur à 300 W.m^{-2} , sauf pour les strates supérieures, la résistance stomatique est élevée et reste dans un domaine où ses variations ont peu d'incidence sur la durée d'humectation dans la mesure où l'évaporation sur les zones non humectées est faible devant celle des zones qui le sont.

e - Sensibilité à quelques autres paramètres (cf C III c 3)

- La résistance R_{ss} permet de caractériser l'intensité du transfert de vapeur venant du sol en fonction de l'état d'humidité de celui-ci ; dans les simulations, on la prend égale à 0, dans la mesure où, postérieurement à une pluie, le sol est mouillé. Toutefois, une augmentation de sa valeur est possible et aboutit à une diminution de la durée d'humectation des strates inférieures (de l'ordre de $1/4 \text{ h}$ à une heure). En particulier, sa valeur est importante dans le cas d'un couvert peu développé ; toutefois, cette valeur est le plus souvent proche de zéro puisque l'essentiel de l'eau arrive au sol, le couvert étant rapidement saturé en raison d'un LAI faible. SHUTTLEWORTH (1985) montre que l'influence de cette résistance devient négligeable à partir d'un LAI de 3, la majorité du flux venant de la végétation.

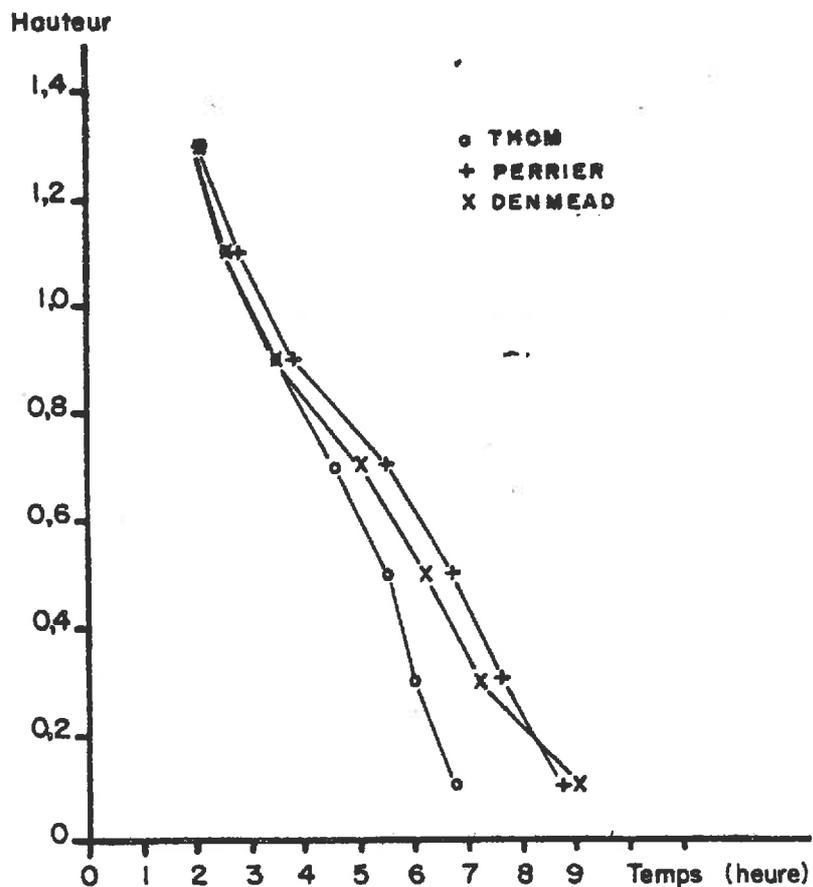


Fig. 43 - Influence du choix du profil de diffusivité sur le profil calculé de durée d'humectation

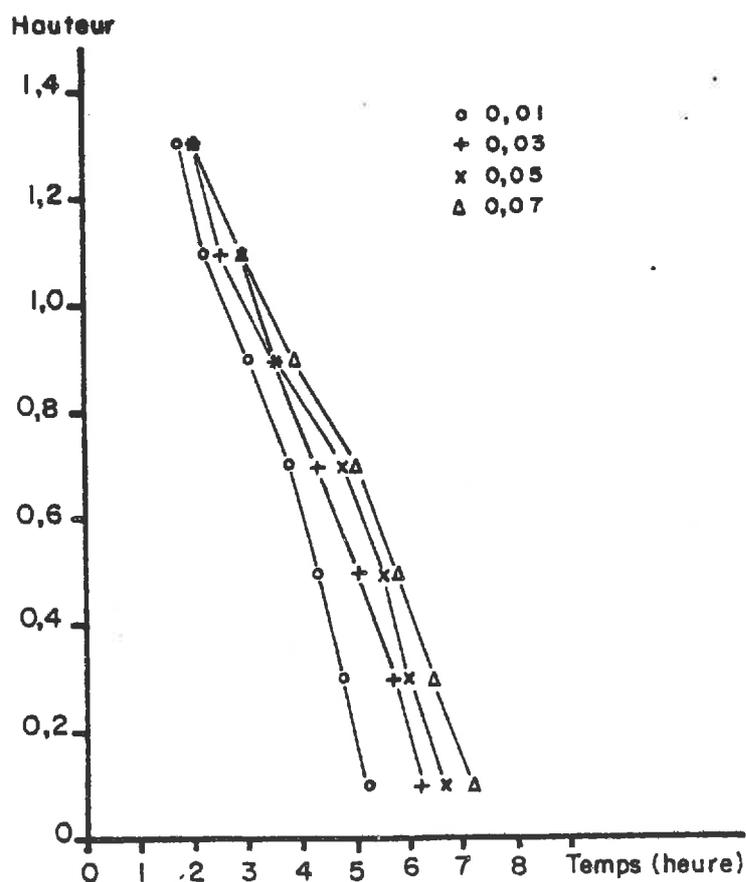


Fig. 44 - Influence de la valeur de la dimension caractéristique (m) des feuilles sur le profil calculé de durée d'humectation

- La forme du profil de diffusivité joue sur la durée d'humectation des strates inférieures. Sur la figure n° 43, on compare trois profils (cf C III d 1).

La valeur de la dimension caractéristique des feuilles a une influence limitée, mais non négligeable dans les parties basses du couvert ; lorsque cette dimension augmente, le coefficient d'échange diminue et la durée d'humectation s'accroît (fig. n° 44).

III - COMPARAISON MODELE-MESURE

On a porté sur les courbes de la figure n° 45 les résultats concernant les comparaisons entre mesures in situ et le calcul par le modèle pour 12 journées (6 en 1985 et 6 en 1986). Sur chaque figure, la courbe en trait plein représente la valeur estimée de la durée d'humectation jusqu'à ce que 50 % des feuilles soient totalement sèches. Cette valeur est encadrée par les durées correspondant à 75 % et 25 % des feuilles encore partiellement mouillées. Les courbes en traits pointillés représentent les valeurs obtenues par modélisation dans les conditions suivantes :

- R_n , V , T_a , T_r entrées à partir des mesures obtenues à 2 m au-dessus du couvert végétal.
- l'épaisseur d'eau sur les feuilles est prise égale à 0.07 mm
- la valeur de la surface foliaire et la répartition sont obtenues par interpolation à partir de mesures hebdomadaires.
- la valeur du coefficient caractéristique du mode de résorption (β) est prise égale à 1/3

Les courbes n° 46 permettent de voir l'influence du choix de la valeur de β sur la qualité de l'ajustement modèle-mesures :

a) $\beta = 0,1$; cette valeur correspond à une résorption en lame d'eau dans le cas où l'épaisseur diminue beaucoup plus vite que la surface, on a des grosses gouttes comparables à des cylindres ou des films de surface décroissant peu durant l'évaporation.

b) $\beta = 0,55$; c'est la valeur maximale que l'on a pu observer lors d'expérimentations : elle correspond à une résorption de gouttes ou de films où la surface mouillée diminue en même temps que l'épaisseur d'eau.

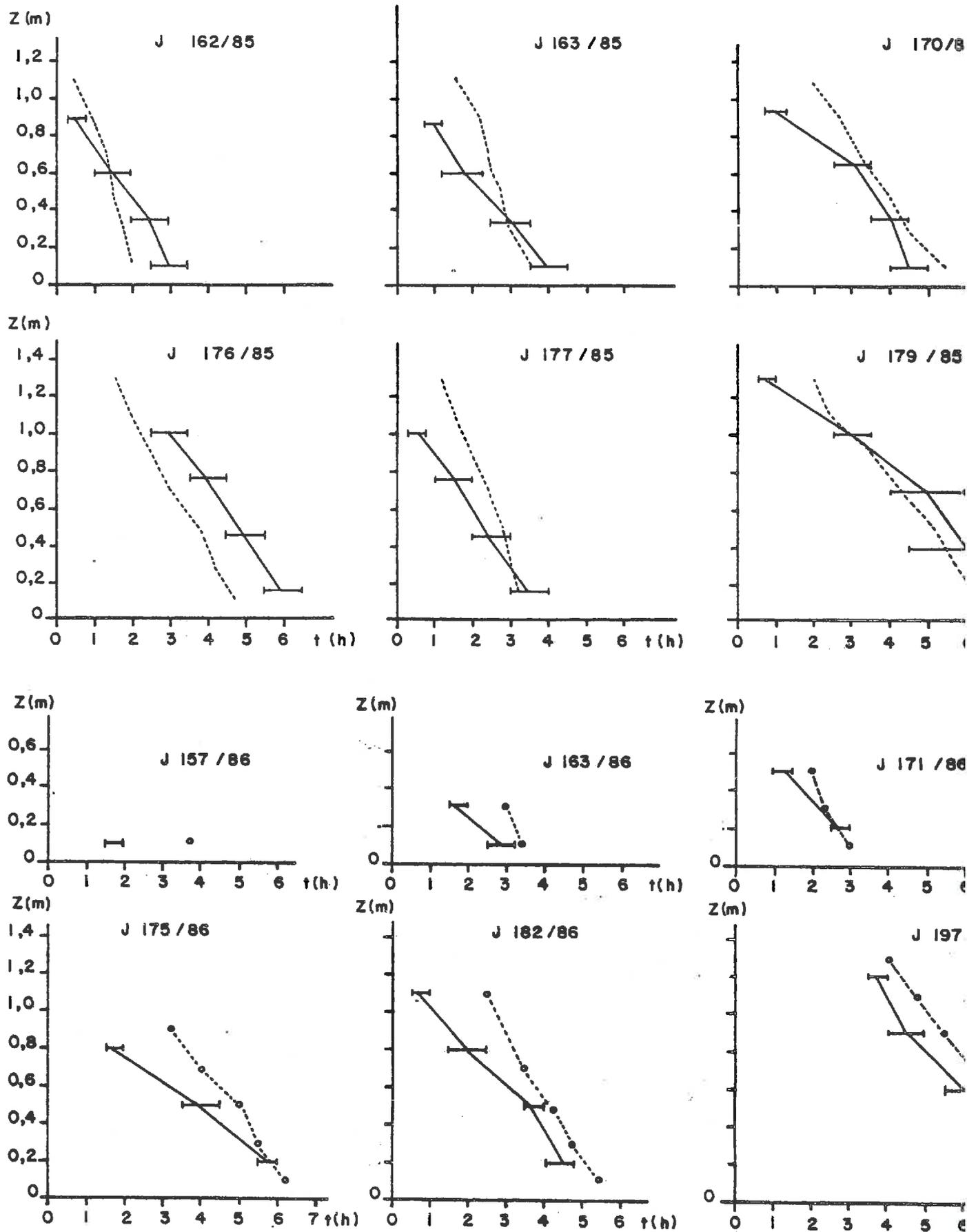


Fig. 45 - Comparaison des profils calculés (-----) par le modèle mesurés (——) de durées d'humectation sur 12 expérimentations (1 barres horizontales correspondent à l'intervalle 75% - 25% de feuilles encore mouillées)

c) $\beta = 2/3$; ce cas correspond théoriquement à une résorption de gouttes telle que celles-ci conservent leur forme hémisphérique au cours du temps lors de l'évaporation. En effet, on $\frac{W}{W_0} = \frac{n \cdot 2\pi R^2}{n \cdot 2\pi R_0^2}$ où n est le nombre de gouttes, R et R_0 les rayons des gouttes à t et t_0 , par ailleurs $\frac{Q}{Q_0} = \frac{n \cdot 2/3 \pi R^3}{n \cdot 2/3 \pi R_0^3}$; donc, on a bien $\frac{W}{W_0} = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{2/3}$.

