

ORSAY

N° D'ORDRE: 3490

*Brochure
ORSTOM*

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
U.F.R. SCIENTIFIQUE D'ORSAY

THESE

Présentée

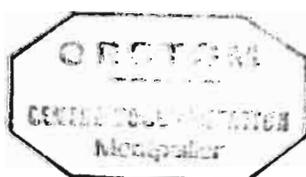
Pour obtenir

Le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES
DE L'UNIVERSITE PARIS XI ORSAY

Par

Moustapha AMADOU

Sujet: ANALYSE ET MODELISATION DE L'EVAPORATION-TRANSPIRATION
D'UNE CULTURE DE MIL EN REGION ARIDE SAHELIENNE.



Soutenu le 21 décembre 1994 devant la commission d'examen.

MM. Bernard SAUGIER	Président
Paul BERBIGIER	Rapporteur
Jean-François MAHFOUF	Rapporteur
Pierre CELLIER	Examineur
Emmanuel CHOISNEL	Examineur
Bruno MONTENY	Examineur

26 SEP. 1995

F 41829

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le résultat de 3 années de travail effectué à l'ORSTOM-Niamey, au laboratoire de bioclimatologie de Grignon (INRA), et à l'Institut National de Recherches Agronomiques du Niger (INRAN). Il s'agit d'une étude menée dans le cadre d'un "Contrat de Formation-Insertion" que l'ORSTOM propose aux jeunes chercheurs des institutions nationales de recherches des pays en voie de développement.

Ce travail ne serait pas réalisé sans l'aide bénévole de plusieurs responsables, c'est un plaisir pour moi de nommer:

Monsieur le Professeur Bernard SAUGIER, Responsable de la chaire d'Ecologie et Production Végétale de l'Université de Paris-sud, qui a bien voulu dirigé ce travail. Je lui exprime ma reconnaissance.

Monsieur Bruno MONTENY, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, qui m'a intégré au sein de son équipe, en m'initiant aux techniques de la bioclimatologie végétale. Il m'a assuré: le matériel de travail, l'encadrement technique, le soutien scientifique et moral, nécessaires au bon déroulement de mes travaux. Je lui exprime toute ma gratitude, ainsi qu'à tous les membres de l'équipe qu'il dirige.

Monsieur Pierre CELLIER, Directeur de Recherches à l'INRA, qui m'a accueilli dans son équipe du laboratoire de bioclimatologie de Grignon, où il m'a fait bénéficier de sa riche expérience en matière de modélisation. Je lui exprime ma reconnaissance pour cet appui scientifique et pour les rapports très amicaux que nous avons entretenus depuis le début de ce travail. Qu'à travers lui, toute l'équipe du laboratoire de bioclimatologie de Grignon en soit également remerciée.

Monsieur Jean Paul LHOMME, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, qui a suivi de près ce travail, et qui n'a jamais manqué de me faire des observations pertinentes. Qu'il en soit vivement remercié.

Mes remerciements vont également à Monsieur Alain CASENAVE, Représentant de l'ORSTOM à Niamey, et à Madame THUET, Gestionnaire dans le même établissement, qui n'ont ménagé aucun effort pour me faciliter toutes les démarches administratives devant conduire au

bon terme de ce contrat. Qu'à travers eux, l'ensemble du personnel de l'ORSTOM-Niamey et les Responsables de l'ORSTOM à Montpellier et à Paris, en soient remerciés.

Je voudrais également remercier Dr. Mamadou OUATTARA qui, dans sa fonction de Directeur Scientifique de l'INRAN, soucieux de la formation des jeunes chercheurs, a bien voulu encourager l'aboutissement de ce contrat. Que Monsieur Mohamadou GANDAH Responsable du Département de Recherches Ecologiques de l'INRAN, en soit également remercié pour la disponibilité, le soutien moral qu'il a bien voulu m'accorder.

Enfin, je ne remercierai jamais assez l'ensemble de mes collègues de l'INRAN, qui à un moment ou à un autre ont eu à s'occuper de ma part de tâches administratives.

Je n'oublierai pas également les habitants du village de Banizoumbou, "Capitale" du Super Site Central Est du projet Hapex Sahel, sans lesquels le travail de terrain ne serait pas réalisé. Je pense particulièrement au cultivateur YELLI, propriétaire du champ de mil où nous avons mené nos expérimentations, qui malgré l'indemnisation, supportait mal d'assister à la coupe des poquets de mil immatures lors des prélèvements de matière végétale.

Pour terminer, je dédierai cette thèse à mes parents et à mon épouse Aminata qui m'a encouragé tout au long de ce travail.

RESUME

Des données bioclimatiques recueillies sur une culture de mil dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel 1992, ont été utilisées pour paramétrer les divers compartiments d'un modèle de couvert épars composé de deux niveaux d'échanges: la surface du sol et la végétation. Il s'agit du modèle de Shuttleworth et Wallace (1985). Les entrées du modèle sont les données météorologiques classiques et les caractéristiques biologiques de la culture. En sortie, le modèle fournit les flux de chaleur latente et sensible, ainsi que les températures de surface du sol et de la plante. La paramétrisation a porté d'une part, sur la répartition de l'énergie disponible entre la surface du sol et la végétation, et d'autre part, sur les principales résistances aux échanges des flux. Des mesures de rayonnement net au dessus de la culture, d'indice foliaire et d'indice de surface des panicules, ont été utilisées pour calculer le rayonnement net arrivant au sol, suivant la loi de Beer, avec un coefficient d'extinction égal à 0,41 (Wallace et al., 1990). La résistance de la couche sèche du sol qui représente le frein principal à l'évaporation du sol a été paramétrée en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie. Des mesures de résistance stomatique à 3 niveaux verticaux sur la plante et des mesures simultanées de rayonnement global, ont servi à calculer les différents paramètres d'une fonction simple de prévision de la résistance stomatique moyenne de la culture. Quant aux résistances aérodynamiques, elles sont calculées suivant les formulations de Shuttleworth et Gurney (1990), à partir des mesures de la vitesse du vent au niveau de référence.

Le modèle ainsi développé et appliqué sur l'ensemble du cycle cultural du mil, permet une estimation horaire et journalière de l'ETR assez satisfaisante, avec la possibilité de calculer séparément la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. Les valeurs d'ETR estimées par le modèle concordent bien avec celles qui sont mesurées au dessus de la culture par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen. Cette concordance est encore meilleure pendant la phase de végétation maximale. L'analyse des sorties du modèle montre que l'évaporation du sol représente une fraction importante de l'ETR totale: Plus de 50% de l'ETR du début du cycle jusqu'au stade de LAI=1,5, et de l'ordre de 40% ETR sur l'ensemble du cycle cultural de la plante.

Mots clés: couvert épars, mil, bilan d'énergie, bilan hydrique, transpiration, évaporation du sol.

TABLE DES MATIERES

	Pages
Chapitre 1 INTRODUCTION	1
1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE.....	1
1.2 OBJECTIFS VISES ET INTERET DE L'ETUDE.....	2
1.3 PRESENTATION DE L'ETUDE.....	2
Chapitre 2 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	4
2.1 LES BILANS ENERGETIQUE ET HYDRIQUE D'UNE SURFACE CULTIVEE ET LEUR MESURE.....	4
2.1.1 Description du bilan radiatif.....	4
2.1.2 Le bilan d'énergie et rapport de bowen.....	6
2.1.3 Le bilan hydrique.....	8
2.2 ELEMENTS DE BIOCLIMATOLOGIE DU MIL.....	10
2.2.1 Données biologiques.....	10
2.2.1.1 Caractéristiques botaniques.....	10
2.2.1.2 Croissance et développement	10
2.2.2 Exigences écologiques.....	11
2.2.3 Les besoins en eau du mil.....	11
2.2.4 Bilan hydrique d'une culture de mil.....	13
2.2.5 Efficience d'utilisation de l'eau du mil.....	14
2.2.6 Quelques caractéristiques radiatives et énergé- tiques de la culture de mil.....	15
2.2.7 Transpiration de la plante et évaporation du sol.....	15
2.3 LES MODELES MICROMETEOROLOGIQUES D'ANALYSE ET D'ESTIMATION DE L'ETR DES COUVERTS EPARS.....	17
2.3.1 Approche dite "du coefficient cultural".....	17
2.3.2 Les modèles s'inspirant de "la grande feuille de Penman-Monteith.....	18
2.4 RESUME BIBLIOGRAPHIQUE.....	27
Chapitre 3 MATERIELS ET METHODES	29
3.1 LE MILIEU PHYSIQUE.....	29
3.1.1 Localisation.....	29
3.1.2 Le climat.....	29
3.1.3 Les sols.....	31

3.1.4	Les surfaces végétales.....	31
3.2	LE MATERIEL VEGETAL.....	32
3.3	METHODOLOGIE.....	33
3.3.1	Suivi de la phénologie du mil.....	33
3.3.1.1	Caractérisation du système aérien....	33
3.3.1.2	Caractérisation du système racinaire.	35
3.3.2	Mesures micrométéorologiques.....	36
3.3.2.1	Dispositif micrométéorologique.....	36
3.3.2.2	Mesures de la résistance stomatique et de la température de surface des feuilles de mil.....	37
Chapitre 4	RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE	38
4.1	EVALUATION ET MODELISATION DES CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES.....	38
4.1.1	Caractérisation du système aérien.....	38
4.1.1.1	La phase végétative.....	38
4.1.1.2	Les caractéristiques du mil à la flo- raison et à la maturation.....	43
4.1.2	Caractérisation du système racinaire.....	45
4.1.2.1	Progression du front racinaire.....	44
4.1.2.2	La croissance pondérale des racines..	45
4.1.2.3	Le profil racinaire du mil.....	46
4.1.3	Modélisation des caractéristiques biologiques.....	47
4.1.3.1	Loi de variation dans le temps des paramètres biologiques.....	47
4.1.3.2	Détermination de la surface des feuilles de mil.....	48
4.2	LES CARACTERISTIQUES RADIATIVES AU DESSUS DE LA CULTURE.....	50
4.2.1	Répartition de l'énergie radiative entre bilan de courtes longueurs d'ondes et bilan de grandes longueurs d'ondes.....	50
4.2.2	Albédo du mil.....	52
4.3	EVALUATION DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN D'ENERGIE DE LA CULTURE.....	53
4.3.1	Correction des valeurs de flux conductif dans le sol.....	53

	à l'aide du modèle à celles mesurées par la méthode du bilan d'énergie / rapport de Bowen en 1992.....	84
5.2.3.2	Comparaison des cumuls journaliers d'ETR mesurés et calculés pendant les campagnes 1991 et 1992.....	86
5.3	EXPLOITATION DES SORTIES DU MODELE.....	88
5.3.1	Evolution au cours du cycle du mil de la transpiration et de l'évaporation du sol calculées à l'aide du modèle.....	88
5.3.2	Exemples de bilans d'énergie journaliers calculés à partir du modèle.....	89
5.4	UTILISATION SIMPLIFIEE DU MODELE.....	91
5.5	DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	92
Chapitre 6	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	94
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	97
Annexe 1	LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	
Annexe 2	PROGRAMME DE CALCUL	

4.3.2	Evolution diurne des différents terme du bilan d'énergie.....	54
4.3.3	Bilan d'énergie sur l'ensemble du cycle du mil.....	54
4.4	LE BILAN HYDRIQUE DE LA CULTURE.....	56
4.4.1	Variations saisonnière de l'ETR du mil.....	56
4.4.2	Bilan hydrique sur l'ensemble du cycle.....	57
4.4.3	Efficiéce d'utilisation de l'eau par le mil.....	58
4.5	LES MESURES COMPLEMENTAIRES.....	59
4.5.1	Evaporation du sol nu.....	59
4.5.2	Mesures de résistance stomatique et de température de surface des feuilles de mil.....	59
4.5.3	Profils de température dans le sol.....	60
4.6	DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	61
Chapitre 5 MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DU MIL		63
5.1	DESCRIPTION DU MODELE.....	63
5.1.1	Les équations du bilan d'énergie.....	63
5.1.2	La formulation des flux de chaleur sensible et latente.....	65
5.1.3	Formulation de la température de la surface du sol et de la végétation.....	66
5.1.4	Formulation des résistances au transfert des flux.....	66
5.1.4.1	Les résistances de surface.....	67
5.1.4.2	Les résistances aérodynamiques.....	71
5.1.5	Les fonctions biologiques utilisées.....	74
5.1.6	La méthode de calcul utilisée.....	75
5.2	ANALYSE ET VALIDATION.....	77
5.2.1	Etude de la sensibilité du modèle.....	77
5.2.2	Evolution temporelle des différentes résistances au transfert des flux.....	80
5.2.2.1	Variations diurnes.....	80
5.2.2.2	Variations au cours du cycle cultural.....	80
5.2.3	Validation.....	84
5.2.3.1	Comparaison des valeurs horaires de flux de chaleur latente calculées	

Chapitre 1

INTRODUCTION

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

La situation alimentaire dans la quasi-totalité des pays sahéliens est aggravée par divers problèmes qui sont d'ordre physique, socio-économique et institutionnel. Les productions vivrières nationales demeurent sans cesse déficitaires, déficit que l'on attribue à 3 grands facteurs:

- un environnement physique et biologique défavorable;
- une forte croissance démographique;
- des rendements agricoles stagnants, voire décroissants.

Cette situation se retrouve avec une particulière acuité au Niger, où le mil demeure la céréale par excellence de la population. Toute solution au problème de l'auto-suffisance alimentaire, doit passer par une amélioration de la productivité de cette culture. Ceci suppose une meilleure connaissance de son fonctionnement hydrique et énergétique.

Pour apporter notre pierre à l'édifice, nous avons joint notre effort à celui de l'équipe de bioclimatologie de l'ORSTOM dans le cadre de l'expérience internationale HAPEX-SAHEL ("Hydrologic and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel"), pour initier cette étude sur la bioclimatologie du mil.

La mission Hapex-Sahel devrait aider à comprendre comment interagissent les surfaces continentales sahéliennes et l'atmosphère, à travers la paramétrisation et la modélisation des différents processus d'échange de flux (Goutorbe et al., 1994). Elle fait suite à une série d'expériences internationales visant à quantifier les différents processus d'échange des flux, afin de mieux prévoir les conséquences des "grands changements climatiques" (effet de serre, désertification, modification du régime des précipitations, etc...). Concernant la zone sahélienne, les sécheresses répétées de ces 2 dernières décennies, ainsi que l'anthropisation à grande échelle, ont entraîné progressivement une

modification du paysage. Ces changements des caractéristiques des états de surface peuvent induire une modification du bilan radiatif et de la répartition énergétique du rayonnement disponible. Le même constat peut être fait en ce qui concerne la répartition des eaux de pluie et leur prélèvement par la végétation. L'évaluation et la prédiction de ces transformations devraient nous aider à mieux comprendre le phénomène de la désertification. Cette étude, doit passer par l'acquisition de données expérimentales ponctuelles et globales, ainsi que par la recherche de méthodes et de modèles permettant de passer de l'échelle locale à l'échelle régionale. Le travail présenté ici se situe donc au centre de ces préoccupations.