Les coefficients de corrélation diffèrent peu les uns des autres ; ceci peut être expliqué par plusieurs raisons :

- pour les strates supérieures du couvert, il est logique d'avoir des différences faibles de durées d'humectation car l'énergie disponible est importante et l'eau disparaît rapidement quelque soit le mode de résorption. D'une manière générale, le modèle surestime la durée d'humectation des couches supérieures ; il est possible que cette surestimation du modèle soit imputable au phénomène d'advection : par rapport aux points de mesure de T_a et T_h qui se trouvaient au centre de la parcelle, la zone d'observation des durées d'humectation pouvait être soumise à une demande évaporative plus élevée du fait d'un gradient latéral de teneur en vapeur d'eau de l'air.

- pour les strates inférieures, le mode de résorption a une influence plus marquée sur la durée d'humectation ; mais en valeur relative, le rapport durée calculée/durée mesurée est bien meilleur que pour les strates supérieures du couvert. Ce résultat est satisfaisant dans la mesure où c'est la durée maximale d'humectation qui intéresse le plus souvent le pathologiste, tout en sachant que, pour certaines maladies, la durée déterminante est celle des feuilles supérieures récemment apparues (ex : Ascochyta fabae de la féverole).

En conséquence, le choix de la valeur de β ne semble avoir qu'une influence limitée sur la durée d'humectation lorsque l'on s'intéresse à une comparaison modèle-mesures dans les conditions d'expérimentation qui ont été les nôtres, alors que l'analyse de sensibilité la donnait comme un facteur important, les autres paramètres étant constants ; il faut donc penser que les autres paramètres, en particulier le rayonnement et la température (croissants au cours de chaque expérimentation du début à la fin) ont une influence cumulée importante sur le résultat. Mais dans des conditions classiques de longues durées d'humectation, il est sûr que le choix de la valeur de β a une forte influence sur le résultat.

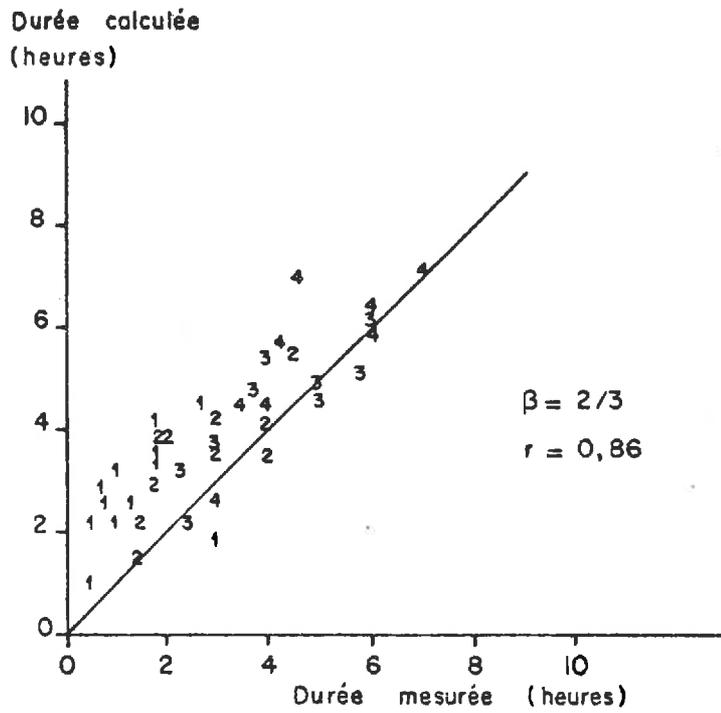
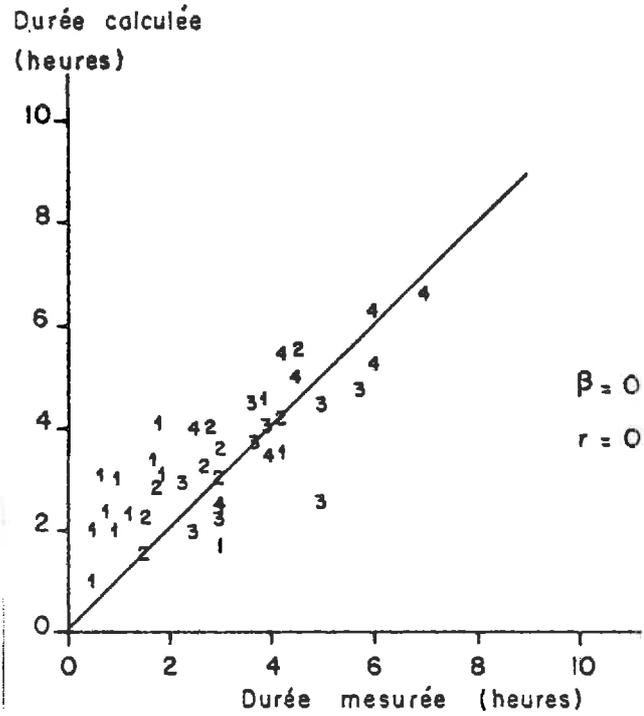
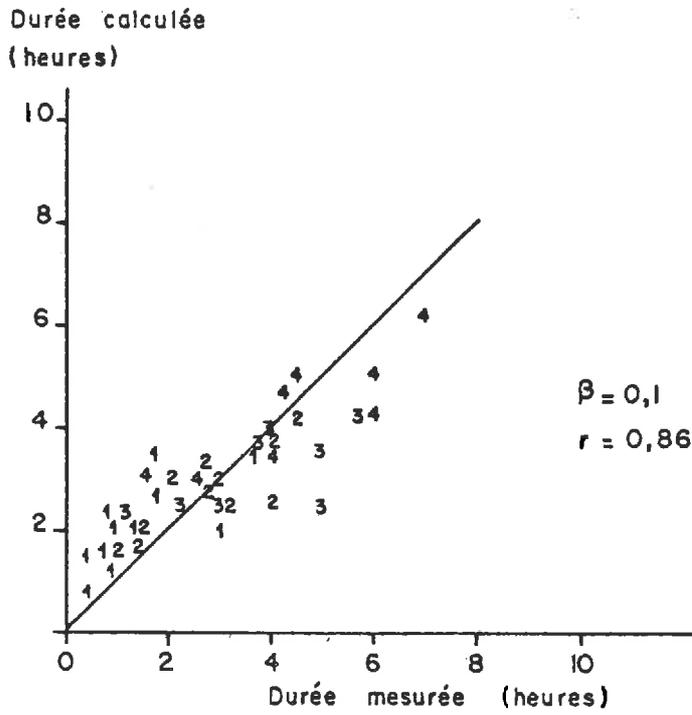


Fig. 46 - Représentation graphique pour 12 journées des valeurs calculées de durées d'humectation de 1 à 4 strates de végétat (state supérieure : 1 ; strate inférieure : 4) en fonction des valeurs mesurées

Pour expliquer les distorsions entre le modèle et les mesures, on peut invoquer la paramétrisation de la turbulence, approximative à divers titres :

- en phase juvénile, la féverole est peu couvrante et l'intensité de la turbulence est élevée ;
- lorsque la culture est couvrante à moyennement développée, on peut observer des ondulations du couvert (lors des rafales) qui s'accompagnent d'un pic d'intensité de la turbulence dans la région supérieure de la culture ;
- enfin, lorsque les plantes ont une taille adulte (jusqu'à 1,5 m en conditions d'alimentation hydrique non limitante), les relations flux-gradients perdent leur validité au-dessus du couvert (CELLIER, 1986). Par ailleurs, la turbulence devient fortement intermittente dans la partie inférieure de la végétation.

Un modèle du 1er ordre ne prend pas en compte toutes ces considérations qui démontrent le caractère "non local" de la turbulence. Néanmoins, la comparaison modèle-mesures apparaît vraiment encourageante, sachant que le modèle a le bénéfice de la simplicité du schéma de calcul et donc une vocation opérationnelle à court terme.

IV - HIERARCHIE D'IMPORTANCE DES PARAMETRES OU VARIABLES DE FORCAGE

Les facteurs déterminants de la durée d'humectation sont, par ordre d'importance décroissante :

- hauteur maximale d'eau interceptée et densité de surface foliaire
- rayonnement net et partition de celui-ci
- différence $T_a - T_r$
- vitesse du vent

Viennent ensuite les facteurs suivants :

- mode de résorption de l'eau superficielle
- résistance stomatique
- résistance au transfert de vapeur depuis le sol
- diffusivité turbulente

Il faut donc soigner l'estimation de l'interception nette et connaître précisément l'indice foliaire (dans le meilleur des cas, le profil de densité de surface foliaire, ou sinon au moins la valeur du LAI et la hauteur couvert). Le calcul de la durée d'humectation nécessite une mesure ou estimation précise du rayonnement net et de la vitesse du vent, ainsi que températures de l'air et du point de rosée. L'ensemble des autres paramètres n'a qu'une incidence faible sur le résultat du calcul.

Dans une perspective d'utilisation du modèle, il faut donc :

- connaître avec précision (à 10-20 % près environ) C_{max} , $W_o, f(z)$ (ou LAI, et une courbe théorique de répartition de la surface foliaire), B (coefficient d'extinction du rayonnement net), $R_n(H_c)$ (ou $R_g(H_c)$ avec $R_n(H_c) = \lambda R_g(H_c) - \mu$), T_a et T_r à 2 m, V à 2 m.
- estimer β , R_{smin} et R_{smax} pour les faces supérieures et inférieures des feuilles, d , R_{ss} .

Au total, on dénombre 15 paramètres et 4 variables d'entrée (ou 3 si l'on suppose T_r constante au cours de la journée) auxquels s'ajoutent coefficients divers (calcul de D , $K(Z)$, $R_g(Z)$, R_c , R_v , R_{solc} , R_{solv} , Z_0 , Z_{os}).

- F -

APPLICATIONS DU MODELE

Dans cette dernière partie, on distingue deux chapitres correspondant à des applications du modèle en conditions naturelles, c'est-à-dire après une pluie ou lors de la succession d'épisodes pluvieux :

- tout d'abord, on présente une formule simplifiée pour le calcul de la durée d'humectation de la strate inférieure du couvert ;
- puis, on montre comment utiliser le modèle en routine sur des simulations à partir de données du parc météo.

I - MISE AU POINT D'UNE FORMULE SIMPLIFIEE DE CALCUL DE LA DUREE D'HUMECTATION DE LA STRATE INFERIEURE

Pour les durées d'humectation courtes consécutivement à une pluie, on a essayé de mettre au point une formule simplifiée permettant de calculer simplement cette durée. Pour ce faire, on a fait tourner le modèle avec différentes valeurs de LAI, Rn, V, Ta-Tr et calculé la durée d'humectation résultante par le modèle pour la strate inférieure du couvert.

Sur un ensemble de 135 valeurs calculées (LAI : 0.6, 1.6, 2.6, 4.4, 5.6 ; Rn = 100, 200, 300 ; V = 1, 3, 5 ; Ta-Tr = 1, 2, 3) par le modèle, on a effectué une régression multiple en supposant une relation du type :

$$DH = DHo Rn^{-a} \cdot U^{-b} \cdot (Ta-Tr)^{-c} \cdot LAI^d$$

pour laquelle on utilise une valeur moyenne des variables postérieurement à la pluie (DH : durée d'humectation de la strate inférieure)..

Le calcul donne $DHo = 40$ avec $a = 0,64$; $b = c = 0,17$; $d = 0,8$

Le coefficient de détermination (égal au carré du coefficient de corrélation entre les variables DH calculée par le modèle et DH calculée par la formule simplifiée) est interprété comme la proportion de la variabilité expliquée par l'équation de régression ; il est en l'occurrence égal à 90 %.

Si l'on utilise ensuite la comparaison entre valeurs observées (cf tableau n° 6) et valeurs calculées par la formule simplifiée (cf fig. n° 47 a & b), on voit que le modèle fournit une bien meilleure solution ($r = 0,96$) par rapport à la formule simplifiée ($r = 0,56$). Il faut conserver à l'esprit que

	N° jour	Rn	V	Ta - Tr	LAI	Hc	DH
1986	157	80	1.4	0.56	1.0	0.2	2
	163	94	2.0	0.44	2.0	0.4	3
	171	150	1.4	1.9	4.1	0.7	3
	175	252	2.8	1.3	4.4	0.9	6
	182	165	2.3	1.7	5.2	1.15	4.5
	197	218	1.2	2.8	6.0	1.45	7
	1985	162	308	3.2	4.1	3.1	0.95
163		124	4.9	2.2	3.7	0.95	4
170		122	1.6	2.4	5.7	1.15	5
176		217	1.8	2.3	6.7	1.35	6
177		307	3.1	2.7	7.0	1.4	3.5
179		120	2.0	2.1	7.2	1.4	6

Tableau n° 6 - Données nécessaires au calcul de la durée d'humectation de la strate inférieure à l'aide d'une formule simplifiée

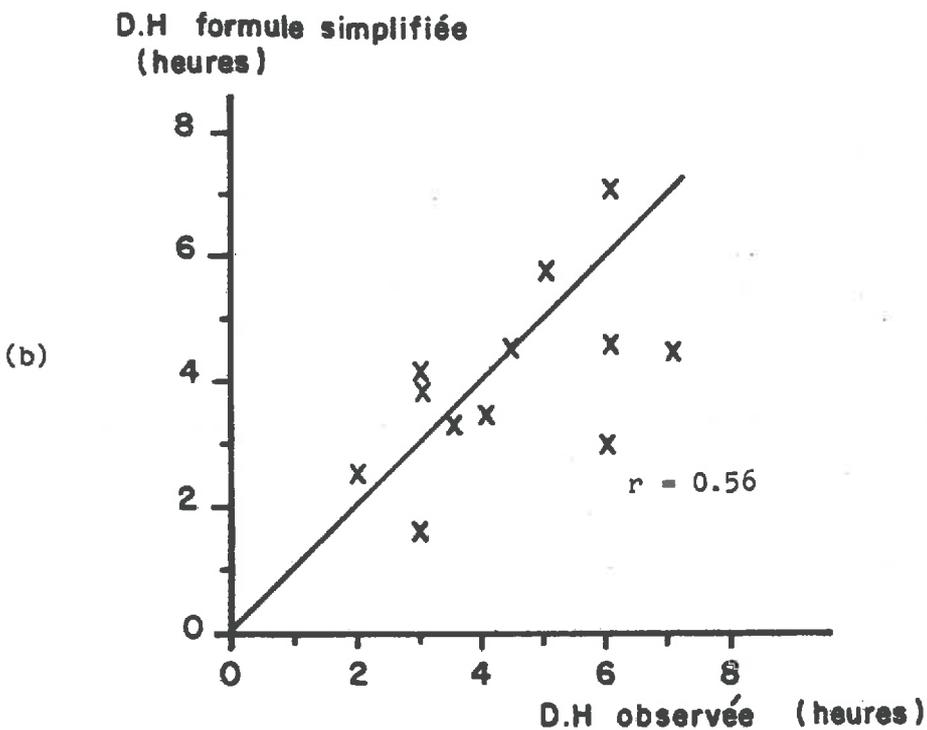
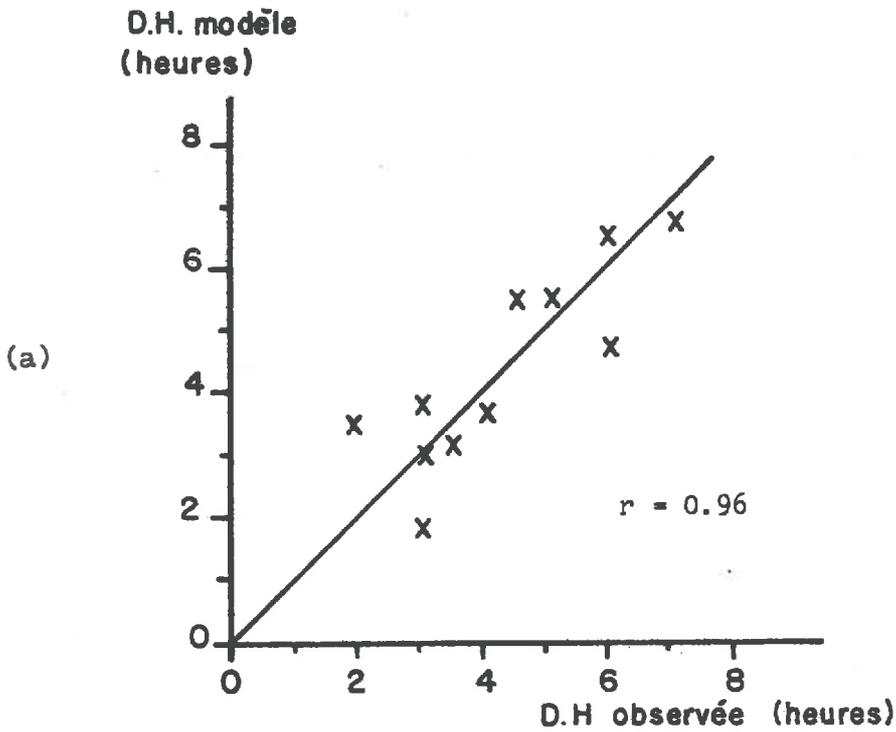


Fig. 47 a & b - Comparaison entre valeurs mesurées de durées d'humectation de la strate inférieure du couvert et valeurs calculées (a) par le modèle ; (b) par la formule simplifiée

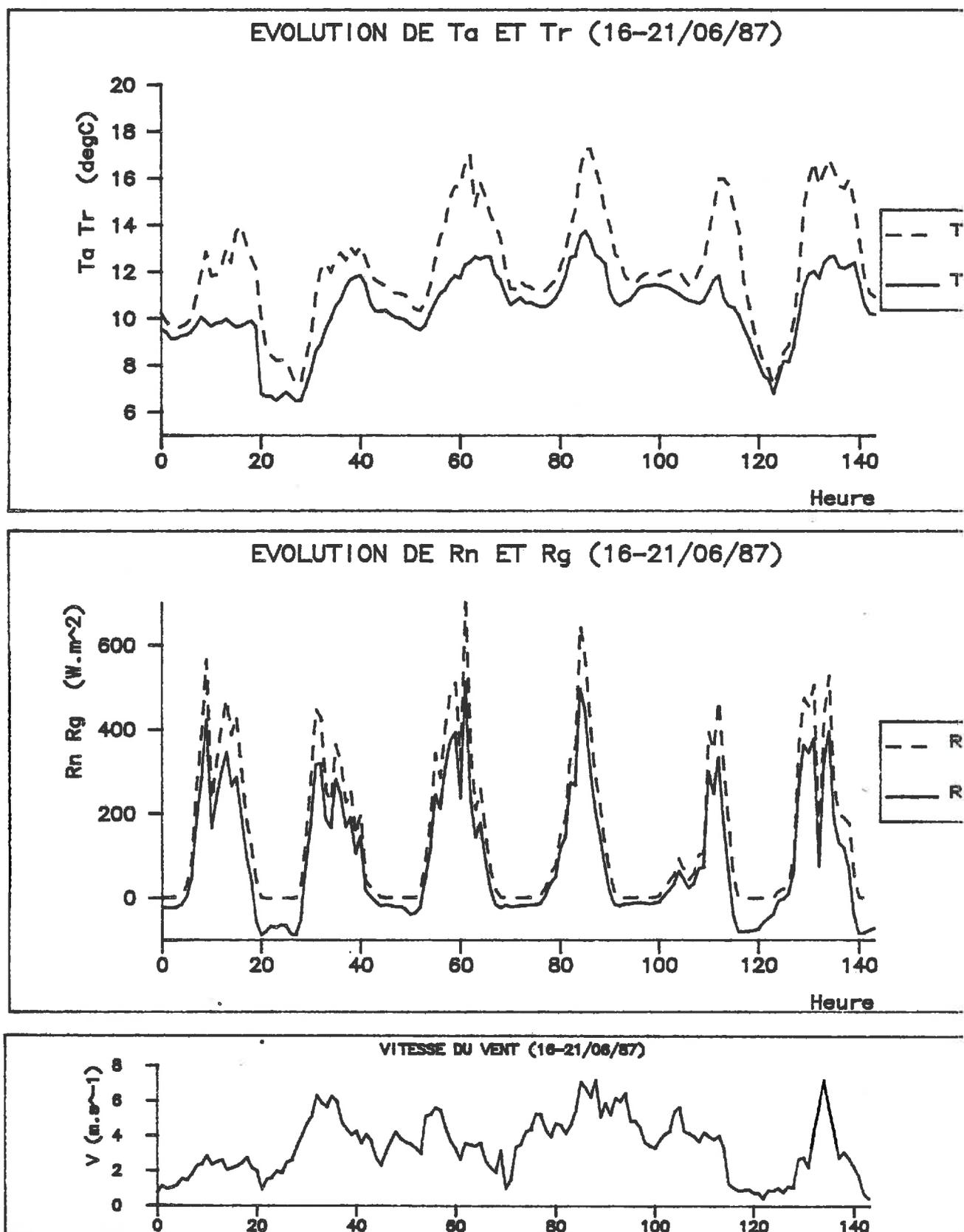


Fig. 48 - Evolution des différentes variables de forçage au cours de la période pluvieuse du 16 au 21 Juin 1987 (variables enregistrées à 2 m au parc météorologique)

cette formule simplifiée n'a de valeur que pour des durées courtes après une pluie, et dans le cas précis de la féverole. Dès que l'on doit prendre en compte une pluie précédant de peu la nuit, cette formulation perd toute valeur. Par ailleurs, rappelons que les mesures utilisées sont relatives à un mouillage artificiel du couvert et donc que l'on est en droit de les prendre avec précaution, en raison des phénomènes d'advection non pris en compte dans la modélisation.