1.2 OBJECTIFS VISES ET INTERET DE L'ETUDE

L'objectif principal de ce travail est de parvenir à la mise au point d'un modèle simple d'estimation de l'évapotranspiration d'une culture de mil sur l'ensemble de son cycle, à partir des paramètres météorologiques classiques et des caractéristiques phénologiques de la culture. Cette modélisation est rendue nécessaire par la complexité et le coût élevé des dispositifs de mesures directes, qui limitent la multiplication des sites de mesures et leur répétition dans le temps.

Il s'agit également d'une contribution pour une meilleure connaissance du fonctionnement énergétique et hydrique du mil dans une optique d'optimisation de sa production.

1.3 PRESENTATION DE L'ETUDE

L'étude comporte 4 parties essentielles:

- une 1^{ère} partie où nous avons réuni des éléments de bibliographie sur les bilans énergétique et hydrique des surfaces cultivées de manière générale, des données sur la bioclimatologie du mil, et une synthèse sur les modèles d'estimation de l'évapotranspiration des couverts épars;

- la 2^{ème} partie est consacrée au volet expérimental de cette étude: le milieu physique, le matériel végétal et les techniques de mesures utilisées sont présentés dans ce chapitre;
- dans la 3^{ème} partie, nous présentons les résultats expérimentaux avec un premier niveau d'analyse.
- la 4^{ème} partie traite de la modélisation de l'évapotranspiration du mil: les paramétrisations des divers compartiments d'un modèle de couvert épars, ont permis d'aboutir à la présentation d'un modèle simple d'estimation de l'évapotranspiration du mil, avec la possibilité de distinguer l'évaporation du sol intercalaire de la transpiration de la plante.

Chapitre 2

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 2

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 LES BILANS ENERGETIQUE ET HYDRIQUE D'UNE SURFACE CULTIVEE ET LEUR MESURE.

Tout comme les surfaces naturelles, les surfaces cultivées sont le siège d'importants transferts d'énergie et de masse qui sont de types radiatif, convectif, conductif et les changements de phase.

2.1.1 DESCRIPTION DU BILAN RADIATIF

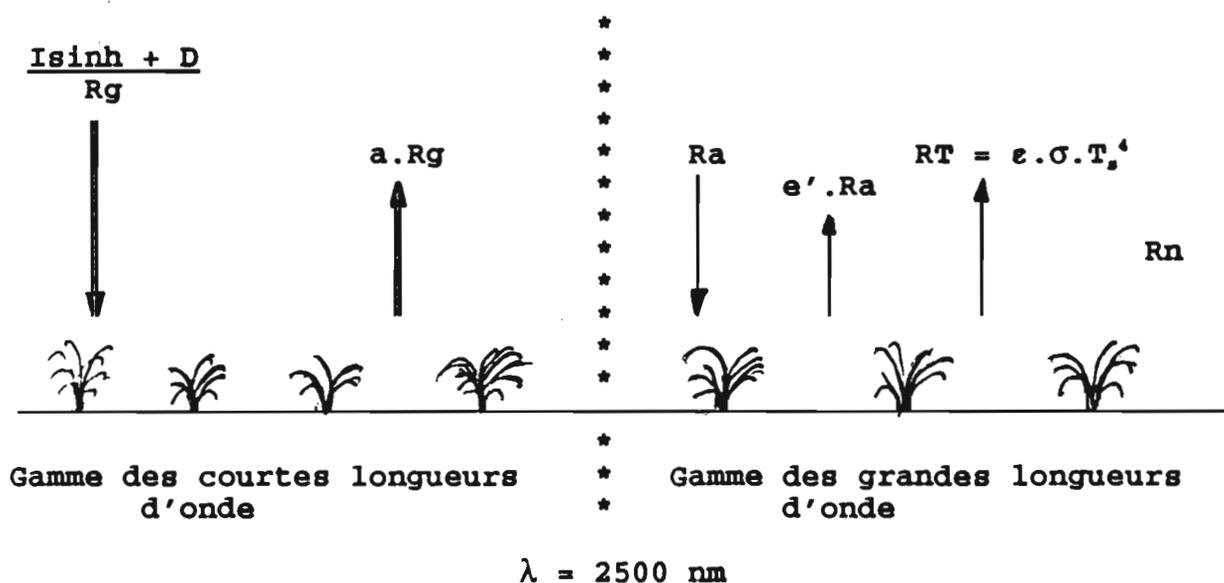
La surface du sol reçoit dans la gamme des courtes longueurs d'onde ($\lambda < 2500$ nm), le rayonnement global (R_g) correspondant à la somme de la fraction du rayonnement solaire direct (I) et du rayonnement diffusé par l'atmosphère (D) ($400 < \lambda < 2500$ nm), le rayonnement global est réfléchi au niveau du sol (R_r) avec un coefficient de réflexion (a), l'albédo ($a = R_r/R_g$). Ce coefficient est une caractéristique de la surface, il varie selon ses propriétés optiques, et l'angle zénithal solaire (Monteith 1973, Monteny et Lhomme 1980, Brutsaert 1982). Dans la gamme des grandes longueurs d'onde ($2500 < \lambda < 60.000$ nm), le sol reçoit le rayonnement émis par les constituants de l'atmosphère (R_a), qui est réfléchi au niveau du sol avec un coefficient e' , le facteur de réflexion du rayonnement atmosphérique ($e' \approx 0$), il perd une énergie, le rayonnement terrestre (R_T). Ainsi, le bilan radiatif d'une surface correspond à la quantité d'énergie disponible, et peut s'écrire:

$$R_n = (1-a)R_g + (1-e')R_a + R_T \quad (1)$$

($W.m^{-2}$ ou $MJ.m^{-2}.j^{-1}$)

Il équivaut à la somme algébrique des rayonnements de courtes longueurs d'onde, $(1-a) \cdot R_g$, et de grandes longueurs d'onde, $(1-e') \cdot R_a + R_T$, entrant et sortant du système considéré (figure 1).

Figure 1: Bilan radiatif au dessus d'une surface végétale
(Monteny et Lhomme, 1980)



Dans ce bilan, le rayonnement solaire global intervient comme unique source d'énergie externe, d'où l'intérêt de sa mesure qui est faite à l'aide d'un pyranomètre. Le rayonnement net, terme prépondérant du bilan d'énergie est quant à lui mesuré à l'aide d'un pyrromètre différentiel. La température de surface est mesurée à l'aide d'un radiothermomètre infrarouge. ϵ , σ représentent respectivement l'émissivité de la surface considérée, et la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$). Le rayonnement atmosphérique peut être calculé comme terme résiduel de l'équation du bilan radiatif, ou mesuré à l'aide d'un pyrgéomètre.

Une fraction du rayonnement global intéresse les végétaux verts, c'est le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) ou visible ($400 < \lambda < 700 \text{ nm}$). Le rapport entre le PAR réfléchi par un couvert végétal et le PAR incident donne le coefficient de réflexion de ce couvert dans le visible, qui est un excellent

indicateur de l'activité physiologique d'un couvert végétal. Le PAR est mesuré à l'aide d'un "quantum sensor". Il est exprimé en $\mu\text{moles.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou en $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$

2.1.2 LE BILAN D'ÉNERGIE ET RAPPORT DE BOWEN

Le bilan énergétique de tout système traduit la conservation de l'énergie et peut se mettre sous la forme générale: énergie "entrante" - énergie "sortante" = stockage (Riou, 1984) Dans le cas d'un couvert végétal, ce bilan peut s'écrire:

$$R_n = LE + H + G + \mu P + S \quad (2)$$

(W.m^{-2} ou $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)

Où: R_n est le rayonnement net; LE : la densité de flux de chaleur latente = équivalent énergétique de l'évapotranspiration réelle; H : la densité de flux de chaleur sensible; G : la densité de flux de chaleur conductif dans le sol; μP : la densité de flux d'énergie fixée par la photosynthèse; et S : la densité de flux de chaleur latente et sensible stockées par le couvert végétal.

La plupart des auteurs (Thom 1972, Tajchman 1981, Monteny 1987) considèrent μP et S comme négligeables devant les autres termes pour des périodes d'intégration de longue durée. L'équation du bilan d'énergie se réduit alors aux termes R_n , LE , H et G dont les expressions peuvent se formuler ainsi:

$$LE = L\rho_a C_p K_v (dq/dz) = \frac{\rho_a C_p K_v}{\gamma} \frac{e_1 - e_2}{dz} \quad (3)$$

$$H = \rho_a C_p K_h (dT/dz) = \rho_a C_p \frac{T_1 - T_2}{za} \quad (4)$$

$$G = -K_s \frac{dT_s}{dz_s} \quad (5)$$

Où, (de/dz) et (dT/dz) , représentent respectivement les gradients de pression de vapeur d'eau (Pa.m^{-1}) et de température (K.m^{-1}) entre 2 niveaux dans la couche limite de la surface; (dT_s/dz_s) : le gradient de température (K.m^{-1}) entre 2 niveaux dans le sol; ρ_a : la masse volumique de l'air (kg.m^{-3}); C_p : la chaleur massique de l'air à pression constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); L : la chaleur latente de vaporisation de l'eau (J.kg^{-1}); γ : la constante psychrométrique (Pa.K^{-1}); K_v et K_h : les coefficients de transfert turbulent de la vapeur d'eau et de la chaleur (m.s^{-1}); κ_s : la conductivité thermique du sol ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

L'évaluation des flux à partir des équations précédentes n'est possible que si les coefficients de transfert (K_v , K_h) sont connus, ce qui n'est pas le cas généralement. L'application des méthodes indirectes comme celle du rapport de Bowen (Bowen, 1926) permet de déterminer les divers échanges qui se produisent à l'interface végétation-atmosphère (Perrier et al. 1975, Monteny 1987, Cellier et Brunet 1992). Cette méthode consiste à déterminer les flux LE et H à partir des mesures de gradients moyens de température et d'humidité entre deux mêmes niveaux dans la couche limite de surface. Le rapport de Bowen β correspond au rapport des densités de flux de chaleur sensible et latente:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho_a C_p K_h (dT/dz)}{(\rho_a C_p / \gamma) K_v (de/dz)} \quad (6)$$

Compte tenu de l'hypothèse de similarité des processus d'échange de vapeur d'eau et de chaleur sensible, ou hypothèse de Reynolds ($K_v = K_h$), l'expression du rapport de Bowen se simplifie:

$$\beta = \gamma \frac{dT}{de} \quad (7)$$

En couplant ce rapport au bilan d'énergie, on détermine aisément les densités de flux de chaleur sensible et latente provenant de la surface considérée.

$$LE = (Rn - G) / (1 + \beta) \quad (8)$$

$$H = \beta (Rn - G) / (1 + \beta) \quad (9)$$

La validité de la méthode repose sur la similitude des profils de température et de la pression de vapeur d'eau dans la couche limite de surface. Elle présente plusieurs avantages dont celui de ne pas nécessiter la connaissance des caractéristiques aérodynamiques de la surface. Le calcul des flux s'affranchit des problèmes d'instabilité atmosphérique tant que l'hypothèse de Reynolds reste vérifiée (Heilman et Britten, 1989). Elle permet en plus une estimation de l'évapotranspiration réelle d'un couvert avec une précision de l'ordre de 10 % (Sinclair et al., 1975), et peut être utilisée avec succès pour des expériences de longue durée (Cellier et Olioso, 1993). Cette méthode peut également donner de bons résultats sur terrain en pente (Nie et al., 1992). Par ailleurs, la méthode exige quand même que les mesures de gradients soient faites dans la zone de flux conservatif dont l'épaisseur varie avec le fetch, ce qui a conduit les auteurs à définir un rapport fetch sur hauteur de mesure minimum de l'ordre de 100/1 pour des mesures adéquates de flux. Heilman et Brittin (1989) ont montré que ce rapport peut être aussi bas que 20/1 pour des rapports de Bowen petits. La méthode est aussi limitée par des conditions de forte aridité entraînant de très faibles gradients ou leur inversion.

En pratique, la méthode du rapport de Bowen couplée au bilan d'énergie se résume, en la mesure du rayonnement net (R_n), du flux de chaleur dans le sol (G) et des gradients de température et de pression de vapeur d'eau au dessus du couvert mais dans la couche limite de celui-ci, ce qui permet d'estimer l'évapotranspiration réelle (évaporation du sol + la transpiration de la plante) et la chaleur sensible provenant du système (sol + végétation).

2.1.3 LE BILAN HYDRIQUE

Tout comme le bilan d'énergie traduit le principe de conservation de l'énergie, le bilan hydrique de tout système traduit la loi de la conservation de la masse d'eau liquide et peut se mettre sous la forme générale:

Quantité d'eau entrante - Quantité d'eau sortante = variation du stock (Klaij et Vachaud, 1992).

Lorsqu'il s'agit d'une surface cultivée, ce bilan se limite à la zone de prospection racinaire du sol et son expression intégrale devient:

$$(\Delta S + \Delta V) = (P + I + U) - (R + D + E + T) \quad (10)$$

où ΔS et ΔV représentent respectivement la variation du stock d'eau dans la zone racinaire du sol et dans les organes de la plante; P, I et U représentent respectivement l'eau des précipitations, d'irrigation et l'eau de capillarité entrant dans la zone de prospection racinaire; R = ruissellement, D = drainage de l'eau hors de la zone racinaire, E = évaporation de la surface du sol et T la transpiration de la plante.

Les apports par remontée capillaire dans la zone racinaire (U), ou le drainage hors de cette zone, sont déterminés par la mesure des gradients de potentiel hydrique à l'aide de tensiomètres. La variation du stock dans la zone racinaire est obtenue par humidimétrie neutronique ou gravimétrique. Pour des taux d'infiltration élevés (cas des terrains sableux et non pentus), le ruissellement est considéré comme négligeable devant la somme des termes E et T: (Evaporation + Transpiration = évapotranspiration ou ETR). Ces 2 termes représentent les principales pertes en eau de ce bilan, ce sont 2 processus dépendant de la demande atmosphérique représentée par le taux d'évaporation potentiel. L'ETR peut être déduite de l'équation du bilan hydrique lorsqu'on a la mesure de tous les autres termes. La précision de cette estimation dépend des erreurs cumulées sur les autres termes. La meilleure estimation de l'ETR est obtenue lorsque tous les autres termes de l'équation sont mesurés de façon indépendante, ce qui n'est pas souvent le cas, surtout en milieu semi-aride (Wallace, 1991). L'ETR estimée à partir du bilan hydrique peut être convertie en son équivalent énergétique par utilisation de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et vice-versa. Le bilan hydrique et le bilan d'énergie se trouvent donc liés, car c'est l'état hydrique du sol qui détermine la partition de l'énergie disponible entre les flux de chaleur sensible et latente.

2.2 ELEMENTS DE BIOCLIMATOLOGIE DU MIL.

2.2.1 DONNEES BIOLOGIQUES

2.2.1.1 CARACTERISTIQUES BOTANIQUES

Les millets constituent un ensemble de 14 céréales dites mineures dont le mil penicillaire (*Pennisetum typhoides*: HUBBARD et STAPF) est économiquement la plus importante (Siband, 1981). Il s'agit d'une graminée annuelle à tiges sans lacunes médullaires de taille variable (1 à 2 cm de diamètre et 1 à 3 m de longueur), portant des noeuds et de longues feuilles engainantes en port érigé. Le mil présente un haut pouvoir de tallage. Son enracinement est dominé par le système séminal en début de cycle, puis devient fasciculaire avec l'apparition des racines adventives dès la 3^{ème} semaine du cycle végétatif (Chopart, 1980). La profondeur du front racinaire peut atteindre 2 m en dessous de la surface du sol. L'inflorescence du mil est une panicule en position apicale de forme et de longueur variables selon les variétés. Des fleurs mâles et femelles coexistent sur le même épillet. La protogynie est de règle chez cette espèce, il s'agit d'une plante allogame. Le grain de mil est un caryopse, de couleur jaune fauve ou brunâtre, pesant 3 à 15 mg à maturité. (Siband 1981, Santens 1982, Beniga 1992).

2.2.1.2 CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT

Le cycle de développement du mil comporte 3 phases successives au cours desquelles l'aspect morphologique du pied de mil se modifie considérablement: la phase végétative, la phase reproductrice et la phase de maturation. Selon Belliard (1979), cité par Lambert (1983), la phase végétative du mil correspond à une période juvénile pendant laquelle l'état floral ne peut pas être atteint quelles que soient les conditions photopériodiques. Elle débute avec la germination des graines et s'achève par l'initiation

florale. Pendant la phase reproductrice, la différenciation de l'épi se réalise. Cette phase commence par l'initiation florale, suivi de l'épiaison, la floraison femelle et 2 à 3 jours plus tard la floraison mâle. Le grain atteint sa pleine maturité 25 à 55 jours après la fécondation (Santens, 1982).

2.2.2 EXIGENCES ECOLOGIQUES

La culture de mil s'étend entre les isohyètes 125 et 900 mm, avec une aire de prédilection se situant autour des isohyètes 400 à 500 mm (Siband, 1981). Le mil présente une grande tolérance à la sécheresse et ne supporte pas les excès d'eau. Son milieu de culture est caractérisé par une extrême variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie. Son développement nécessite des températures moyennes de l'ordre de 30 °C. Santens (1982) a calculé une somme de température moyenne journalière de 2800 °C pour un cycle de développement de 100 jours. Le mil est une plante de pleine lumière. Il se cultive sur des sols légers et sableux, de faible fertilité, à pH acide et retenant peu l'eau. Le mil répond bien aux améliorations des techniques culturales.

2.2.3 LES BESOINS EN EAU DU MIL

Les besoins en eau d'une culture correspondent à la consommation maximale apparente d'eau de cette culture et sont définis par l'évapotranspiration maximale (ETM). Ces besoins dépendent de la demande évaporative du milieu, de la nature de la plante (espèce et variété) et de son stade de développement. Dans le cas du mil, d'après les études réalisées par Dancette (1983) au Sénégal, les valeurs d'ETM sont croissantes avec la durée du cycle cultural (tableau 1). L'auteur relie ces valeurs d'ETM à la demande évaporative par un coefficient Kc ou coefficient cultural, ce qui permet d'extrapoler ces résultats à des zones de climats semblables.

Au Niger, des investigations ont été faites dans le même sens par Kalms et Valet (1975), puis par Valet et Albert (1976), sur les variétés P3 Kolo, 1/2 Souna et la variété locale, dans la région de Tillabery. Les valeurs d'ETM obtenues se répartissent au cours du cycle du mil comme indiqué sur le tableau 2.

Les valeurs d'ETM et de Kc, ainsi déterminées au Sénégal et au Niger, l'ont été dans des conditions de technicité élevée (variétés sélectionnées, niveau de fertilité et entretiens corrects, etc...); ces besoins seront certainement plus faibles en milieu réel, dans les conditions des pratiques culturales paysannes.

Tableau 1: Besoins en eau de 3 variétés de mil mesurés au Sénégal entre 1973 et 1977 par Dancette (1983).

	Pluie (mm)	Irrigation (mm)	ETM (mm)	Kc=ETM/Evbac
Mil Sanio 120j, 1977	374	283	628	0,77
Mil Souna III 90j, 1974	492	73	416	0,74
Mil nain 75j, 1974	447	51	320	0.67

Tableau 2. Besoins en eau de 3 variétés de mil mesurés par Valet et Albert (1976) à Tillabery (Niger).

	var. locale (mm) (mm/j)		P3 Kolo (mm) (mm/j)		1/2 Souna (mm) (mm/j)	
du semis au 37 ème JAS	103	2,8	111	3,0	115	3,1
du 38 ème au 64 ème JAS	122	4,5	135	5,0	95	3,5
du 65 ème au 77 ème JAS	45	3,5	36	2,8	29	2,3
du 78 ème au 106 ème JAS	73	2,5	96	3,3	75	2,6
Total cycle	343		378		315	

2.2.4 BILAN HYDRIQUE D'UNE CULTURE DE MIL

Plusieurs auteurs ont conduit des études sur le bilan hydrique du mil (Tableau 3). Dancette (1971), a mesuré sur un sol sableux du Sénégal, en station et avec un niveau de fertilisation élevé, le bilan hydrique d'une variété de mil Souna, dans deux conditions pluviométriques différentes: une année relativement peu pluvieuse (P=360 mm) où il a calculé une évapotranspiration réelle (ETR) de 302 mm et une année très pluvieuse (P=642 mm) avec une ETR de 321 mm. La durée du cycle de végétation considérée était de 100 jours dans chaque cas. Kassam et Kowal (1975) ont également réalisé des mesures du bilan hydrique du mil au Nord Nigéria, dans des conditions d'alimentation hydrique très favorables (P=847mm) et avec un apport de fertilisants. Les auteurs ont calculé des valeurs d'ETR de l'ordre de 330 mm sur 85 jours de végétation. Ils montrent que la période de forte consommation en eau correspond à la période de LAI élevé (1,8) et coïncide avec la période la plus humide du cycle végétatif.

Au Niger, de nombreux travaux ont également été réalisés sur le bilan hydrique du mil. Charoy (1974) avait mesuré en station des valeurs d'ETR du mil de l'ordre de 366 mm pour une pluviométrie totale de 536 mm. Nouri et al. (1989) ont également conduit des travaux à Tarna et à Kollo où ils ont mesuré des valeurs d'ETR du mil de 227 mm et 330 mm correspondant à des pluviométries de 237 mm et 482 mm respectivement. Le drainage en dessous de la profondeur maximale de mesure était considéré comme négligeable et la culture avait reçu un apport d'azote et de phosphore. Payne et al. (1990) ont conduit des mesures du bilan hydrique du mil en 1985 en champ paysan, mais cette fois - ci sans apport de fertilisants. Les auteurs ont considéré que l'ETR ne pouvait pas être séparée du drainage à Kala-Paté où il a plu 428 mm. Partant des propos de De Wit (1958) qui considère qu'en condition d'alimentation hydrique limitante, la quantité d'eau transpirée par la culture est égale à la quantité d'eau disponible pour cette culture diminuée de l'évaporation et autres pertes éventuelles telles que le drainage et le ruissellement, les auteurs montrent que l'eau a été le principal facteur limitant la production du mil à Chickal en 1985, et que par

Tableau 3: Bilans hydriques et efficacités d'utilisation de l'eau d'une culture de mil suivant plusieurs expériences réalisées en zone sahélienne (Lys. = lysimètre; S.N = sonde à neutrons; - non mentionné).

Auteurs	lieu et conditions d'expérimentation	Pluie (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	Production matière sèche (kg/ha)	Production en grains (kg/ha)	WUE matière sèche (kg/mm/ha)	WUE grains (kg/mm/ha)	Durée du cycle considérée (jours)
Kassam et Kowal(1975)	Nord Nigéria + fertilisants	817	-	(Lys.) 330	22519	3828	68,2	11,6	85
Dancette (1971)	Sénégal + fertilisants	360	-	(S.N) 302	4884	1734	16,2	5,7	100
Charoy (1974)	Niger(IRAT) + fertilisants	536	-	(S.N) 366	6650	1900	18,2	5,2	-
Nouri et al.(1989)	Niger(INRAN) + fertilisants			(S.N)					
	Tarna (1984)	227	-	227	-	670	-	2,8	-
	Kollo (1986)	482	-	330	-	1160	-	3,5	-
Payne et al.(1990)	Niger sans fertilisants			(S.N)					
	Chickal(1985)	223	non significatif	201	-	330	-	1,6	85
	N'Dounga(1985)	344	non significatif	272	3114	1170	11,4	4,3	90
	Kala-Paté(1985)	428	significatif	-	1680	443	-	-	97
Fussel et al.(1986)	Niger(ICRISAT) + fertilisants			(S.N)					
	variété CIVT	657	37	392	6500	1696	16,6	4,3	101
	variété locale	657	23	461	9000	1682	19,5	3,6	114
Vachaud et al.(1992)	Niger (ICRISAT)			(S.N)					
	avec fertilisants	440	148	268	3850	-	18,2	-	98
	sans fertilisants	440	207	211	1140	-	4,3	-	98

contre à N'Dounga et Kala-Paté, l'alimentation hydrique ne peut pas être considérée comme principal facteur limitant la production de la culture. Mamadou et Fussel (1987) ont quantifié le drainage sous une culture de mil au Centre Sahélien de l'ICRISAT (CSI) où ils obtinrent les résultats figurés sur le tableau 3. Une autre étude conduite par Klaij et Vachaud (1992) au CSI et où les pertes par drainage étaient également mesurées (tableau 3), a montré qu'en condition de basse fertilité l'eau n'est pas le premier facteur limitant la production du mil.

Les résultats de Payne et Vachaud révèlent que l'eau de pluie n'est pas utilisée de façon efficiente en conditions de faible fertilité telles que celles rencontrées dans les champs de mil paysans au Niger. Cette idée vient évidemment à contre courant de nombreuses études qui mettent en avant de façon systématique la disponibilité en eau, comme véritable facteur limitant la production du mil en région sahélienne. Cissé (1986) cité par Forest (1991) a montré lors de ses travaux au Sénégal, qu'en sol dégradé et malgré des pluies très faibles (< 300 mm), une fumure organique permet un accroissement de l'ETR, ce qui induit une nette baisse du drainage et lessivage en profondeur. Les investigations doivent se poursuivre dans ce domaine afin de fixer les limites des rôles joués par tous les facteurs de production. Pour cela des techniques de mesure directe de l'ETR au dessus de la culture, telles que les méthodes micrométéorologiques, qui s'affranchissent des difficultés liées à la quantification du drainage et des ruissellements peuvent être très utiles.

2.2.5 EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU PAR LE MIL

L'efficacité d'utilisation de l'eau définie comme étant la quantité de grains produits par millimètre d'eau consommée par hectare est un véritable indicateur de la réponse d'une culture à l'eau. En ce qui concerne la culture de mil, de nombreux résultats sur cette efficacité, existent dans la littérature (tableau 3). Les valeurs obtenues dépendent des conditions expérimentales et de la variété de mil utilisée. Ainsi, en champ paysan sans apport de

fumure et lorsque l'alimentation hydrique n'est pas limitante (cas de N'Dounga dans l'expérimentation de Payne et al. (1990), l'efficacité d'utilisation de l'eau est de l'ordre de 4,3 kg de grains par millimètre d'eau à l'hectare. Cette efficacité peut atteindre des seuils de 11,6 kg/mm/ha dans des conditions d'expérimentation plus favorables, comme c'est le cas sur l'expérimentation de Kassam et Kowal (1975).

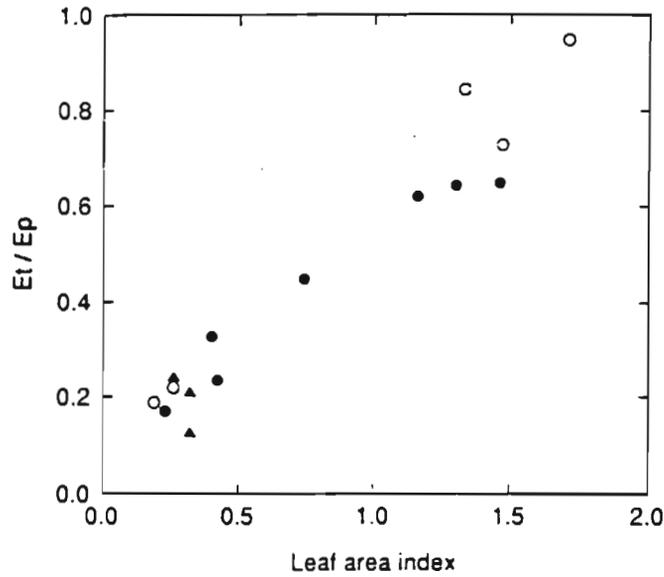
2.2.6 QUELQUES CARACTERISTIQUES RADIATIVES ET ENERGETIQUES DE LA CULTURE DE MIL.

Très peu de données sur ce chapitre existent dans la littérature concernant la région sahélienne. Cependant, on peut noter les travaux de Kassam et Kowal (1975) dans le nord Nigéria (latitude 11 °11 N) où ils ont mesuré des valeurs d'albédo du mil variant entre 0.26 et 0.19, respectivement du début à la fin du cycle cultural. Le rapport entre le rayonnement net et le rayonnement global est de 0.62 en moyenne sur le cycle. Pour le bilan d'énergie, ces auteurs ont mesuré un rayonnement net et une évapotranspiration cumulés sur l'ensemble du cycle (100 jours) de l'ordre de 948 M.J.m⁻² et 835 M.J.m⁻² respectivement, soit un rapport évapotranspiration sur rayonnement net de l'ordre de 88 % en moyenne sur le cycle du mil. Ces résultats ont été obtenus en conditions d'expérimentation très favorables (alimentations hydrique et minérale correctes).