II - EXTENSION DU MODELE SUR UNE SEQUENCE DE PLUSIEURS JOURS EN CONDITIONS NATURELLES

La période du 16 au 21 Juin 1987 présente une occasion favorable d'application du modèle dans la recherche des longues durées d'humectation. En effet, on recense sur cette période 4 épisodes pluvieux plus ou moins discontinus présentant des hauteurs de précipitation variant entre 0,1 et 3 mm par heure.

Les données d'entrée T_a , T_r , R_n , R_g , V (à 2 m au parc météorologique) ainsi que les hauteurs de pluie obtenues par dépouillement de l'enregistrement du pluviographe sont connues heure par heure (cf fig. n° 48) sur six jours, on a une hauteur totale de pluie de 27 mm (incrément minimal : 0,1 mm).

La figure n° 49 montre l'évolution de la durée d'humectation calculée pour un couvert de féverole dont le LAI varie de 0,6 (1 strate) à 6,4 (7 strates) et la hauteur de 0,2 à 1,4 m.

Les simulations sont effectuées avec les paramètres suivants :

- $C_{max} = 0,07$ mm
- $W_0 = 0,95$ (valeur constante pendant tout le temps où la strate est mouillée)
- $\beta = 0$ (film de surface constante)

Afin de répartir la pluie sur les différentes strates, on définit deux fonctions F et G :

$$- F \text{ telle que } F(i,j) = \sum_{q=i}^{q=j} F(q) \text{ pour } j > i$$

autrement dit $F(i,j)$ est la somme cumulée des indices foliaires des strates i à j comprise ; par convention, $F(i,i) = 0$

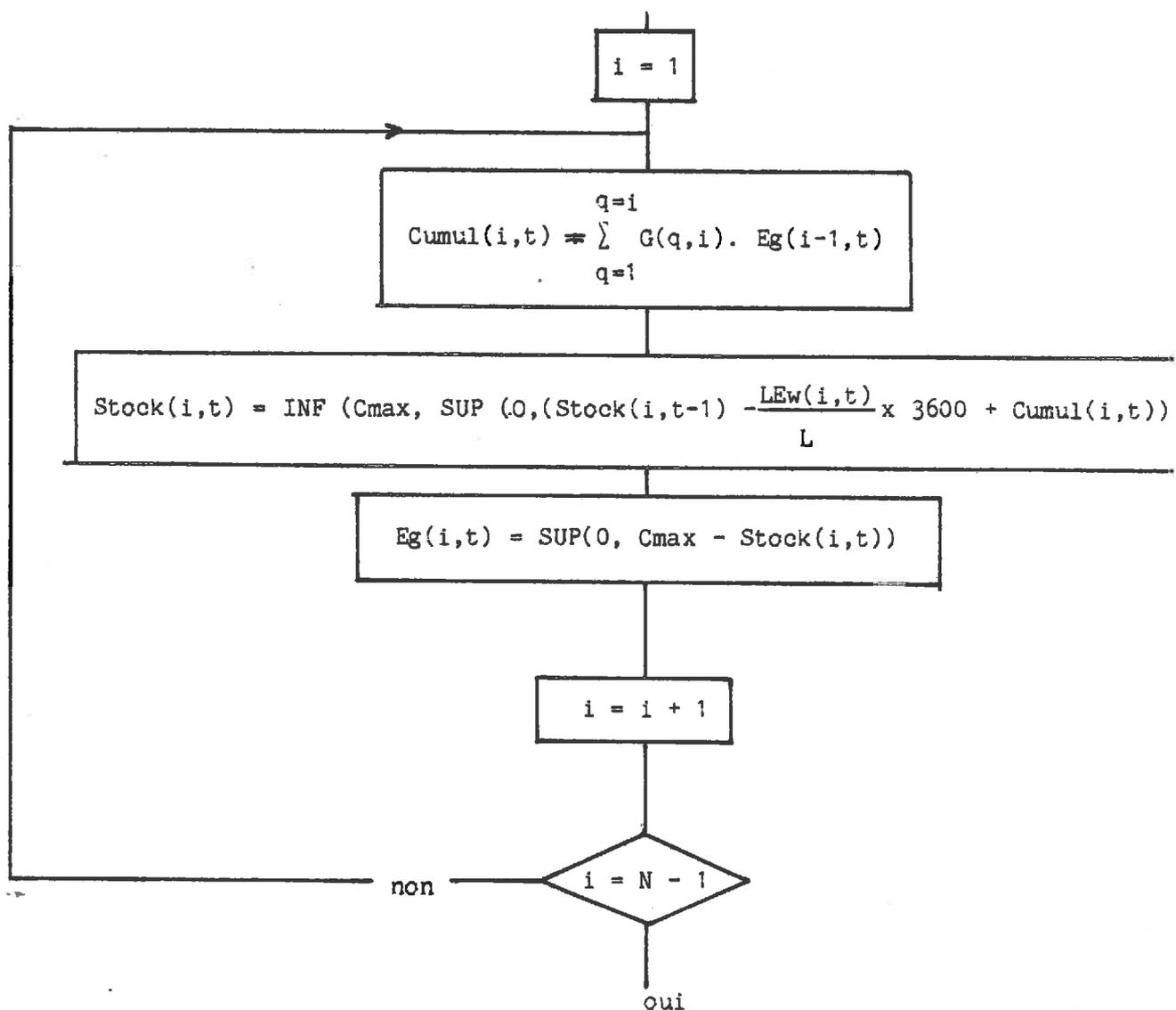
- G telle que $G(i,j) = \text{EXP}(-0,5 \times F(i,j-1)) - \text{EXP}(-0,5 \times F(i,j))$ pour $j > i$

$G(i,j)$ désigne la fraction de l'égouttement de la strate i retenue par strate j , conformément aux propositions de RUTTER & MORTON, 1977.

Sur chaque pas de temps et dans chaque strate du couvert, on quantifie les différents termes suivants :

- $Eg(i,t)$: hauteur de précipitation s'égouttant de la strate ($Eg(0,t) = Pb(t)$)
- $Stock(i,t)$: hauteur de la lame d'eau dans la strate i à la fin du pas temps t
- $Cumul(i,t)$: hauteur de précipitation incidente dans la strate i

Par récurrence sur i , on calcule les termes dans la subroutine STC suivante :



La durée d'humectation des couches basses est considérablement allongée dès lors que le couvert est assez haut (fig. 49) ; on passe en effet de 7 périodes d'humectation distinctes dans le cas d'un couvert de 40 cm de hauteur à une seule période continue pour la couche inférieure lorsque la hauteur du couvert est de 1,4 m. Notons que cela est sans doute quelque peu exagéré, d'autant plus que la strate inférieure est souvent sénescente et d'un intérêt limité dans le développement de la maladie. Pour la strate 20-40 cm, on passe de 9 périodes d'humectation à 5, tandis que la strate supérieure connaît 9 périodes d'humectation quelque soit le LAI.

Dans le cas de la deuxième période pluvieuse (0,1 mm le 18/06 à 4 hTU), la hauteur de précipitation est faible et quelle que soit la hauteur du couvert, la strate inférieure est sèche au bout de 2 heures ; cela tient au fait que la répartition d'une lame d'eau de 0,1 mm remplit principalement les strates supérieures qui, par ailleurs, reçoivent la majeure partie de l'énergie et donc sèchent rapidement tandis que les strates inférieures dont le stock d'eau est resté peu important sèchent au bout d'une même durée.

Les très longues durées d'humectation se rencontrent donc dans le bas d'un couvert bien couvrant après une pluie saturant le couvert (au moins 0,1mm x LAI) et à condition que la pluie intervienne peu de temps avant la nuit.

Il est évident que le mode de répartition de l'eau sur le profil d'indice foliaire joue un rôle important : les strates basses du couvert peuvent être sèches avant les strates supérieures comme c'est le cas consécutivement à une faible pluie ou à une rosée d'intensité moyenne.

- G -

CONCLUSIONS

On donne sur la figure n° 50 une représentation de l'organigramme du modèle dans son utilisation en routine ; le modèle doit aboutir à la constitution d'un fichier recensant les périodes d'humectation supérieures aux durées critiques définies par les pathologistes (fichier ALERTE). Toutefois il faut insister sur le fait qu'il peut exister des périodes de rosée succédant à une pluie en soirée, ou des périodes pluvieuses après une nuit pendant laquelle le déficit radiatif a été assez important pour provoquer une condensation de vapeur d'eau sur le couvert. Ceci complique l'analyse effectuée jusqu'à présent, et dans la perspective d'appréhender l'ensemble des situations, il faut raisonner en utilisant plusieurs méthodes distinctes et complémentaires :

- Cas des rosées

Ce phénomène est délicat à appréhender et est resté en dehors de notre champ d'étude, mais il est évident qu'une modélisation complète de la durée d'humectation doit le prendre en considération. Certains auteurs (GILLESPIE & BARR, 1983) proposent des solutions simples pour une feuille située à la borne supérieure du couvert en considérant les deux cas d'une feuille exposée ou non au rayonnement solaire pour lesquels la résolution du bilan d'énergie à partir des données météorologiques standard (T_a , T_r , V , couverture nuageuse) fournit une valeur calculée de durée d'humectation avec une erreur moyenne d'environ une heure par rapport à la valeur observée.