2.2.7 TRANSPIRATION ET EVAPORATION DU SOL INTERCALAIRE DU MIL.

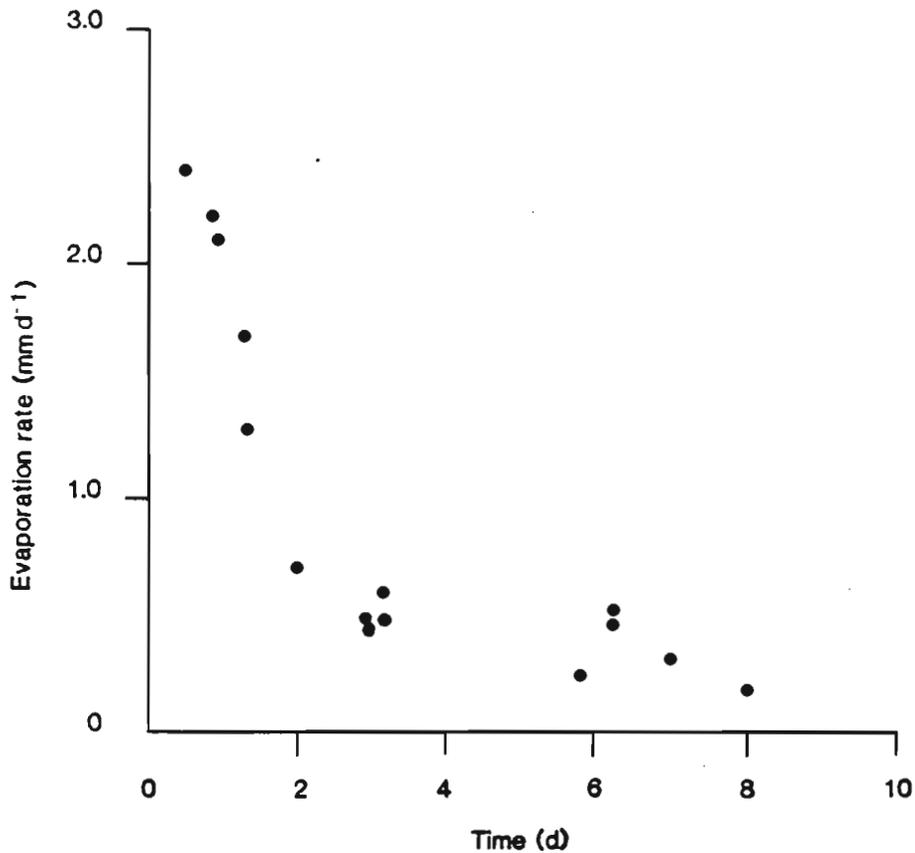
L'évaporation d'une culture implique deux composantes d'importances relatives variables selon la nature et le stade phénologique de la culture. Dans le cas des cultures éparses comme le mil, la connaissance de ces 2 composantes est rendue nécessaire par le rôle déterminant de la transpiration sur la production de la plante, et par les pertes importantes en eau que représente

EVAPORATION FROM MILLET IN NIGER



The relationship between the ratio of daily total transpiration (E_t) to potential evaporation (E_p) as a function of leaf area index in 1985 (▲), 1986 (●) and 1987 (○)

Figure 2: Relation entre la transpiration relative du mil (E_t/E_p) et son indice foliaire, d'après Wallace et al. (1993).

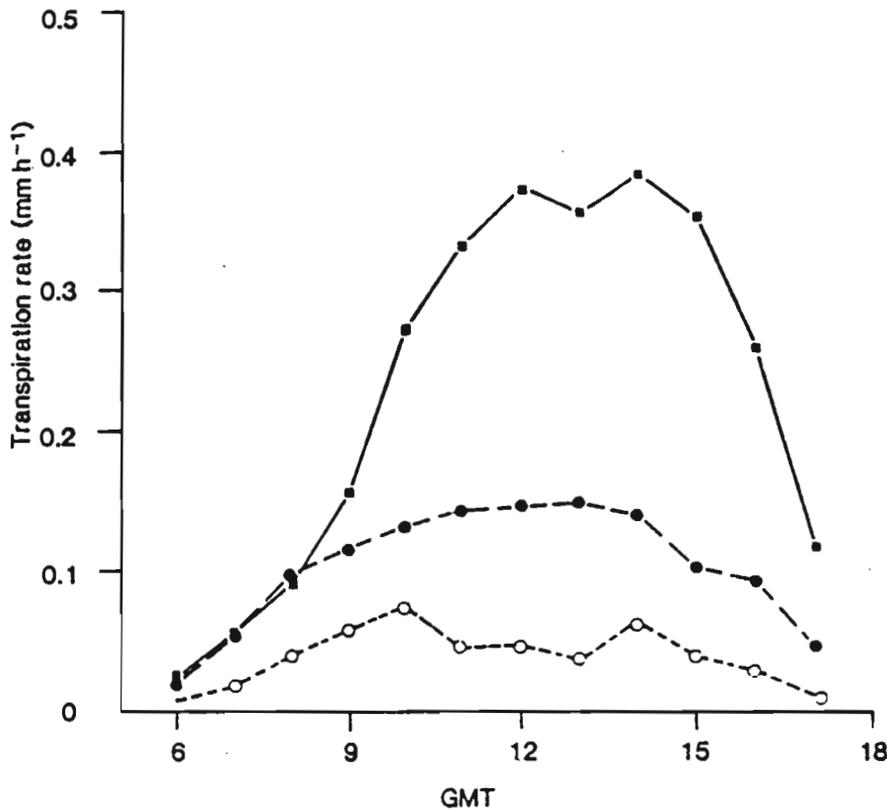


Daily total soil evaporation as a function of time since the last rain storm (< 2 mm).

Figure 3: Evolution temporelle de l'évaporation journalière d'un sol sableux après une pluie (Wallace et al., 1993).

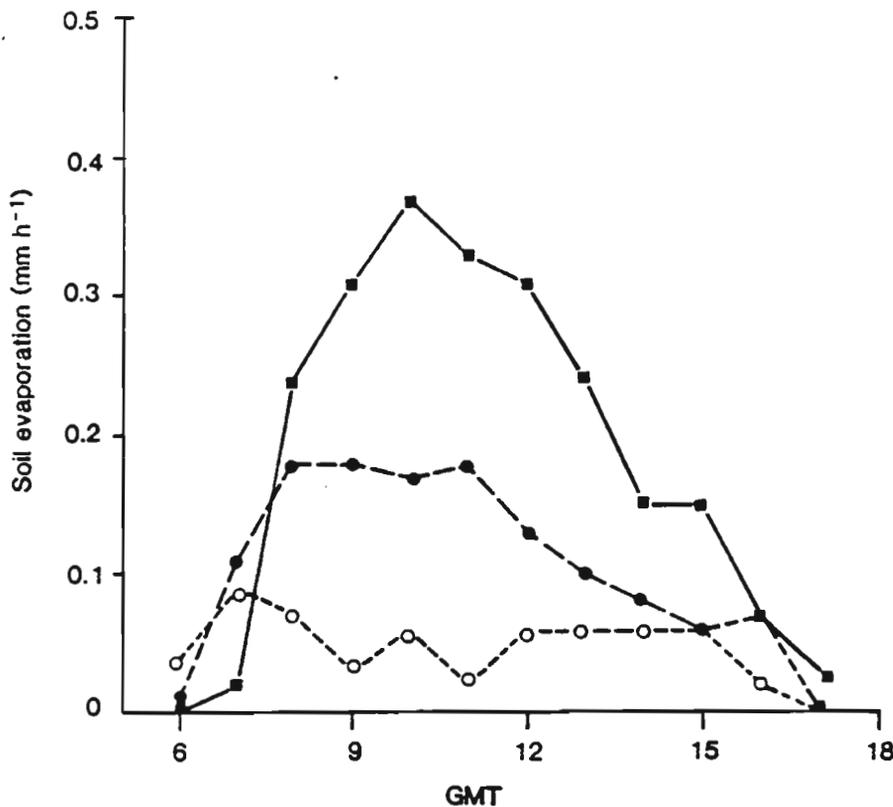
l'évaporation du sol nu. Différentes techniques sont utilisées pour estimer l'un ou l'autre de ces 2 termes. Des mesures de conductances stomatiques par porométrie combinées à des mesures de LAI permettent d'estimer la transpiration. L'évaporation du sol est quant à elle mesurée à l'aide de micro-lysimètres, ou déterminée indirectement en soustrayant la transpiration de l'ETR totale. Des mesures directes de transpiration du mil effectuées par Azam-Ali (1983) et Wallace et al. (1993), ont révélé que l'évolution saisonnière des valeurs journalières de la transpiration est plus expliquée par la variation du LAI que par celle de la conductance stomatique des feuilles. Cette forte dépendance de la transpiration vis à vis du LAI à l'échelle saisonnière est illustrée sur la figure 2. L'évaporation du sol intercalaire est quant à elle dépendante de l'état d'humidité de la surface du sol (figure 3) et du pourcentage de recouvrement de cette surface par la végétation. A l'échelle d'une saison de pluie, le cumul de cette évaporation peut atteindre 35 à 45 % de la hauteur pluviométrique totale (Wallace, 1991). Le cumul journalier de la transpiration peut varier de 0,5 mm/j pour les faibles valeurs de LAI à 4 mm/j pour les LAI maximum. Celui de l'évaporation du sol intercalaire, de 2,4 mm/j immédiatement après une pluie, à une valeur nulle lorsque le sol est totalement sec. A l'échelle horaire, la transpiration du mil, tout comme l'évaporation du sol nu, suivent l'évolution de l'angle zénithal solaire avec un pic centré en milieu de journée pour la transpiration (figure 4) et excentré dans la matinée pour l'évaporation du sol (figure 5). Le suivi séparé et à une échelle de temps très fine de la transpiration et de l'évaporation du sol intercalaire du mil sur tout un cycle cultural serait très fastidieux. Pour cela des modèles d'estimation de ces 2 termes à partir des paramètres météorologiques et des caractéristiques biologiques des cultures éparses ont été proposés dans la littérature. Dans le chapitre qui suit nous présentons quelques uns de ces modèles.

EVAPORATION FROM MILLET IN NIGER



The diurnal variation in transpiration on three days (17 September 1985 (O), 6 August 1986 (■) and 27 August 1986 (●)) with different leaf area indices but similar moist soil conditions (see Table 2).

Figure 4: Variations diurnes de la transpiration du mil suivant 3 journées de LAI différents, mais de conditions d'humidité de sol semblables (Wallace et al., 1993).



The diurnal variation in soil evaporation rate on 3 days (19 September 1985 (■), 27 August 1986 (●) and 13 August 1986 (O)) with different soil wetness and leaf area index (see Table 2).

Figure 5: Variations diurnes de l'évaporation du sol intercalaire du mil suivant 3 journées de LAI et de conditions d'humidité de sol différents (Wallace et al., 1993).

2.3 LES MODELES MICROMETEOROLOGIQUES D'ANALYSE ET D'ESTIMATION DE L'ETR DES COUVERTS EPARS.

La zone sahélienne est caractérisée par un climat à pluviométrie très variable dans le temps et dans l'espace, une végétation éparsée et très rarement uniforme. Ces caractéristiques, ajoutées aux difficultés liées à l'accessibilité de certaines zones, ont longtemps constitué un obstacle au développement des techniques et de modèles d'estimation de l'évapotranspiration adaptés aux couverts épars. Ces dernières années, de nombreuses techniques de mesures ont été adaptées aux zones semi-arides, des progrès ont également été fait dans le domaine de la modélisation. Dans ce chapitre, nous présentons quelques uns de ces modèles, qui peuvent être appliqués à des couverts épars comme le mil. Certains de ces modèles utilisent l'approche dite du "coefficient cultural", mais la plupart s'inspirent de la "grande feuille" de Penman-Montheith.

2.3.1 APPROCHE DITE "DU COEFFICIENT CULTURAL"

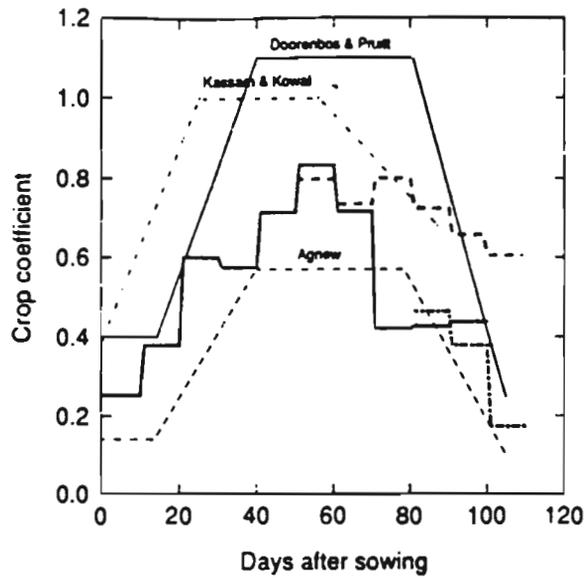
Plusieurs auteurs (Daudet et Perrier 1968, Priestley et Taylor 1972, Perrier 1976, Katerji et Perrier 1983, Monteny, Zeller et Hainnaux 1985) ont suggéré une formulation pratique de l'évapotranspiration réelle des cultures couvrant bien le sol à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman ou évaporation standard ETo):

$$\begin{aligned} \text{ETR} &= C \cdot \text{ETP} & (a) \\ \text{ETR} &= C' \cdot \text{ETo} = C' \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (\text{Rn}-\text{G}) & (b) \end{aligned} \quad (11)$$

Où: C, ou C' = coefficient cultural, Δ = pente de la courbe de pression de vapeur saturante (Pa/K) et γ la constante psychrométrique (Pa/K).

Le coefficient C (ou C'), varie selon les stades phénologiques du couvert végétal, les facteurs climatiques et le stock hydrique du sol (Katerji et Perrier, 1983). L'utilisation de cette approche sur le mil en considérant des valeurs décadaires de C, a été faite par plusieurs auteurs (Kassam et Kowal 1975, Doorenbos and Pruitt 1977,

EVAPORATION FROM MILLET IN NIGER



A comparison of 10 day average crop coefficients calculated as the ratio E_p/E_p in 1985 (.....), 1986 (---) and 1987 (—). For comparison the millet crop coefficients given by Agnew (1991), Kassam and Kowal (1975) and Doorenbos and Pruitt (1977) are also shown.

Figure 6: Comparaison de valeurs moyennes de coefficient cultural du mil déterminées suivant plusieurs expériences (Wallace et al., 1993).

Dancette 1983, Agnew 1991, Wallace et al. 1993) avec des résultats très contrastés les uns des autres (figure 6). En effet dans les couverts épars comme le mil, l'évaporation du sol intercalaire joue un rôle aussi important qu'il est très difficile que l'approche dite du coefficient cultural soit fiable pour la prévision de l'ETR (Wallace et al., 1993). Des modèles simples traitant séparément la transpiration du couvert d'une part, et l'évaporation du sol d'autre part, sont plutôt conseillés sur les couverts épars (Saugier et Katerji 1991, Wallace 1991).

2.3.2 LES MODELES S'INSPIRANT DE LA "GRANDE FEUILLE DE PENMAN-MONTEITH"

Monteith (1965), en extrapolant la formule de Penman au couvert végétal, assimile ce couvert à une grande feuille évaporante située à un niveau fictif $d+z_0$ (d étant la hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique et z_0 la hauteur de rugosité). Ce modèle unicouche peut se résumer par l'équation suivante:

$$LE = \frac{\Delta (Rn-G) + \rho_a C_p (Da/ra)}{\Delta + \gamma (1 + rs/ra)} \quad (12)$$

Où, LE : est la densité de flux de vapeur d'eau, Rn : le rayonnement net du couvert, G : le flux conductif de chaleur dans le sol. $Rn-G$: représente l'énergie radiative disponible, Da : le déficit de saturation de l'air mesuré au niveau de référence ($Da = e_s(T) - e$), ra : la résistance aérodynamique du couvert calculée entre le niveau $d+z_0$ et le niveau de référence dans l'air, rs : la résistance stomatique des feuilles du couvert. Δ : représente la pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température de l'air et γ : la constante psychrométrique.

Dans le cas des couverts rugueux comme les forêts, cette équation peut être réduite à son second terme, en raison des faibles valeurs des résistances aérodynamiques: 2^{ème} terme \gg 1^{er} terme (Amadou et Berbigier, 1989). Le modèle de Penman-Monteith est largement admis et utilisé lorsque la végétation est parfaitement uniforme et couvrante. Cependant, il ne peut donner entière satisfaction dans

le cas des couverts épars comme le mil, en raison de l'hétérogénéité de la pénétration du rayonnement solaire et de l'influence du substrat. (Wallace et al. 1990, Lhomme et al. 1994).

* Ritchie (1972), a proposé un modèle d'estimation de l'évapotranspiration journalière d'une culture éparsée de sorgho, qui prend en compte séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. Immédiatement après une pluie l'évaporation du sol intercalaire de la culture est déterminée à partir de la quantité d'énergie disponible à la surface du sol, mais plus tard la couche sèche du sol oppose une résistance au flux de vapeur d'eau de plus en plus croissante. Pour pallier ce problème et ainsi calculer l'évaporation cumulée du sol durant cette seconde phase, Ritchie a utilisé une fonction exponentielle de la racine carrée du temps écoulé après une pluie.

$$\Sigma E_s = \alpha t^{1/2} \quad (13)$$

Où ΣE_s est l'évaporation cumulée du sol, α une constante dépendant de la nature du sol.

Ce modèle même s'il constitue une amélioration par rapport au premier, ne prend pas en compte non plus l'interaction des flux provenant du sol et de la végétation. Plusieurs auteurs (Monteith 1973, Perrier 1975 et Shuttleworth 1976) évoquaient cette interaction lorsqu'ils montrèrent que la résistance globale du couvert ne dépendait pas seulement de la résistance stomatique, mais aussi de la résistance que l'espace poreux du couvert oppose au transfert des flux et qui traduit le frein dû à la structure du couvert.

* Pour prendre en compte cette interaction, Katerji et Perrier (1985) proposèrent une nouvelle approche de la résistance globale du couvert végétal à la diffusion de la vapeur d'eau: r' (figure 7). Le modèle proposé et vérifié expérimentalement sur une culture de luzerne, décompose cette résistance r' en ses quatre composantes (équation 14): La résistance de la couche sèche de la surface du sol à la diffusion de la vapeur d'eau (r_l), les deux résistances opposées par la structure du couvert, d'une part au flux d'évaporation du sol (r_p'), d'autre part à celui de la

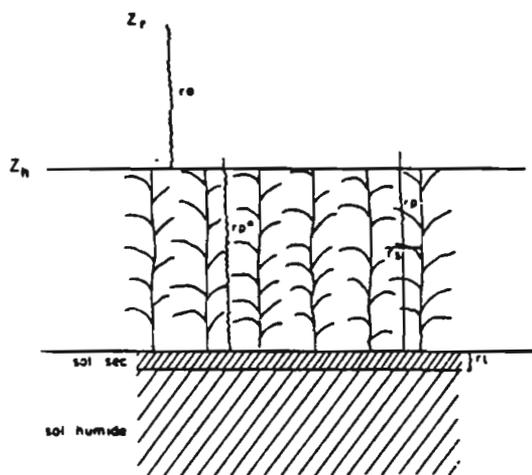


Figure 7 : Schéma général du modèle illustrant les différentes résistances intervenant dans le transfert hydrique en phase vapeur. r_l , résistance de la couche sèche du sol à la diffusion de vapeur d'eau; r_p^* , résistance de la structure du couvert à l'évaporation du sol; r_p , résistance de la structure du couvert à la transpiration végétale; r_s , résistance stomatique foliaire; r_a , résistance aérodynamique.

(Katerji et Perrier, 1985)

transpiration (r_p) et enfin la résistance stomatique moyenne du couvert (r_{sc}). Les auteurs montrent que l'importance relative de ces résistances dépend de l'humidité du sol, de la résistance stomatique et de l'indice foliaire, et donc varie au cours de la période de croissance de la culture, ce qui rend le modèle applicable sur l'ensemble du cycle cultural. Cependant, cette fois ci encore, les auteurs ne considèrent pas séparément le bilan d'énergie au niveau du sol, qui doit jouer un rôle très important pour les faibles valeurs de LAI (Saugier et Katerji, 1991).

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r_{sol}} + \frac{1}{r_v} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} r_{sol} = r_l + r_p' \\ r_v = r_{sc} + r_p \end{array} \quad (14)$$

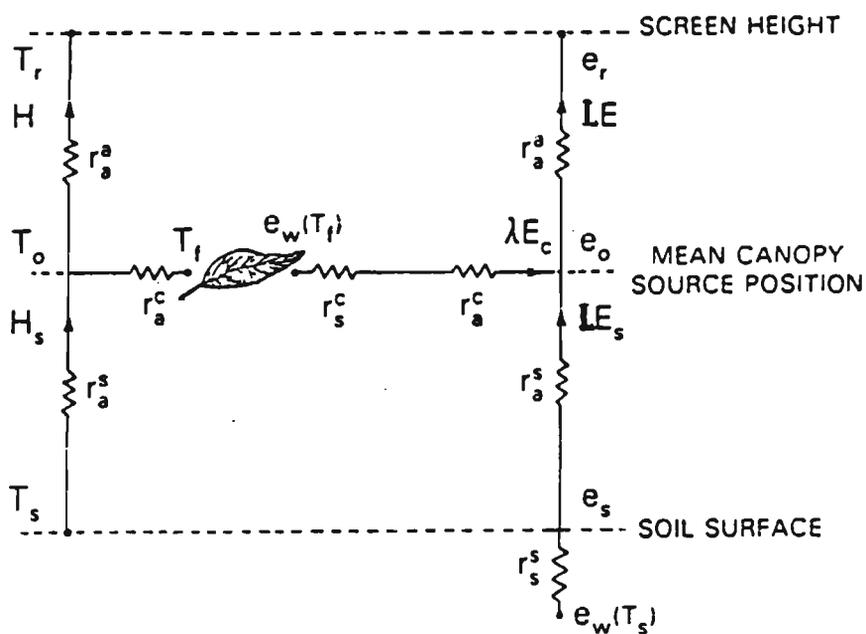
* Shuttleworth et Wallace (1985), proposèrent aussi une extension de l'équation de Penman-Monteith à un couvert épars, en formulant un modèle monodimensionnel à deux couches décrivant l'interaction entre les différents flux et séparant les bilans d'énergie à la surface du sol, au niveau de la végétation et au dessus du couvert.

+ Modèle de Shuttleworth et Wallace (1985)

Ce modèle a été utilisé pour décrire la répartition d'énergie selon les niveaux d'un couvert épars, avec le minimum d'hypothèses possibles (Figure 8). Le développement théorique du modèle, en considérant l'analogie avec la loi d'Ohm en électricité, aboutit à une équation combinée donnant l'évaporation totale du couvert (LE).

$$LE = C_s PM_s + C_g PM_g \quad (15)$$

où PM_s et PM_g sont 2 termes, chacun similaire à une équation combinée de Penman-Monteith, appliquée respectivement à un couvert continu et au sol correspondant, C_s et C_g sont 2 coefficients fonctions des résistances d'origines aérodynamique et stomatique liées au sol et à la végétation, dont les auteurs développent les formules respectives de la manière suivante:



Schematic diagram of the one-dimensional model of crop energy partition which includes the interaction of the substrate and is the framework of the Shuttleworth and Wallace (1985) theory of sparse-crop evaporation.

Figure 8: Schéma du modèle de couvert épars de Shuttleworth et Wallace (1985).

$$PM_o = \frac{\Delta A + \{\rho C_p D - \Delta r_a^c A_s\} / (r_a^a + r_a^c)}{\Delta + \gamma \{1 + r_s^c / (r_a^a + r_a^c)\}} \quad (16)$$

$$PM_s = \frac{\Delta A + \{\rho C_p D - \Delta r_a^s (A - A_s)\} / (r_a^a + r_a^s)}{\Delta + \gamma \{1 + r_s^s / (r_a^a + r_a^s)\}} \quad (17)$$

$$C_o = \{1 + R_o R_s / R_s (R_o + R_s)\}^{-1} \quad (18)$$

$$C_s = \{1 + R_s R_o / R_o (R_s + R_o)\}^{-1} \quad (19)$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_a^a \quad (20)$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_a^s + \gamma r_s^s \quad (21)$$

$$R_o = (\Delta + \gamma) r_a^c + \gamma r_s^c \quad (22)$$

Où $A = (R_a - G)$, représente l'énergie disponible au dessus du couvert; R_a ($W.m^{-2}$), le rayonnement net au dessus du couvert et G ($W.m^{-2}$) le flux conductif de chaleur dans le sol. $A_s = (R_s - G)$ est l'énergie disponible à la surface du sol. D (Pa) est le déficit de saturation de l'air au niveau de référence, Δ ($Pa.K^{-1}$) la pente de la courbe de pression de vapeur d'eau de l'air en fonction de la température, γ ($Pa.K^{-1}$) la constante psychrométrique. r_a^a , r_a^c , r_s^s , r_s^c et r_a^s ($s.m^{-1}$) sont les résistances respectives, de la couche sèche de la surface du sol, stomatique moyenne du couvert, de couche limite du couvert, d'origine aérodynamique entre le sol et le niveau $D+z_o$, d'origine aérodynamique entre le niveau $d+z_o$ et le niveau de référence. ρ ($Kg.m^{-3}$) est la masse volumique de l'air, C_p ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$) sa chaleur spécifique à pression constante.

Les principales innovations dans ce modèle peuvent se résumer en:

- La séparation de l'évaporation totale (LE) en ses 2 composantes: l'évaporation du sol (LE_s) et la transpiration de la plante (LE_c). Pour aboutir à cette distinction, les auteurs utilisent l'analogie électrique de la loi d'Ohm (figure 8) et calculent le déficit de pression de vapeur d'eau au niveau $d+z_o$ (D_o) grâce aux équations ci-dessous:

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{(e_o - e_r)}{r_a^a} \quad (23)$$

$$H = \rho C_p \frac{(T_o - T_r)}{r_a^a} \quad (24)$$

$$\Delta = \frac{e_v(T_r) - e_v(T_o)}{T_r - T_o} \quad (25)$$

$$D_o = e_v(T_o) - e_o \quad (26)$$

Où e_o , e_r , T_o , T_r , $e_v(T_o)$, et $e_v(T_r)$, représentent respectivement la pression de vapeur d'eau de l'air au niveau $d+Z_o$, la pression de vapeur d'eau de l'air au niveau de référence, la température de l'air au niveau $d+Z_o$, la température de l'air au niveau de référence, la pression de vapeur d'eau saturante à la température T_o , et la pression de vapeur d'eau saturante à la température T_r .

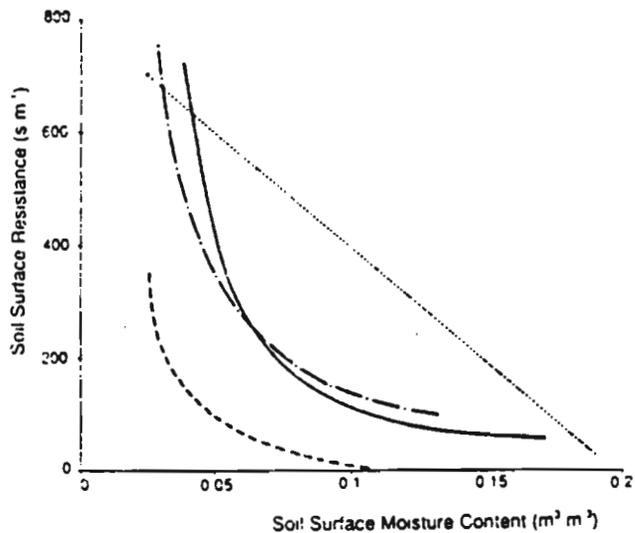
En introduisant l'équation 25 dans 26, et en combinant les équations 23, 24 et l'équation du bilan d'énergie au dessus du couvert ($A = LE + H = R_n - G$), les auteurs aboutissent à une expression de D_o en fonction du déficit de saturation de l'air au niveau de référence (D_r), de LE , Δ , et r_a^a .

$$D_o = D + \{\Delta A - (\Delta + \gamma) LE\} r_a^a / \rho C_p \quad (27)$$

A partir de cette dernière équation, et par analogie à l'équation de Penman-Monteith, les flux d'évaporation du sol (LE_s) et de transpiration de la plante (LE_c) sont exprimés comme suit:

$$LE_s = \frac{\Delta A_s + \rho C_p D_o / r_a^a}{\Delta + \gamma (1 + r_s^a / r_a^a)} \quad (28)$$

$$LE_c = \frac{\Delta (A - A_s) + \rho C_p D_o / r_a^a}{\Delta + \gamma (1 + r_s^c / r_a^c)} \quad (29)$$



A comparison of soil surface resistance models reported by Shu Fen Sun (1982) (—), Katerji & Perrier (1985) (- - -), Camillo & Gurney (1986) (· · · ·) and Wallace et al. (1986) (- · - ·).

Figure 9: Comparaison de plusieurs modèles de résistance de la surface du sol par Wallace (1991).

- L'introduction de la résistance de la couche sèche de la surface du sol (r_s^s) dont la nature physique semble peu évidente d'après les auteurs, mais dont ils donnent la définition mathématique est aussi une autre innovation de cette étude.

$$r_s^s = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{(e_v(T_s) - e_s)}{LE_s} \quad (30)$$

Où e_s et $e_v(T_s)$ représentent respectivement, la pression partielle de vapeur d'eau de l'air à la surface du sol, et la pression saturante à la température de la surface du sol. Le concept de cette résistance est basée sur l'idée suivant laquelle l'évaporation de la surface d'un sol humide qui s'assèche progressivement au cours du temps, est freinée par une couche sèche superficielle qui devient de plus en plus épaisse (Monteith, 1981). Plusieurs auteurs ont proposé une formulation de cette résistance en fonction de l'humidité de la surface du sol. Wallace (1991), a confronté les différents résultats sur la figure 9. Il explique les différences de forme et de position de ces courbes par les différences de nature des sols et d'épaisseurs de la couche de sol concernée par la mesure de l'humidité. Dolman (1993) a utilisé une variation exponentielle de r_s^s , en fonction du potentiel hydrique superficiel du sol. Camillo et Gurney (1986) ont proposé une relation linéaire de r_s^s , en fonction de l'humidité du sol. Quant à Ham et Heilman (1991), ils remettent en cause le principe de l'utilisation de cette résistance, préférant une approche alternative qui utilise le potentiel hydrique et la température de surface du sol pour calculer la concentration de la vapeur d'eau au voisinage immédiat de la surface du sol. En fait, ces auteurs estiment qu'à l'intérieur du couvert les flux de chaleur sensible et latente provenant du sol et de la végétation, ne peuvent pas être distingués et quantifiés à l'aide des relations flux-gradients combinées aux données météorologiques standards. Dolman et Wallace (1991), ont pourtant montré la validité de ces relations sur une culture de mil au Niger, en confrontant un modèle basé sur la théorie Lagrangienne et 3 modèles basés sur la théorie de la diffusion. Deux de ces 3

modèles ont donné des résultats aussi satisfaisants que le modèle lagrangien.