Pour intégrer la rosée au modèle proposé, il faudrait tout d'abord estimer la résistance aérodynamique en situation de stabilité verticale dans la CLS ; par ailleurs, le calcul du profil de diffusivité et des coefficients d'échange devient problématique aux très faibles vitesses de vent. La partition du rayonnement net négatif n'obéit pas forcément à la même loi que lorsque celui-ci est positif. Il s'ensuit qu'une estimation de la durée de rosée basée sur une méthode du type de celle proposée par PEDRO & GILLESPIE (1982) peut constituer un bon compromis sachant que ce type de précipitation affecte principalement les strates supérieures du couvert. En considérant le bilan d'énergie de deux feuilles du sommet du couvert exposée ou non au rayonnement solaire, on est à peu près certain d'encadrer correctement les valeurs minimale et maximale de la durée de rosée.

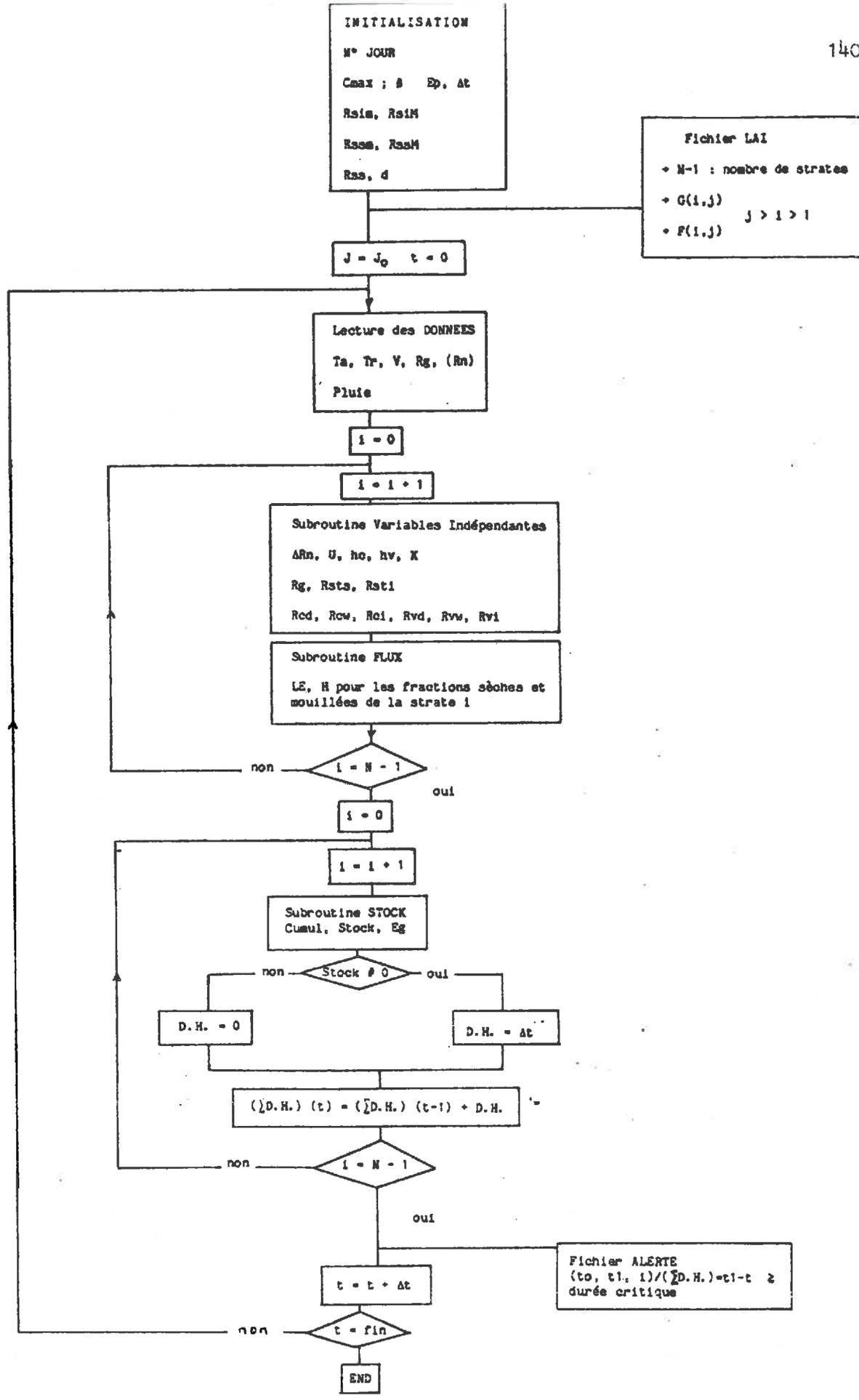


Fig. 50 - Organigramme général du modèle dans son utilisation en routine

- Cas de la pluie

Le modèle que nous avons proposé fournit un bon outil d'estimation de la durée d'humectation consécutive à une pluie ; il nécessite comme variables d'entrée les données météorologiques standard : T_a , T_r , V , R_g , Pluie. Insistons sur le fait qu'une description la plus précise possible de la pluie est nécessaire. Par ailleurs, une information suffisante sur la description du couvert (hauteur, profil de densité de surface foliaire) est indispensable. Le contrôle du modèle est globalement satisfaisant pour un couvert de féverole dans le cas duquel l'eau libre est déposée sous forme d'un film quasi-continu. Nous avons montré comment on pouvait simplement prendre en compte le mode d'évaporation de l'eau interceptée, mais dans une utilisation récurrente du modèle sur une période de plusieurs jours, on est amené à considérer que la répartition de la pluie se fait sous forme d'une lame d'eau continue distribuée sur le couvert constitué d'un ensemble de strates horizontales dont on gère le stock d'eau interceptée en fonction des entrées (Pluie) et sorties (évaporation). Les tests du modèle ont été effectués sur un pas de temps d'un quart d'heure, mais son utilisation en routine est envisageable sur un pas de temps horaire sachant que c'est le pas retenu au niveau des stations agrométéorologiques et que la connaissance des pathologistes quant aux durées d'humectation critiques n'est jamais d'une précision supérieure à l'heure. En revanche, les données trihoraires de réseau fournissent une description insuffisante de l'évolution des caractéristiques microclimatiques.

Au terme de ce travail, il faut en envisager les perspectives :

- il est nécessaire de faire tourner le modèle sur différentes cultures, en particulier les céréales pour lesquelles la structure superficielle des feuilles entraîne une répartition en gouttes afin de contrôler dans ce cas l'intérêt de la schématisation proposée de l'évaporation.
- les conclusions de l'utilisation des capteurs conduisent à penser qu'on ne peut concevoir de les employer seuls ; les capteurs présentant un véritable intérêt en tant qu'indicateur de durée de précipitation. Placés à l'extérieur du couvert deux capteurs d'humectation, dont l'un est équipé d'une résistance chauffante permettent de distinguer les durées de rosée des durées de pluie.

Tableau n° 7 - Modélisations de la durée d'humectation à l'échelle d'un organe végétal et modèles d'évapotranspiration d'une surface simple

AUTEURS	Type d'organe	Mode de dépôt de l'eau	Situation	Caractéristiques	Intérêts	Limites
WESTERMAN & al (I, IV) (1976)	Feuille de concombre	Gouttes hémisphériques ou film d'épaisseur ou de surface constante	Labo ("wind tunnel")	Analyse de sensibilité au mode de dépôt de l'eau	Conduction thermique goutte-feuille	Laboratoire
MONTEITH & BUTLER (1979) BUTLER (1980)	Cousses de concombre	Film d'épaisseur variable	Rooftop	Avec données micrométéorologiques ou du parc météo.	Inertie thermique de la gousse	Espoil de relations statistiques
PEDRO & GILLESPIE (1982, 1983) GILLESPIE & BARR (1984)	Feuille (pompier, maïs, soja, céramon)	Film d'épaisseur variable	Rooftop	Feuille du sommet du couvert dans deux cas : - feuilles exposées au RG - feuilles à l'ombre	Bonnes adéquations modèles-mesures	2 valeurs de DH pour l'ensemble du couvert
PAYEN (1983)	Capitule de tournesol	Film d'épaisseur variable	Plats et rooftop	Tiré de FERRIER (1975) (III)	Longues durées à relier à la situation météorologique	Problème pour les courtes durées d'humectation
LECLERC & al (1985)	Feuille artificielle de soja	Gouttes de diamètre uniforme	Laboratoire	Gouttes - cylindres	Bonne concordance entre modèles et mesures	On suppose $Rn = 0$
BRAIN & BUTLER (1985)	Feuille de blé	Distribution log-normale de gouttes	Simulation	Clinique de : - volume total d'eau - nombre de gouttes - volume moyen des gouttes	Evaporation d'une population de gouttes	Taux constant d'évaporation par unité de surface des gouttes

Modèles ORGANE (bilan d'énergie)

AUTEURS	Nombre de strates	Surface	Caractéristiques	Intérêts	Limites
DALTON (1802)	1	Surface à saturation	$ETP = f(U) [Pa(T) - pa]$	Historique	eau libre
PENMAN (1948)	1	Surface à saturation	1 résistance aérodynamique R_a	Loi d'Ohm	eau libre
PENMAN (1953)	1	Surface à saturation	1 résistance aérodynamique R_a + frein à l'évaporation R_v	Formule de PENMAN-MONTEITH	Régulation stomatique
MONTEITH (1965)	1	Couvert végétal - plan de cote (D + Z0)	1 résistance aérodynamique R_a entre D+Z0 et href 1 résistance stomatique globale R_s	Approche du couvert végétal	Résistance stomatique globale
PERRIER (1975)	1	Couvert végétal avec 3 résistances	1 résistance aérodynamique R_a entre R_0 et href 1 résistance stomatique R_s et 1 résistance de structure R_0	Frein dû à la structure du couvert	
BUTLERWORTH	2	Couvert peu dense	1 résistance R_a entre R_0 et href	Calcul d'une durée	