- Les résistances de la couche limite (r_b) et stomatique (r_{st}) des feuilles sont envisagées séparément. Ce sont 2 résistances de surface toutes 2 dépendantes de la surface foliaire de la végétation. En ramenant les valeurs de ces 2 résistances à l'unité de surface du sol, les auteurs tiennent compte des 2 faces de la feuille et calculent deux résistances de surface (r_a^c et r_s^c) qui contrôlent les échanges entre la surface de la végétation et l'air à l'intérieur du couvert. Les auteurs montrent que le modèle, ainsi que tous les processus physiques qui sont décrits, ne sont pas très sensibles à la variation de la résistance de couche limite, par contre, la résistance stomatique joue un rôle très important surtout pour les fortes valeurs de LAI. Les expressions de r_a^c et r_s^c pour une végétation amphistomatée sont ainsi formulées:

$$r_a^c = r_b / 2LAI \quad (31)$$

$$r_s^c = r_{st} / 2LAI \quad (32)$$

r_{st} et r_b sont ici les résistances stomatique et de couche limite d'une face de la feuille. Shuttleworth et Gurney (1990), s'inspirant de l'équation de Choudhury et Monteith (1988), ont proposé une formulation de r_b en considérant un profil logarithmique de la vitesse du vent au dessus du couvert et une atténuation exponentielle de celle-ci à l'intérieur du couvert.

- Le transfert vertical des flux est contrôlé par deux résistances aérodynamiques: d'une part, une résistance de transfert entre le niveau $d+z_0$ et le niveau de référence (r_a^a), et d'autre part, une résistance entre la surface du sol et ce niveau $d+z_0$ (r_s^a). Ces 2 résistances dépendent de la vitesse du vent au dessus du couvert, et de la structure de celui-ci (densité, hauteur, LAI, etc..). Pour simplifier la formulation des flux, les auteurs considèrent une résistance identique aux flux de chaleur sensible et latente.

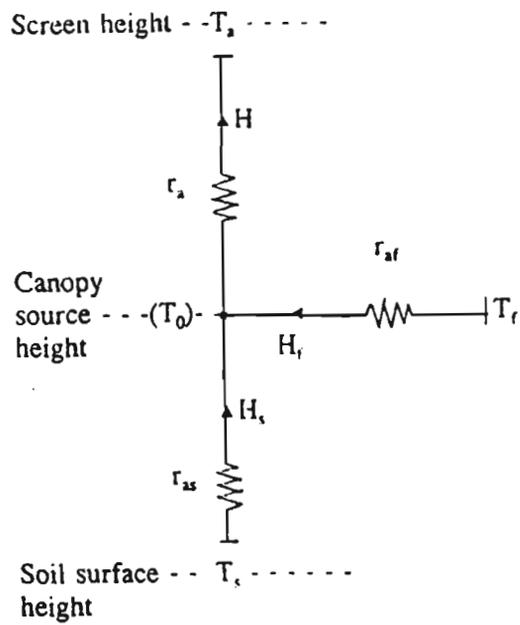
La formulation initiale de ces 2 résistances a été réinterprétée par Shuttleworth et Gurney (1990). Les auteurs ont pris en compte un profil logarithmique de la vitesse du vent entre le niveau de référence et le sommet du couvert, et une décroissance exponentielle de la vitesse du vent et de la diffusivité turbulente à l'intérieur du couvert.

- Le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985), est une "grande feuille poreuse", car il suppose le passage du rayonnement solaire. Le rayonnement net arrivant au sol (R_n^s) est calculé suivant la loi de Beer qui considère une décroissance exponentielle du rayonnement net dans le couvert.

$$R_n^s = R_n \exp(-K_n LAI) \quad (33)$$

Où K_n est le coefficient d'extinction du rayonnement net à l'intérieur du couvert.

Ce modèle, bien que monodimensionnel en théorie prend en fait en compte certaines caractéristiques tridimensionnelles du couvert dans la pratique. Par exemple, pour l'interception du rayonnement solaire, l'orientation des plants affecte l'efficacité d'absorption du rayonnement global. La mesure de la résistance stomatique moyenne du couvert doit aussi tenir compte de la position de la feuille sur la plante et de son orientation. Les modèles de Penman-Monteith (1965) et de Shuttleworth et Wallace (1985), ont été testés tout récemment sur le mil (Wallace et al., 1990). Il ressort de cette comparaison que l'équation de Penman-Monteith sous-estime la transpiration du mil lorsque le sol est sec et la surestime quand le sol est humide, à cause des modifications du déficit de saturation de l'air dans le couvert entraînées par les flux de chaleur sensible et latente provenant du sol, un mécanisme qui est seulement pris en compte dans le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985). Ce dernier modèle beaucoup plus évolué que les précédents, offre de meilleures possibilités pour l'analyse et la prévision de l'évapotranspiration des couverts épars.



Fluxes and potential-resistance network for a two-layer model of heat transfer. T_a is air temperature at a reference height, T_f is foliage temperature, T_s is soil temperature and T_0 is air temperature at canopy source height.

Figure 10: Schéma du modèle de transfert de chaleur à 2 couches de Lhomme et al. (1994).

* Par ailleurs, notons que Lhomme (1988), a développé un modèle multi-couches, basé sur l'analogie de la loi d'OHM en électricité, et donnant la possibilité de subdiviser le couvert végétal en autant de strates que l'on veut (le sol pouvant en constituer une couche), et d'effectuer un bilan d'énergie au sommet de chacune d'elle. Une extension de ce modèle sur les couverts épars (figure 10) a également été utilisée avec succès sur le mil pour l'estimation des flux de chaleur sensible à partir des mesures de la température radiative au sommet du couvert (Lhomme et al., 1994). Cependant ce modèle résumé par l'équation 34 ne permet pas la séparation des flux provenant du sol et de la végétation.

$$H = \rho C_p [(T_r - T_a) - c \delta T] / (r_a + r_o) \quad (34)$$

$$\text{avec } c = [1 / (1 + r_{af} / r_{as})] - f$$

$$\delta T = T_s - T_r \quad r_o = r_{as} \cdot r_{af} / (r_{as} + r_{af})$$

Où H est le flux de chaleur sensible au dessus du couvert, T_r , T_a , T_r , et T_s , respectivement, la température radiométrique de surface du couvert, la température de l'air au niveau de référence, la température de surface des feuilles du mil et la température de surface du sol. r_a , r_{af} , r_{as} , et r_o sont respectivement la résistance aérodynamique entre le niveau d+Z₀ et le niveau de référence, la résistance de couche limite du couvert, la résistance aérodynamique entre la surface du sol et le niveau d+Z₀, et une résistance additionnelle pondérée pour chaque couche. f est la fraction du sol recouverte par le feuillage du mil.

* Enfin, Saugier et Katerji (1991) ont également suggéré une formule d'estimation de l'évapotranspiration des couverts épars, qui utilise le pourcentage de recouvrement du couvert (équation 35)

$$E = E_c + E_s = f \cdot E_{cc} + (1 - f) \cdot E_{so} \quad (35)$$

Où f est la fraction du sol recouverte par la végétation, E_{cc} la transpiration d'un couvert homogène telle que proposé par Penman-Monteith, et E_{so} l'évaporation du sol. Mais les auteurs signalent qu'il s'agit là d'une simplification qui exclut toute interaction entre la transpiration et l'évaporation du sol. Dans la réalité quand le sol est sec, sa température de surface croit et provoque un accroissement de la demande évaporative pour la transpiration.

2.4 RESUME BIBLIOGRAPHIQUE

Des éléments bibliographiques présentés, il faut retenir que l'amélioration de la productivité du mil nécessite un rehaussement du niveau de son efficience d'utilisation de l'eau de pluie. Ce travail se fera par l'identification des techniques d'économie de l'eau, qui implique une meilleure estimation de l'évapotranspiration de la culture et donc de sa consommation en eau. Le développement de modèles d'estimation de cette consommation suppose la connaissance des caractéristiques radiatives, énergétiques et biologiques de la culture. Si la littérature est bien fournie en ce qui concerne le 3^{ème} type de caractéristiques, très peu de données existent sur les 2 premiers. On note cependant les travaux de Kassam et Kowal (1975) dans le nord Nigéria, où ils ont effectué des bilans radiatifs, énergétiques et hydriques décennaires d'une culture de mil en condition d'alimentation hydrique non limitante, et les travaux de Azam-Ali (1983) et de Wallace et al. (1990 et 1993) au Niger sur les mesures de transpiration et d'évaporation du sol.

Kassam et Kowal (1975) nous donnent un ordre de grandeur de l'albédo du mil (0,26 à 0,19 respectivement du début à la fin du cycle du mil), et du rapport R_n/R_g (0,62 en moyenne sur la saison). Ces résultats, obtenus dans des conditions de technicité élevée (alimentations hydrique et minérale correctes), ne peuvent être extrapolés à nos conditions expérimentales, car l'humidité de la surface du sol modifie de façon importante les valeurs de ces paramètres.

Quant à Azam-Ali (1983) et Wallace et al. (1990 et 1993), ils montrent que l'évolution saisonnière de la transpiration du mil est plus expliquée par la variation du LAI que par celle de la conductance stomatique des feuilles. L'évaporation du sol intercalaire de la culture représente une proportion importante de la pluviométrie totale (35 à 45 %), son évolution au cours du cycle dépend de l'humidité de la partie superficielle du sol et du pourcentage de recouvrement de la surface du sol par le feuillage du mil.

Concernant la modélisation de l'évapotranspiration, le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985) est celui qui prend le mieux en compte les différents processus d'échange de flux au dessus et à l'intérieur d'un couvert épars comme le mil.

Chapitre 3

MATERIELS ET METHODES

Chapitre 3

MATERIELS ET METHODES

Ce chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques physiques du milieu d'étude, des variétés de mil semées par les paysans, du dispositif expérimental, ainsi que des techniques de mesures que nous avons utilisées.

3.1 LE MILIEU PHYSIQUE

3.1.1 LOCALISATION

Les travaux ont été conduits au Niger, à 65 km à l'Est de Niamey (figure 11a), sur 2 champs de mil paysans: mil du "bas-fond" (13°33'408N; 02°39'636E), et mil de la "Jupe sableuse" (13°32'795N; 02°41'857E). Ces 2 champs de mil sont situés dans le bassin versant de Sama-Dey, non loin de Banizoumbou (13°31 N ; 2°39 E), base du Super Site Central Est du programme Hapex-Sahel (figure 12). La "jupe sableuse" est la partie pentue du bassin versant reliant la vallée (appelée ici bas-fond) au plateau latéritique et composé essentiellement de sable éolien.

3.1.2 LE CLIMAT

Le climat de la zone d'étude est celui d'un régime sahélien type, dépendant des mouvements de masse d'air de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et caractérisé par:

- deux saisons bien distinctes: une période moyenne de croissance de la végétation de 60 à 150 jours selon la latitude, correspondant à la saison des pluies, et une saison sèche le reste de l'année. A Niamey par exemple, la date moyenne de démarrage des pluies se situe vers mi-juin et celle de la fin des pluies vers mi-septembre (Sivakumar 1989).

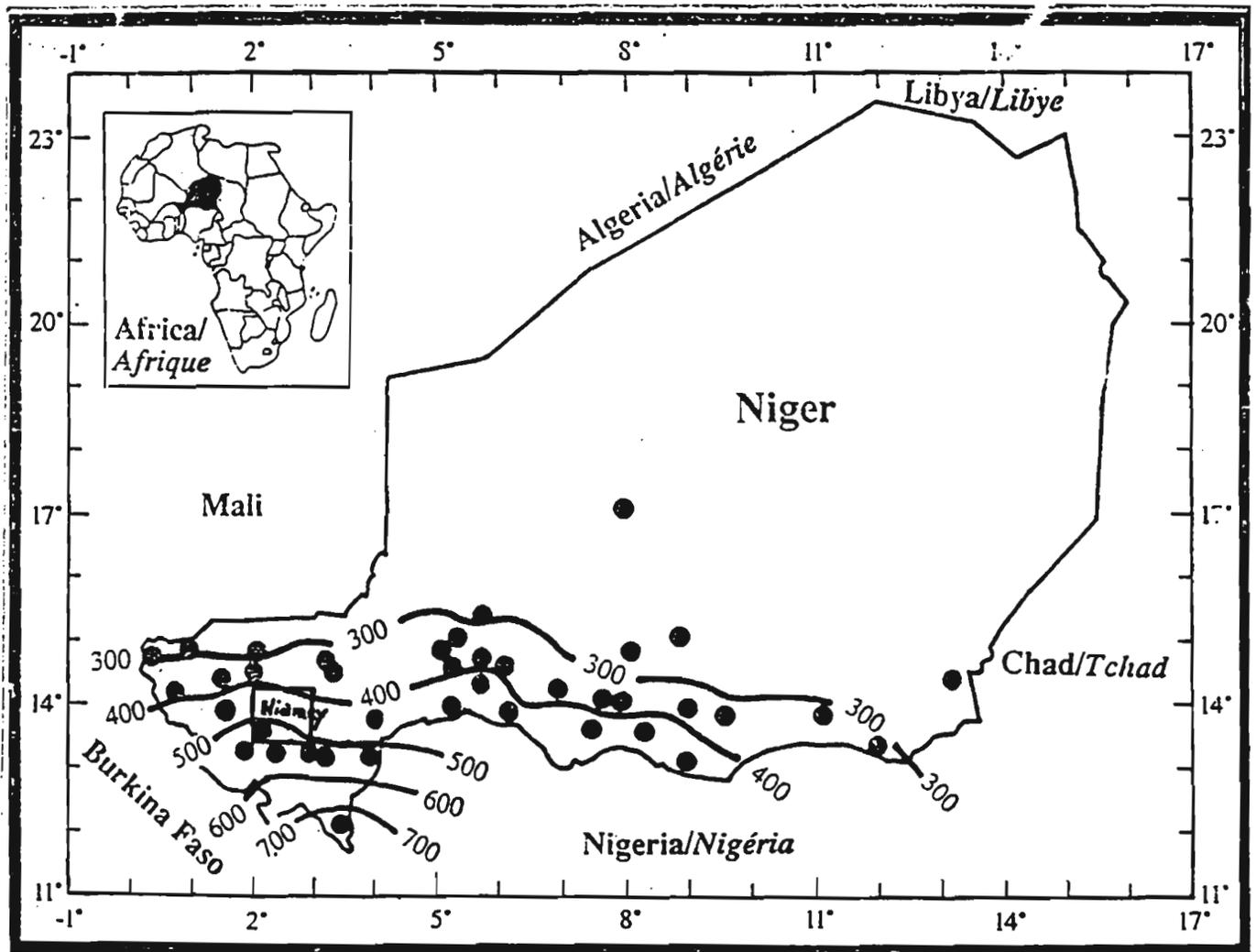


Figure 11a: Localisation du site d'étude et pluviométrie annuelle moyenne (mm) au Niger (Sivakumar et al., 1993).

□ Site du projet Hapex-Sahel

EPSAT - NIGER : 31/07/1992

EPSAT - NIGER : 30/08/1992

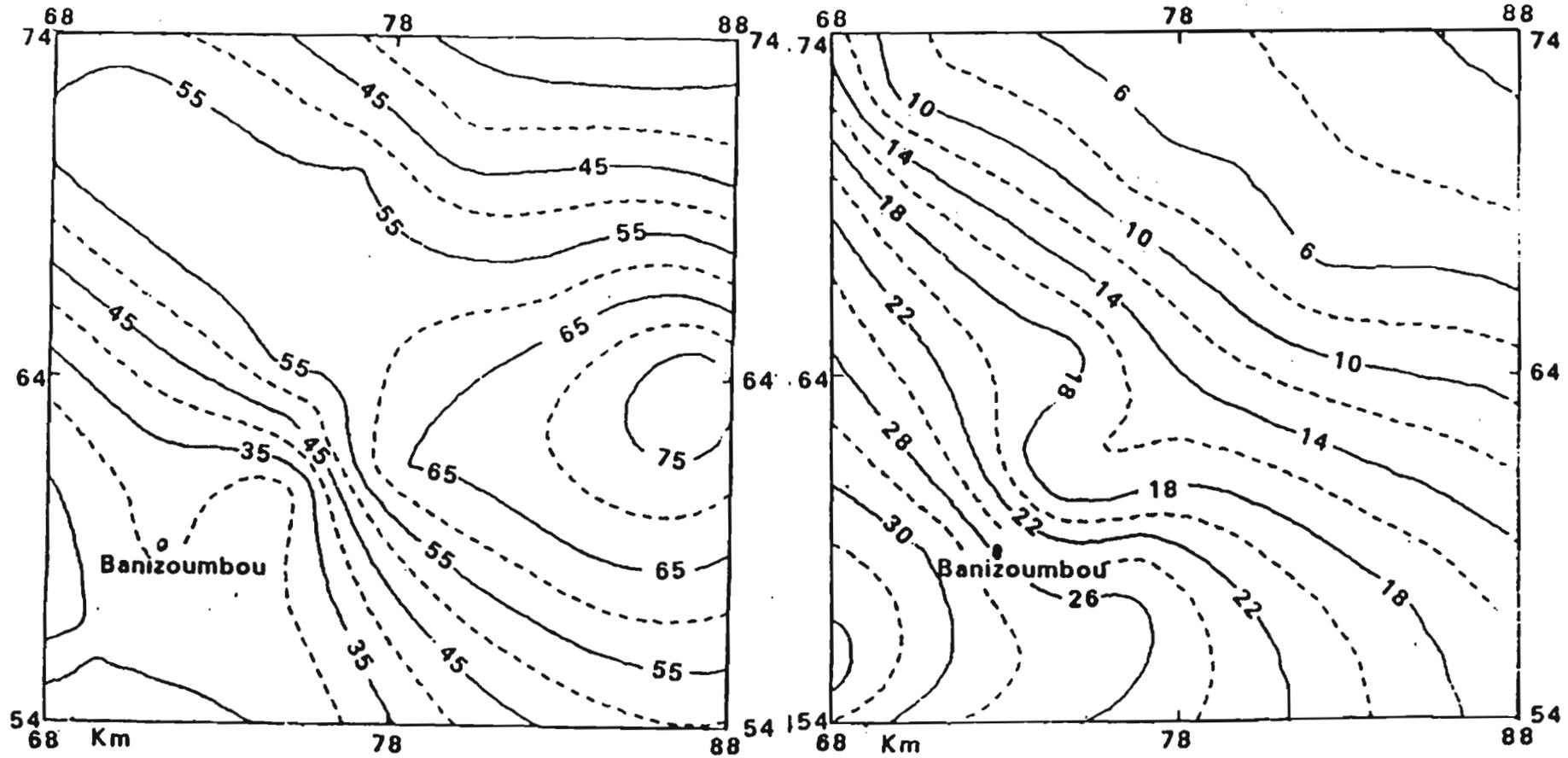
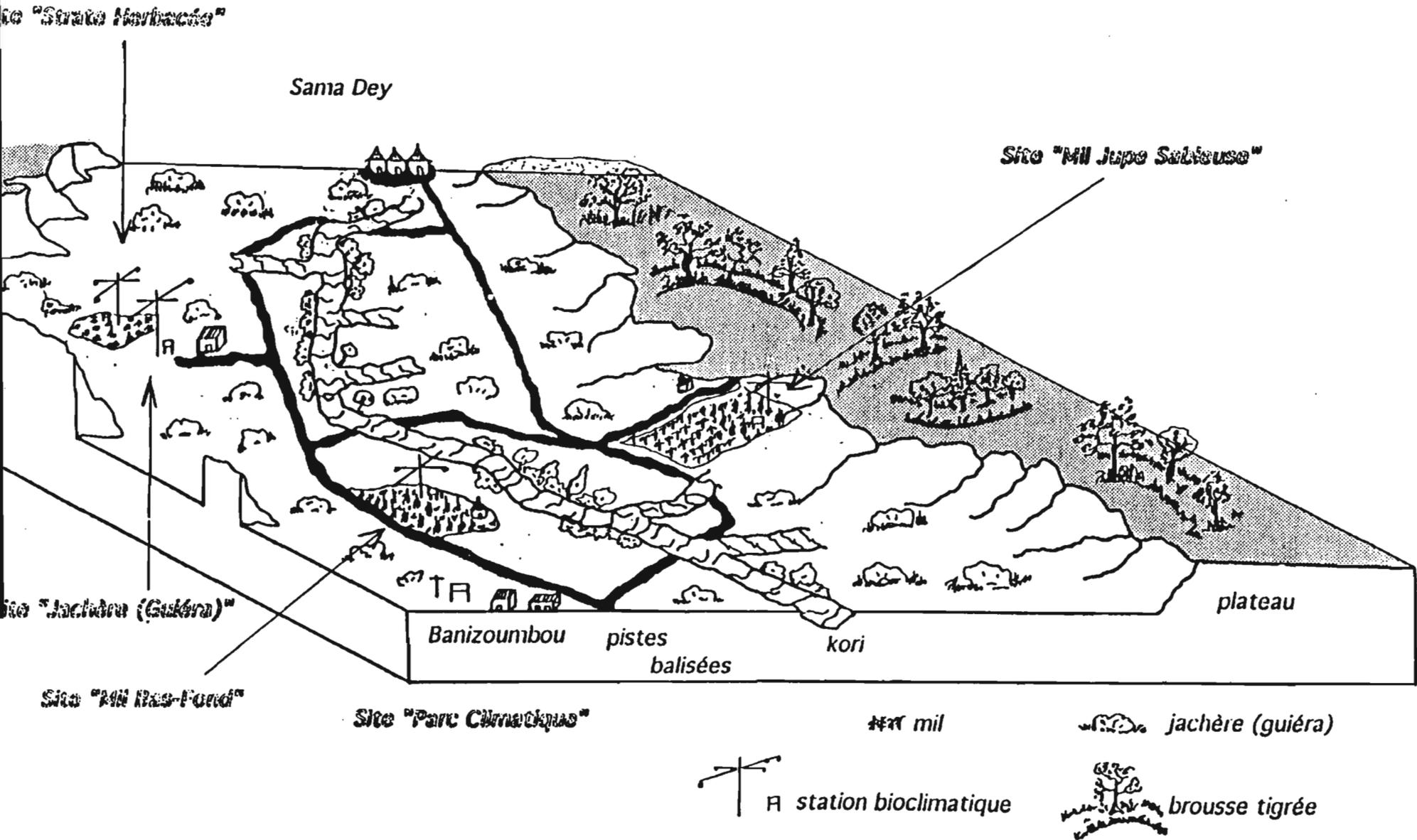


Figure 11b: Variabilité spatiale de la pluviométrie journalière (mm) dans la région de Banizoumbou (Lebel, communication personnelle).

Figure 12: BASSIN VERSANT DE SAMA DEY



- une pluviométrie très variable dans le temps et dans l'espace (figure 11a et 11b): le coefficient de variation temporelle de la pluviométrie annuelle se situe entre 15 et 30 %. Il existe un fort gradient nord-sud des pluviosités annuelles. Plusieurs auteurs (Morel 1988, Sivakumar 1990) comparant les précipitations de ces 2 dernières décennies à celles des années 1950-1970, ont signalé une baisse générale des pluviosités annuelles sur le Sahel, se traduisant par un déplacement vers le sud des isohyètes. A cette variation inter-annuelle de la pluviométrie au sahel, s'ajoute une forte variabilité intra-saisonnière. L'exemple de Banizoumbou en 1991 et 1992, illustre bien ces 2 types de variabilités (figure 13a et 13b): 522 mm en 1991 soit 4 % en dessous de la moyenne de Niamey (545 mm), et 422 mm en 1992 soit 23 % en dessous de la moyenne de Niamey. Les données pluviométriques journalières représentées sur les figures 13a et 13b, montrent également un démarrage assez précoce de la saison des pluies en 1991 (26 mm de pluie dès le 14 Avril), et un léger retard en 1992. La distribution temporelle de la pluviométrie journalière a été plus régulière en 1992 qu'en 1991.

- Le rayonnement global mensuel peu variable tout le long de l'année, est de l'ordre de $21 \text{ MJ/m}^2/\text{j}$ en moyenne à Banizoumbou (- figure 14)

- la température de l'air qui dépend du rayonnement global et du bilan énergétique est quant à elle modifiée saisonnièrement par les variations du régime hydrique et l'état de végétation de la surface du sol. L'air est relativement chaud et sec de mars à mai, moins chaud et humide de juin à octobre et frais et sec de novembre à février (figure 15 et 16). Les variations saisonnières de l'humidité relative de l'air sont très importantes avec un minimum en janvier-février et un maximum en août (figure 16).

- la région est soumise à l'alternance de 2 régimes de vents: l'harmattan, vent du nord-est, continental, chaud et sec, souvent chargé de sable, souffle avec des vitesses moyennes de l'ordre de 4 à 5 m/s pendant la saison sèche (figure 17); et la mousson, vent du sud-ouest, maritime et humide, soufflant parfois avec de fortes intensités de courte durée pendant les passages des fronts des lignes de grains, au cours de la saison des pluies. De septembre

Figure 13

a: Pluviométries journalières, Banizoumbou 1991.

b: Pluviométries journalières, Banizoumbou 1992.

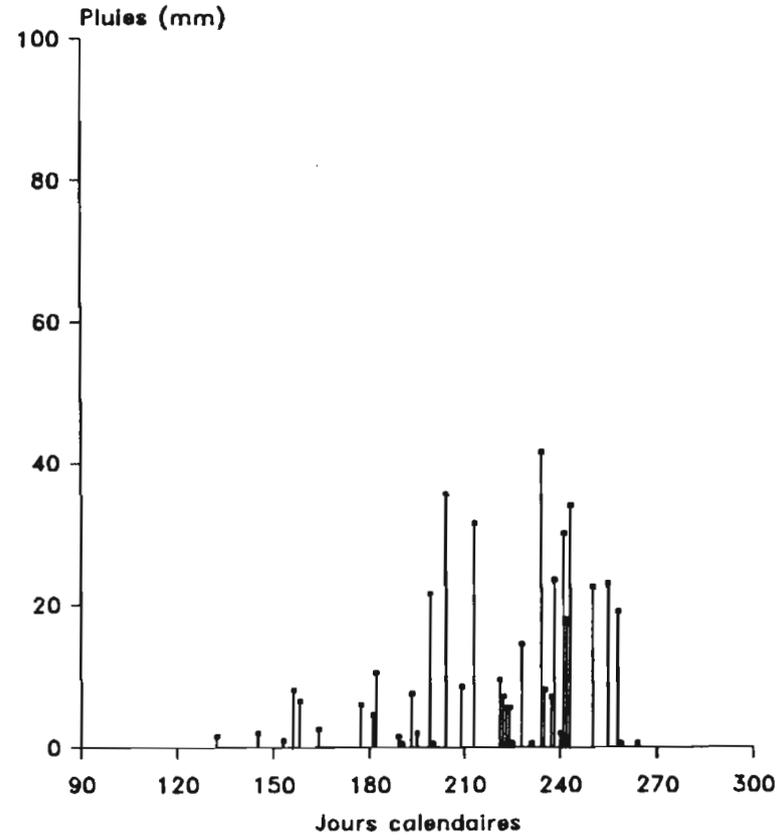
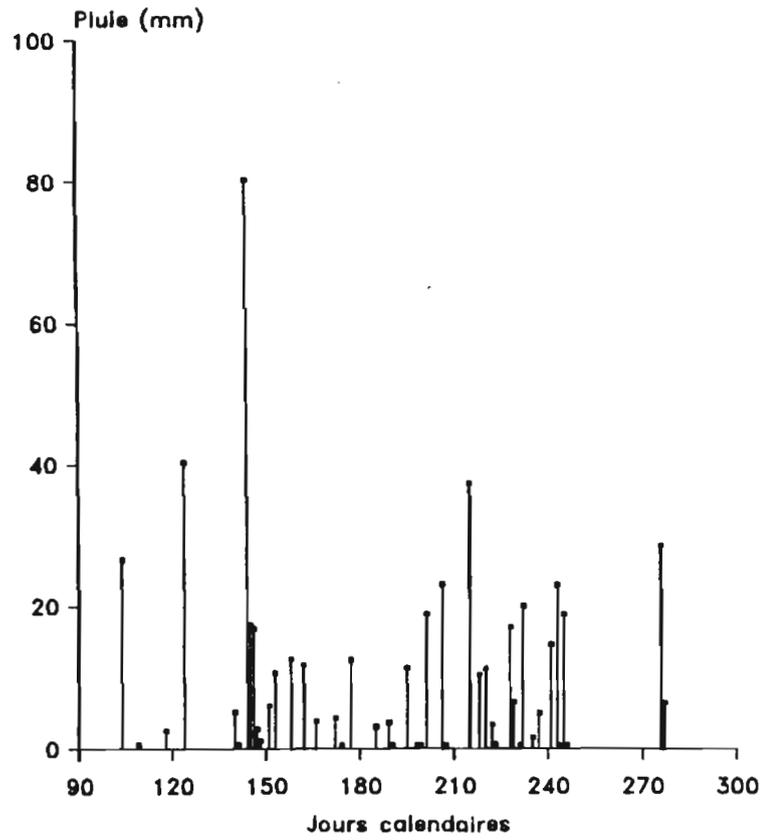


Figure 14: Moyennes mensuelles du rayonnement global journalier (MJ/m²/j) en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