Modèles multicouche ou pl-couche

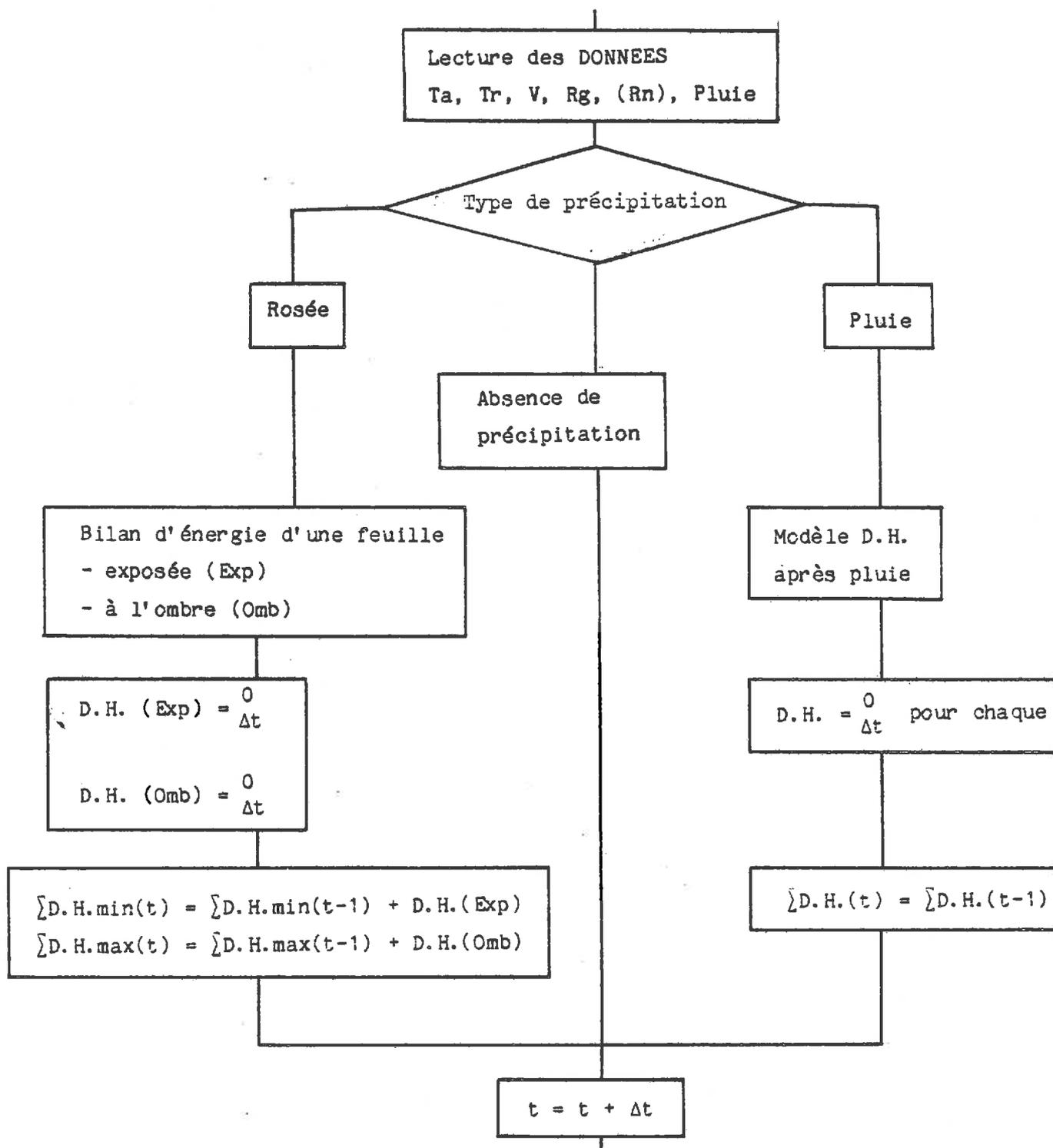


Fig. 51 - Proposition d'organigramme complet de calcul du profil de durée d'humectation d'un couvert végétal

On peut ainsi conforter la prévision de durée d'humectation obtenue par modélisation, mais il faut garder à l'esprit qu'une très forte variabilité affecte l'information des capteurs et que l'on devra privilégier les résultats du modèle.

En conclusion, on propose logiquement l'organigramme complet (Fig. 51) d'un modèle de prévision de la durée d'humectation d'un couvert végétal. Les périodes pluvieuses contigües d'une période de rosée sont détectées sans difficulté et les durées d'humectation calculées simplement ; par contre, une rosée intervenant sur un couvert préalablement humecté par la pluie entraîne une durée d'humectation dont le calcul sera relativement incertain ; c'est là le seul point faible de la méthodologie proposée, mais notons que ce type de situation reste relativement peu fréquent, voire rare.

Les tableaux n° 7 et 8 situent le modèle proposé par rapport à l'ensemble des modèles de transferts de masse et d'énergie au niveau des organes ou couverts végétaux. Le tableau n° 7 est relatif à un organe végétal (feuillee ou fruit) avec une présentation exhaustive des modèles de durée de rosée ou durée d'humectation consécutive à une pluie ou une rosée. Sont également rappelées pour mémoire les approches unicouches de l'évapotranspiration d'une surface d'eau libre ou d'un couvert végétal. Le modèle de SHUTTLEWORTH (1985) ou celui de CHEN (avec une seule strate pour le couvert) peuvent fournir un outil de calcul de la DH si l'on désire une seule valeur pour l'ensemble du couvert. Le tableau n° 8 présente une liste non exhaustive des modèles multi-couches de transferts de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux qui sont à l'origine des différentes modélisations existantes du profil de l'état d'humectation du couvert en fonction du temps.

Au sein de l'ensemble des modélisations de la DH au niveau du couvert, notre travail apporte une contribution importante en matière de confrontation par rapport à l'expérimentation. En utilisant la méthode de CHEN (1984) pour le calcul itératif des flux de chaleur et de vapeur, on se dégage des méthodes lourdes de résolution d'équations différentielles (modèle continu) ou de résolution matricielle.

A condition de mettre au point une méthode d'estimation des durées de rosée, la modélisation présentée peut être considérée comme un sous-modèle intervenant dans la simulation des épidémies et donc pour une meilleure rationalisation des avertissements de traitements fongicides dans le cadre de la lutte intégrée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- A'BROOK J. - 1983 - Forecasting the incidence of aphids using weather data.
Bull. O.E.P.P., 13 (2), 229-233.
- AUST H.J. - 1973 - On the variability of germination, infection, incubation and latent period of barley powdery mildew *Erysiphe graminis* DC f. sp. hordei Marchal.
Ph. D Thesis Ciessen University : 1-110.
- AVISSAR R., AVISSAR P., MAHRER Y., BRAVDO B.A. - 1985 - A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions.
Agric. For. Meteorol., 34, 21-29.
- BACHELARD S. - 1979 - Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles.
In : "Elaboration et justification des modèles. Applications en biologie", Colloque CNRS-CEA-ENS-IHES, Tome 1, Collection Recherches interdisciplinaires.
- BARTHAKUR N.N. - 1985 - A comparative study of radiometric and electronic leaf wetness sensors.
Agric. For. Meteorol., 36, 83-90.
- BRAIN P., BUTLER D.R. - 1985 - A model of drop size distribution for a system with evaporation.
Plant, cell and environ., 8, 247-252.
- BUNNENBERG L., KUHN W. - 1977 - Application of the β -absorption method to measure dew on soil and plant surfaces.
Int. J. Applied Radiation and Isotopes, 28, 751-754.
- BURKE D.W., MILLER D.E. - 1980 - Effect of amount and frequency of sprinkler irrigation on incidence of white mold among dry bean cultivars.
Ann. Rep. Bean Improv. Coop, 23, 65-66.
- BUTLER D.R. - 1980 - Dew and thermal log : measurements and an estimate of wetness duration on cocoa pods.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 106, 539-550.
- BUTLER D.R. - 1985 - The energy balance of water drops on a leaf surface.
Bound. Layer Meteorol., 32, 337-349.
- BUTLER D.R. - 1986 - Evaporation from rain drops on leaves in a cereal canopy : a simulation model.
Bound. Layer Meteorol., 36, 39-51.
- BUTLER D.R., HUBAND N.D.S. - 1985 - Throughfall and stemflow in wheat.
Agric. For. Meteorol., 35, 329-338.
- CELLIER P. - 1986 - On the validity of flux-gradient relationships above very rough surfaces.
Boundary Layer Meteorol., 36, 417-420.
- CHASE A.R. - 1982 - Influence of irrigation method on severity of selected fungal leaf spots of foliage plants.
Plant disease, 66, 673-674.

- CHASSAGNEUX P., CHOISNEL E. - 1986 - Modelisation de l'evaporation globale d'un couvert forestier. I - Principes physiques et description du modèle. Ann. Sci. For., 43 (4), 505-520.
- CHEN J. - 1981 - Uncoupled multi-layer model for the transfer of sensible and latent heat flux densities from vegetation. Bound. Layer Meteorol., 28, 213-228.
- CHEN J. - 1984 - Mathematical analysis and simulation of crop micrometeorology. Thesis, Wageningen, 116 p.
- CLARKE J.A., WIGLEY G. - 1975 - Heat and mass transfer from real and model leaves. In : "Heat and mass transfer in the biosphere", part I, de VRIES D.A. AFGAN N.H. ed., 413-422.
- COUTURIER D.E., RIPLEY E.A. - 1973 - Rainfall interception in mixed grass prairie. Can. J. Plant Sci., 53, 659-666.
- COWAN I.R. - 1968 - Mass, heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment. Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 94, 523-544.
- CURE B. - 1985 - Prévision du développement des maladies et aide à la décision. Phytoma, Défense des cultures, Sept.-Oct. 1985, 13-15.
- DALTON J. - 1802 - Experimental essays on the constitution of mixed gases on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in Toricellian vacuum and in air ; on evaporation and the expansion of gases by heat. Mem. Manchester Lit. and Phil. Soc., 5, 535-602.
- DENMEAD O.T. - 1976 - Temperate cereals. In : "Vegetation and the atmosphere" Vol. II, J.L. Monteith ed., Academic Press London, 1-31.
- DONALDSON C. du P. - 1973 - Construction of a dynamic model of the production of atmospheric turbulence and the dispersal of atmospheric pollutants. Workshop on micrometeorology, Amer. Meteorol. Soc., 313-392.
- FASHEUN A., DENNETT M.D. - 1982 - Interception of radiation and growth efficiency in field beans (*Vicia faba* L.). Agric. Meteorol., 26, 221-229
- FINNIGAN J.J. - 1979a - Turbulence in waving wheat. I - Mean statistics of honami. Boundary Layer Meteorol., 16, 181-211.
- FOGG L.E. - 1947 - Quantitative studies on the wetting of leaves by water. Proc. Roy. Soc. B, 134, 503-522.
- FURNIVAL G.M., WAGGONER P.E., REIFSNYDER W.E. - 1975 - Computing the energy budget of a leaf canopy with matrix algebra and numerical integration. Agric. Meteorol., 14, 405-416.

- GASH J.M.C. - 1979 - An analytical model of rainfall interception by forests. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 105, 43-55.
- GILLESPIE T.J., KIDD G.E. - 1978 - Sensing duration of leaf moisture retention using electrical impedance grids. Can. J. Plant Sci., 58, 179-187.
- GILLESPIE T.J., BARR A. - 1984 - Adaptation of a dew estimation scheme to a new crop and site. Agric. For. Meteorol., 31, 289-295.
- GILLESPIE T.J., DUAN R.X. - 1987 - A comparison of cylindrical and flat plate sensors for surface wetness duration. Agric. Forest Meteorol., 40, 61-70.
- GOUDRIAAN J. - 1977 - Crop micrometeorology : a simulation study. Simulation monographs, Pudoc, Wageningen, 249 p.
- GRANT D.R. - 1975 - Comparison of evaporation from barley with Penman estimate. Agric. Meteorol., 15, 49-60.
- GREGORY PH. - 1961 - Microbiology of the atmosphere. Interscience Publ. New York, 377 p.
- HACKEL H. - 1974 - Eine elektrische Methode zur Messung der Blattbenetzungsdauer unmittelbar am Blatt. Agric. Meteorol., 13 (1), 91-103.
- HACKEL H. - 1978 - Über Verbesserungen an der elektrischen Methode zur Messung der Benetzungsdauer unmittelbar an der Pflanze. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 85 (11), 651-656.
- HACKEL H. - 1984 - Zur Messung der Benetzungsdauer von Pflanzen : Verfahren und Ergebnisse. Meteorol. Rdsch., 37, 97-104.
- HALLAIRE M., RAPILLY F., PAUVERT P. - 1969 - Effets de l'irrigation sous ses différents modes sur la biologie, l'étiologie et l'épidémiologie des plantes. Deuxième congrès de l'Union Phytopathologique Méditerranéenne, Avignon-Antibes (France), 21-27 Septembre 1969.
- HAU B., AUST H.J., KRANZ J. - 1983 - Problems in modeling powdery mildew epidemics. Bull. O.E.P.P., 13 (2), 259-262.
- HIRST J.M., STEDMANN O.J. - 1963 - Dry liberation of fungus spores by raindrops. J. Gen. Microbiology, 5, 335-344.
- HUBAND N.D.S., BUTLER D.R. - 1984 - A comparison of wetness sensors for use with computer or microprocessor systems designed for disease forecasting. Proc. British crop protection conference "Pests and diseases", vol. II, 633-638.
- HUBER L. - 1983 - Etude qualitative et quantitative de l'humectation d'une feuille en conditions de laboratoire. Mémoire de DEA, Université Paris-Sud, 45 p.

- IMPENS I., LEMEUR R. - 1969 - Extinction of net radiation in different crop canopies.
Arch. Met. Geoph. Biokl., ser. B, 17, 403-412.
- ITIER B. - 1979 - Modélisation de transports horizontaux (spores, pollen).
Bull. O.E.P.P., 9 (3), 251-264.
- JONES F.G.W. - 1983 - Weather and plant parasitic nematodes.
Bull. O.E.P.P., 13 (2), 103-110.
- JONES R.L. - 1957 - The effect of surface wetting on the transpiration of leaves.
Physiol. Plant., 10, 281-288.
- JONGERIUS - 1954 - Les sols du domaine de La Minière.
Ann. Agron., VI, 1961
- KASSAM A.M. - 1973 - The influence of light and water deficit upon diffusion resistance leaves of *Vicia faba*.
New Phytol., 72, 557-570.
- KRANZ J. - 1973 - EPIVEN ein Simulator für Apfelschorf.
Z. Pflkrankh. Pflpath. PflSchutz, 80, 181-187.
- KRANZ J. - 1985 - Die Epidemiologie der Pflanzenkrankheiten.
Naturwissenschaften, 72, 419-426.
- LAMARQUE C. - 1983 - Conditions climatiques nécessaires à la contamination du tournesol par *Sclerotinia sclerotiorum* ; prévision des épidémies locales.
Bull. O.E.P.P., 13 (2), 75-78.
- LANDSBERG J.J., JAMES G.B. - 1971 - Wind profiles in plant canopies : study on an analytical model.
J. Appl. Ecol., 8, 729-741.
- LANDSBERG J.J., THOM A.S. - 1971 - Aerodynamic properties of a plant canopy complex structure.
Quart. J. Royal Meteorol. Soc., 97, 565-570.
- LEACH C.M., ANDERSON A.J. - 1982 - Radiation quality and plant diseases.
In : "Biometeorology in integrated pest management", HATFIELD J.L., THOMAS I.J. ed., 267-306.
- LECLERC M.Y., THURTELL G.W., GILLESPIE T.J. - 1985 - Laboratory simulation of evaporation of water droplets on artificial soybean leaves.
Agric. For. Meteorol., 36, 105-111.
- LEPAPE A. - 1981 - Approche micrométéorologique de l'humectation d'un couvert végétal.
Ecole nationale de la Météorologie, mémoire, 97 p.
- LEMON E., STEWART D.W., SHAWCROFT R.W. - 1971 - The sun's work in a cornfield.
Science, 174, 371-378.
- LEYTON L., REYNOLDS E.R.C., THOMPSON F.B. - 1967 - Rainfall interception in forest and moorland.
In : "Forest hydrology", Soper W.E., Lull H.W. ed., Pergamon Press, Oxford, 163-168.

- LHOMME J.P., KATERJI N. - à paraître - Modélisation du transfert de vapeur d'eau et de chaleur entre la végétation et l'atmosphère.
Séminaire ATP EAU, 10-11 Septembre 1985, Paris, 16 p.
- LI Z.J., MILLER D.R., LIN D.J. - 1985 - A first order closure schema to describe counter gradient momentum transport in plant canopies.
Boundary Layer Meteorol., 33, 77-83.
- LOMAS J., SHASHOUA Y. - 1970 - The performance of three types of leaf wetness recorders.
Agric. Meteorol., 7 (2), 159-166.
- MCCARTNEY H.A., BAINBRIDGE A., AYLOR D.E. - 1983 - The importance of wind gusts in distributing fungal spores among crop foliage.
Bull. O.E.P.P., 13 (2), 133-137.
- MERRIAM R.A. - 1961 - Surface water storage on annual Rye grass.
J. Geophysical Research, 66 (6), 1833-1838.
- MEYERS T. - 1985 - A simulation of the microenvironment using higher order closure principles.
Ph. D. Thesis, Purdue Univ., 153 p.
- MINTAH C.N. - 1977 - A numerical model to estimate leaf wetness duration.
Thesis University of Guelph, 110 p.
- MONTEITH J.L. - 1965 - Evaporation and environment.
In : "The state and movement of water in living organisms", Symp. of the Soc. for Exp. Biol., XIX, 205-234, Univ. Press, Cambridge (UK)
- MONTEITH J.L. - 1973 - Principles of environmental physics.
London Edward Arnold, 241 p.
- MONTEITH J.L. - 1975 - Vegetation and the atmosphere. Vol. I. Academic Press, 273 p.
- MONTEITH J.L. - 1977 - Resistance of a partially wet canopy : whose equation fails ?
Agric. Meteorol., 12, 379-383.
- MONTEITH J.L., BUTLER D.R. - 1979 - Dew and thermal lag : a model for cocoa pods.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 105, 207-215.
- MONTEITH J.L. - 1981 - Evaporation and surface temperature.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 107, 1-27.
- MONTEITH J.L. - 1985 - Evaporation from land surfaces : progresses in analysis and prediction since 1948.
In : "Advances in evapotranspiration", proceedings of the national conference on advances in evapotranspiration, Chicago (USA) 16-17 décembre 1985, 4-12.
- NOFFSINGER T.L. - 1965 - Survey of techniques for measuring dew.
In : "Humidity and moisture measurement and control in science and industry" Vol. 2, Wexler A. ed., Reinhold Publ. corp. New York, 523-531.
- NORMAN J.M. - 1979 - Modeling the complete crop canopy.
In : "Modification of the aerial environment of crops", Hatfield B. & Gerber J. ed, Am. Soc. Agric. Eng. Monograph n° 2, ASAE, St Joseph, Michigan (USA), 249-277.

- NORMAN J.M. - 1982 - In : "Biometeorology in integrated pest management", Hatfield & I. Thomason ed., 65-69, Academic Press, New-York.
- NORMAN J.M., CAMPBELL G. - 1983 - Application of a plant environment model problems in irrigation.
In : "Advances in irrigation", vol. 2, HILLEL D. ed. 155-189.
- OLIVIER J.M., LAMBERT C., LEFEUVRE M. - 1983 - Application thermohumectographe KIT-INRA. Etude des risques de tavelure du pommier l'échelle du Maine-et-Loire (France).
Bull. OEPP, 13 (2), 47-56.
- PAUVERT P. - 1986 - Les paramètres épidémiologiques de l'oïdium de l'Orge.
Thèse Doctorat, Université Paris VI, 127 p.
- PAYEN D. - 1983 - Modélisation de l'épidémiologie de Sclerotinia sclerotiorum sur Tournesol.
Bull. O.E.P.P., 13 (2), 272-281.
- PEARMAN G.I., WEANER H.L., TANNER C.B. - 1972 - Boundary layer heat transfer coefficients under field conditions.
Agric. Meteorol., 10, 83-92.
- PEDRO M.J., GILLESPIE T.J. - 1982 - Estimating dew duration. I - Utilization of micrometeorological data.
Agric. Meteorol., 25, 283-296.
- PEDRO M.J., GILLESPIE T.J. - 1982 - Estimating dew duration. II - Utilization of standard weather station data.
Agric. Meteorol., 25, 297-310.
- PENMAN H.L. - 1948 - Natural evaporation from open water, bare soil and grass.
Proc. B. Soc. A, 199, 120-145.
- PENMAN H.L. - 1953 - The physical bases of irrigation control.
Rep. 13th Int. Hort. Cong., 2, 913-923.
- PERRIER A. - 1975 - Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles : III - Evapotranspiration réelle et potentielle des couvertures végétaux.
Ann. Agron., 26 (3), 229-243.
- PERRIER A. - 1975 - Methods of observation of heat and mass transfer in the lower atmosphere and in plant canopies.
In : "Heat and mass transfer in the biosphere. Part I : transfer processes in the plant environment". Seminar, Dubrovnik, Aug. 1974, Intern. Cent. Heat and Mass transfer, DE VRIES D.A., AFGAN N.M. ed., Scripta Book Co., John Wiley & Sons (Washington D.C.) 229-249.
- PERRIER A. - 1976 - Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux.
Thèse Doc. Etat, Univ. Paris VI, 236 p.
- PERRIER A. - 1979 - Variation du microclimat d'une culture en fonction de ses caractéristiques biologiques.
Bull. O.E.P.P., 9 (3), 187-204.

- PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J.M., BLANCO DE PABLOS A. - 1975 - Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. Ann. Agron., 26 (1), 19-40.
- PHILIP J.R. - 1964 - Sources and transfer processes in the air layers occupied by vegetation. J. Applied Meteorol., 3 (4), 390-395.
- PINGUET A. - 1983 - Mesure de l'humectation : transformation d'un thermohygrographe en thermohumectographe et application à une station automatique agroclimatique. Bull. O.E.P.P., 13 (2), 43-45.
- PINTER P.J. - 1982 - Remote sensing of microclimatic stress. In : "Biometeorology in integrated pest management" HATFIELD J.L., THOMASON I. ed., Academic Press New York, 101-145.
- PINTER P.J. - 1986 - Effect of dew on canopy reflectance and temperature. Remote sensing of environment, 19, 187-205.
- RAPILLY F., JOLIVET E. - 1976 - Construction d'un modèle (EPISEPT) permettant la simulation d'une épidémie de Septoria nodorum Berk sur blé. Revue de Statistique Appliquée, XXIV (3), 31-60.
- RAPILLY F. - 1983 - Effets de quelques facteurs physiques du climat sur diverses séquences épidémiques. Bull. O.E.P.P., 13 (2), 63-68.
- RAUPACH M.R. - 1979 - Anomalies in flux-gradient relationships over forest. Boundary Layer Meteorol., 16 (4), 467-487.
- RAUPACH M.R., THOM A.S. - 1981 - Turbulence in and above plant canopies. Ann. Rev. Fluid Mech., 13, 97-129.
- ROTEM J. - 1978 - Climatic and weather influences on epidemics. In : "Plant disease" Vol. II, Horsfall J.G., Cowling E.B. ed. Academic Press, New York, 317-337.
- RUTTER A.J., KERSHAW K.A. - 1971 - A predictive model of rainfall interception in forest. I - Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. Agric. Meteorol., 9, 367-384.
- RUTTER A.J., MORTON A.J. - 1977 - A predictive model of rainfall interception in forest. III - Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. J. Applied Ecol., 14, 567-588.
- SAMIE C. - 1983 - Caractérisation climatique locale : micro/mésoclimats. Bull. O.E.P.P., 13 (2), 15-20.
- SHARMA M.L. - 1976 - Contribution of dew in the hydrologic balance of a semi-arid grassland. Agric. Meteorol. 17, 321-331.
- SHAW R.H. - 1977 - Secondary wind speed maxima inside plant canopies. J. Appl. Meteorol., 10, 423-453.
- SHAW R.H. - 1982 - Wind movement within canopies. In : "Biometeorology in integrated pest management", HATFIELD J.L., THOMASON I.J. ed., 17-41.

- SHAW R.H., WARD D.P., AYLOR D.E. - 1979 - Frequency of occurrence of gusts of wind inside a corn canopy.
J. Appl. Meteorol., 18, 167-171.
- SHUEPP P.H. - 1972 - Studies of forced convection heat and mass transfer fluttering realistic leaf models.
Bound. Layer Meteorol., 2, 263-274.
- SHUTTLEWORTH W.J. - 1976 - A one-dimensional theoretical description of the vegetation-atmosphere interaction.
Boundary Layer Meteorol., 10, 273-302.
- SHUTTLEWORTH W.J., WALLACE J.S. - 1985 - Evaporation from sparse crops - energy combination theory.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 111, 839-855.
- SOUCHAY P. - 1968 - Chimie physique. Thermodynamique chimique.
Masson ed.
- STARR J.R. - 1967 - Deposition of particulate matter by hydrometeors.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 93, 516-521.
- STEWART D.W., LEMON E - 1969 - The energy budget at the Earth's surface : simulation of net photosynthesis.
Interim report 69-3, Tech. Rep. ECOM 2-68, 1-6, Cornell Univ., Ithaca (N.Y.)
- STRIZYK S. - 1981 - Modèle d'état potentiel d'infection. Application à Plasmopara viticola.
Document ACTA Paris.
- STRIZYK S. - 1983 - Un modèle permettant d'apprécier le mouillage de l'humectographe BAZIER à partir de paramètres météorologiques simples.
Document ACTA Paris.
- TENG P.S. - 1985 - A comparison of simulation approaches to epidemic modeling.
Ann. Rev. Phytopathol., 23, 351-379.
- THOM A.S. - 1971 - Momentum absorption by vegetation.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 97, 414-428.
- THOM A.S. - 1972 - Momentum, mass and heat exchange of vegetation.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 98, 124-134.
- THOMPSON N. - 1981 - The duration of leaf wetness.
Meteorological Magazine, 110, 1-12.
- TOUZEAU J., PROJETTI F. - 1987 - Modélisation et avertissements agricoles.
In : "Modélisation et protection des cultures", Colloque ANPP Paris (à paraître)
- WAGGONER P.E., REIFSNYDER W.E. - 1968 - Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy.
J. Applied Meteorol., 7, 400-409.
- WAGGONER P.E. - 1978 - Computer simulation of epidemics.
In : "Plant disease", Vol II, Horsfall J.G., Cowling E.B. ed. Academic Press, New York, 203-222.

WALESMITH B.G. - 1983 - An inexpensive device for measuring net dewfall.
Weather; fev. 1983, 54-56.

WALLIN J.R. - 1967 - Agrometeorological aspects of dew.
Agric. Meteorol., 4, 85-102.

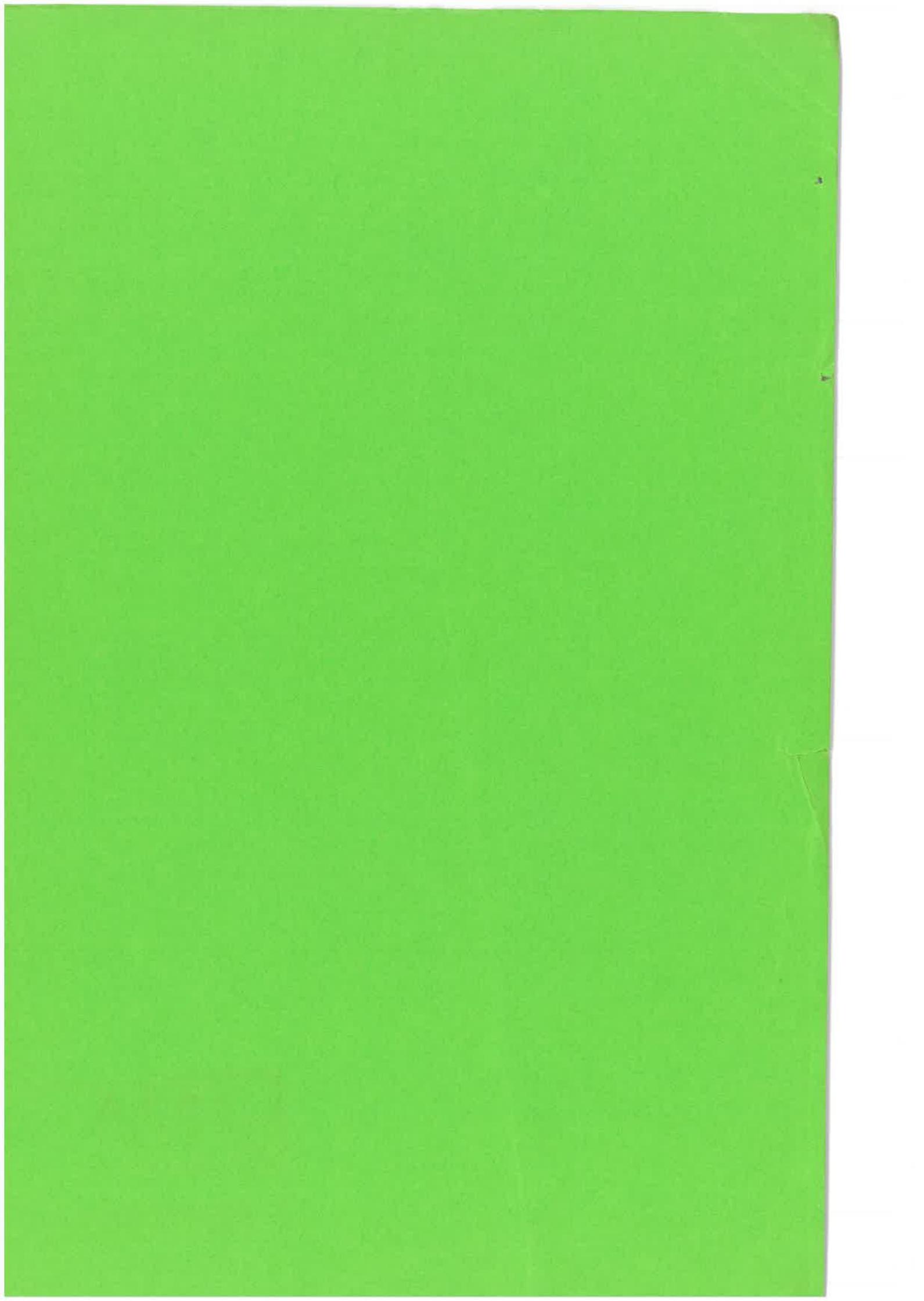
WEISS A., HIPPS L.E., BLAD B.L., STEADMAN J.R. - 1980 - Comparison of within canopy microclimate and white mold disease (*Sclerotinia sclerotiorum*) development in dry edible beans as influenced by canopy structure and irrigation.
Agric. Meteorol., 22, 11-21.

WEISS A., HAGEN F.A. - 1983 - Further experiments on the measurements of leaf wetness.
Agric. Meteorol., 29, 207-212.

WESTERMAN P.W., BARFIELD B.J., LOEWER O.J., WALKER J.N. - 1976 - Evaporative cooling of a partially-wet and transpiring leaf. I - Computer model and its evaluation using wind tunnel experiments.
Trans. of the ASAE, 19 (5), 881-888.

WESTERMAN P.W., BARFIELD B.J., LOEWER O.J., WALKER J.N. - 1976 - Evaporative cooling of partially-wet and transpiring leaf. II - Simulated effect of variations in environmental conditions, leaf properties, and surface water characteristics.
Trans. of the ASAE, 19 (5), 889-893.

WILSON N.R., SHAW R.H. - 1977 - Higher order closure model for canopy flow.
J. Applied Meteorol., 16, 1157-1205.



RESUME

Cette étude présente une méthode d'estimation de la durée d'humectation d'un couvert végétal après une pluie au moyen d'un modèle multi-couches de transfert de masse et d'énergie. La durée d'humectation, dont la mesure est délicate (maintenance des capteurs, représentativité spatiale de la mesure) joue un rôle déterminant sur la phase de contamination de l'hôte par de nombreux champignons phytopathogènes ; en effet, la réussite de la contamination est souvent conditionnée par la présence d'eau libre sur les organes végétaux pendant une durée minimale.

La hauteur d'eau interceptée par le couvert, le profil de densité de la surface foliaire sont les deux paramètres les plus importants pour simuler l'évolution du profil de l'état d'humectation du couvert. Un aspect original de l'étude consiste en la paramétrisation du mode de résorption de l'eau par les feuilles (à la suite d'essais en laboratoire) en termes de réduction de surface et d'épaisseur des zones mouillées.

Ce modèle est testé avec des données expérimentales obtenues au champ sur une culture de féverole (humectation artificielle du couvert par aspersion). Par temps humide et couvert, les durées d'humectation calculées peuvent atteindre 10 heures dans la partie inférieure de la culture, en accord avec la mesure. Si l'on dispose de données micrométéorologiques (variables de force du vent mesurées à une hauteur de référence au-dessus du couvert) de température de l'air, d'humidité relative, de vitesse du vent, de rayonnement global et de hauteur de précipitation, le modèle proposé permet de prévoir les variations spatio-temporelles de la durée d'humectation et constitue donc une méthode contribuant à la prévision des risques épidémiques et à l'élaboration d'avertissements agricoles.

MOTS-CLES : durée d'humectation, modèle multi-couches, prévision, couvert végétal, féverole, Vicia faba.