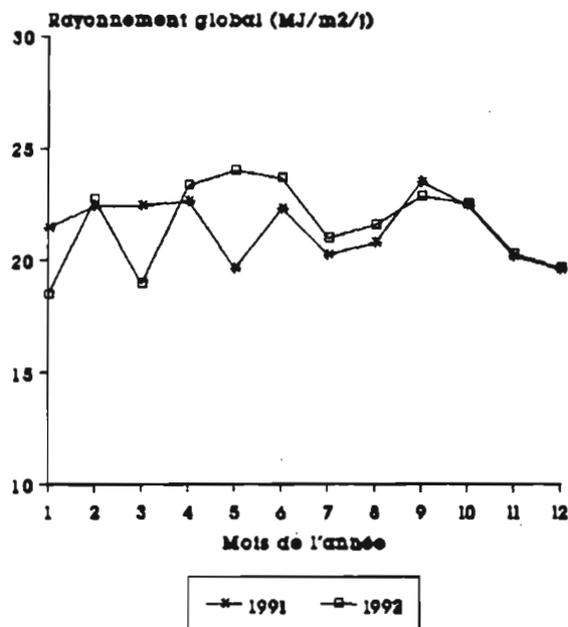


Figure 15: Moyennes mensuelles des températures maximales et minimales de l'air en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

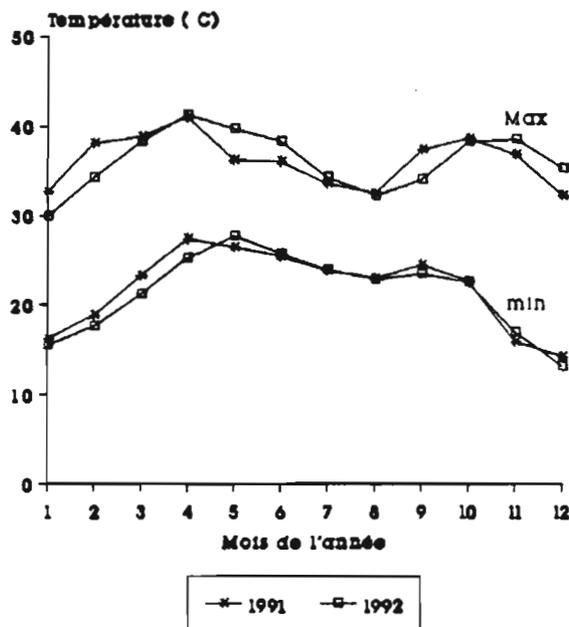


Figure 16: Moyennes mensuelles des humidités relatives maximales et minimales de l'air en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

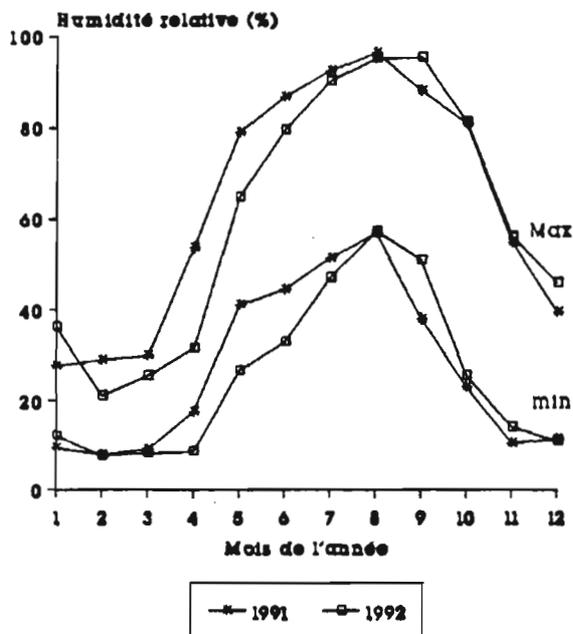
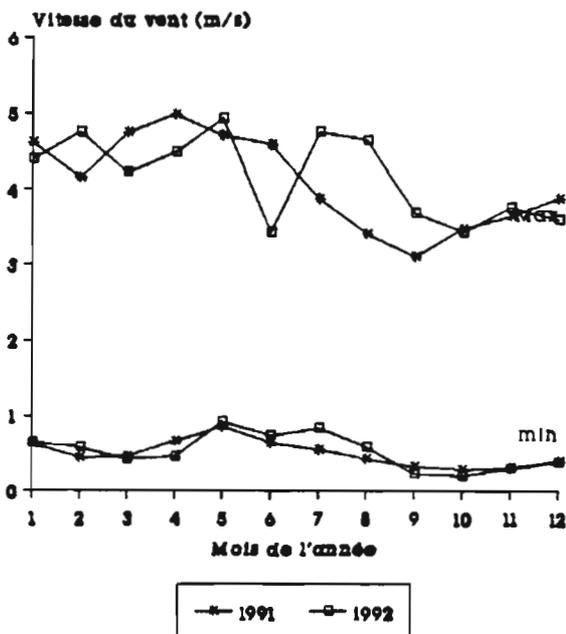


Figure 17: Moyennes mensuelles des vitesses maximales et minimales du vent en 1991 et 1992 à Banizoumbou.



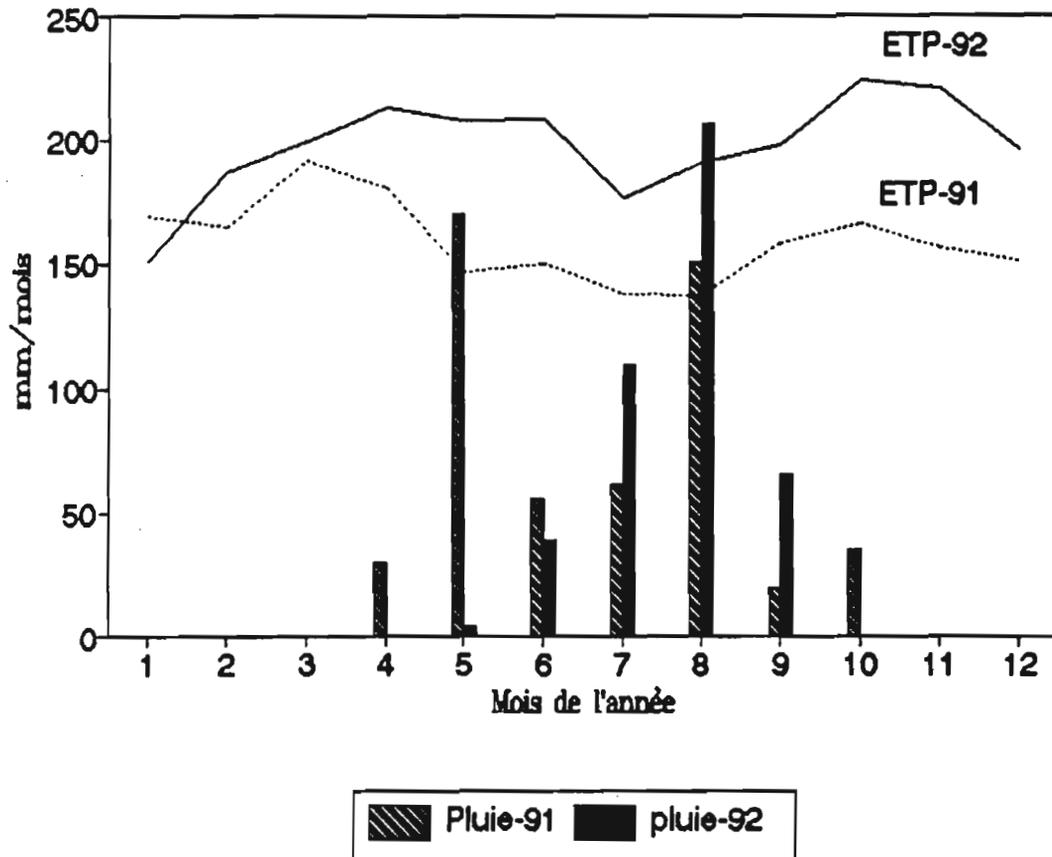


Figure 18: Evolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman 1948) en relation avec les précipitations mensuelles. (Banizoumbou 1991 et 1992)

à décembre, les vitesses de vent sont faibles, le temps est relativement calme (figure 17).

- L'ETP annuelle moyenne est de l'ordre de 2000 mm suivant la formulation de Penman (1948). Ses valeurs mensuelles pendant la saison des pluies sont inférieures à celles de la saison sèche en raison des faibles pouvoirs évaporants de l'air résultant de la forte humidité qui caractérise les saisons pluvieuses (figure 18)

3.1.3 LES SOLS

En ce qui concerne les sols, 2 formations superficielles sont dominantes dans la région de Banizoumbou (Gavaud, 1975):

- Un manteau sableux appartenant à la toposéquence des vallées;
- Des sols latéritiques au niveau des plateaux.

Le premier est un sol à sesquioxydes fortement individualisés et à humus rapidement décomposé, communément appelé sol ferrugineux tropical non ou peu lessivé. Ce sol se caractérise par un pH acide sur l'ensemble du profil, une texture sableuse et une profondeur variable allant d'un simple voile de sable de 10 à 15 cm d'épaisseur à des profondeurs de 2 mètres. C'est sur la partie profonde de ce sol que se cultive le mil pénicillaire.

3.1.4 LES SURFACES VEGETALES

Quant aux surfaces végétales, elles sont constituées, d'une part, de formations naturelles sur les plateaux latéritiques et sur les dépôts sableux, et d'autre part, de cultures sur "Jupes sableuses" et dans les bas-fonds. La végétation naturelle est composée de formations arbustives en bandes (brousse tigrée) occupant les plateaux gréseux du Continental Terminal, et de savanes arbustives à *Guiera senegalensis* avec strate herbacée sur les substrats sableux. (Ambouta 1984).

3.2 LE MATERIEL VEGETAL

Environ 90 % des surfaces cultivées de la zone d'étude sont consacrées au petit mil ou millet, en culture pure ou en association avec le niébé (*Vigna Unguiculata*). Quelques cultures légumières sont pratiquées en bordure des mares temporaires en saison sèche. Le mil est la céréale de base des pays du Sahel (Dancette, 1983), en particulier du Niger où il constitue l'essentiel de l'alimentation de la population. Sur l'ensemble du territoire, environ 1.783.400 tonnes de grains ont été produites sur une superficie de 4.988.300 ha en 1992, contre 1.852.700 tonnes de grains sur une superficie de 4.383.900 ha en 1991 (Rapport 1992, Direction de l'Agriculture). Il est cultivé essentiellement pour son grain destiné à l'alimentation humaine, et offre des sous-produits très utilisés en milieu rural: les tiges et les feuilles servent d'aliment de bétail et à divers usages domestiques (chauffage, confection des pallissades, lits, etc...); la paille trouve aussi son utilisation dans la fabrication du fumier et du compost; les glumes et glumelles sont utilisées en construction, rendant certains matériaux (argile) plus consistants.

La culture de mil est manuelle et extensive: la préparation du terrain se fait par désouchage et abattage des arbustes, une fumure naturelle par le bétail aux alentours des villages. Les semis se font en poquet à l'aide d'une daba, sans travail de sol préalable, à sec ou dès que le sol est humide sur 20 à 30 cm de profondeur. Deux sarclages à la hilaire sont effectués au cours du cycle, un démariage à 3 plants par poquet, est fait pendant ou après le premier sarclage. La récolte intervient vers la fin de la saison des pluies quand les grains deviennent secs et durs.

Le matériel végétal que nous avons utilisé sur le bas-fond en 1991, est une variété locale tardive de la région de Banizoumbou, plus connue sous le nom local de "Haïni-Kiré". L'épi est fuselé: de 50 à 70 cm de long, la couleur des grains est jaune, la hauteur des tiges atteint 200 à 230 cm en fin de cycle. En 1992, nous avons travaillé sur la même variété de mil au niveau du bas-fond et sur une variété améliorée (CIVT) au niveau de la "Jupe sableuse".

3.3 METHODOLOGIE

Dés le début de l'hivernage 1991, il a été mis en place au niveau de la parcelle du "mil bas-fond" (environ 10 hectares), un dispositif de suivi du développement et de la croissance des systèmes aérien et racinaire du mil, un dispositif de mesure des bilans radiatif et énergétique basé sur le rapport de Bowen. Un parc climatique enregistrant les données climatiques de base, complète l'ensemble de ce dispositif. En 1992, ce dispositif a été renforcé par l'installation d'un "micro-bowen" pour la mesure de l'évaporation du sol nu. Des cinétiques journalières de mesure de résistance stomatique et de température de surface des feuilles de mil ont été réalisées pendant la période d'observation intensive de HAPEX-SAHEL. Dans un but expérimental, un dispositif de mesure du bilan d'énergie du mil sur terrain en pente, a été installé au niveau de la "jupe sableuse" en 1992.

3.3.1 SUIVI DE LA PHENOLOGIE DU MIL.

Ces mesures ont été réalisées pendant les périodes allant du 11/06 au 2/09 en 1991 sur le "mil bas-fond", et du 30/06 au 7/10 en 1992 sur le "mil bas-fond" et le "mil jupe sableuse". Elles concernent l'évolution temporelle et spatiale des systèmes aérien et racinaire des mils étudiés.

3.3.1.1 CARACTERISATION DU SYSTEME AERIEN.

Le mil étant une plante très hétérogène et trop volumineuse pour permettre une homogénéisation par le nombre de prélèvements, les mesures étaient faites sur un échantillon de 8 poquets prélevés tous les 7 jours, du début à la fin du cycle. Le choix des 8 poquets se faisait de façon à approcher au mieux la valeur moyenne de chaque paramètre de la culture. Dans cette optique, 4 grandes zones d'hétérogénéité de la croissance du mil, étaient définies au niveau du "mil bas-fond" et 2 poquets étaient prélevés dans chacune

des 4 zones à chaque fois. Les paramètres étudiés sont énumérés, avec le détail de la méthode de mesure utilisée:

- **Le nombre de talles et de feuilles:** par comptage sur chacun des 8 poquets du nombre de talles et du nombre de feuilles sur chaque talle;

- **La hauteur moyenne de la plante:** elle est mesurée sur chacun des 8 poquets, et correspond à la hauteur moyenne entre le sol et le sommet de la strate verte;

- **Le degré de recouvrement du sol:** c'est le rapport entre la surface de sol effectivement recouverte par la plante et la surface du champ. L'estimation de la surface de sol effectivement recouverte par chacun des 8 poquets choisis se fait de la manière suivante: nous mesurons d'abord le diamètre du cercle représentant la projection au sol du poquet vu de dessus, ensuite, nous estimons le pourcentage de vide dans ce cercle par la méthode du point quadrat. La surface de sol couverte par ce poquet est obtenue en retranchant le pourcentage de vide de la surface du cercle mesurée;

- **L'indice foliaire:** L'indice foliaire est le rapport entre la surface des feuilles vertes et la surface du sol occupée par la plante. Le volume foliaire d'un poquet de mil étant très grand (on peut compter sur un poquet au stade de végétation maximal jusqu'à 170 feuilles de 50 à 80 cm de long et 3 à 5 cm de large en moyenne), nous mesurons à l'aide d'un planimètre "LICOR", la surface des feuilles vertes de 8 sous-échantillons de feuilles pris sur chacun des 8 poquets. Ces 8 sous-échantillons ainsi que le reste des feuilles de chaque poquet sont séchés à l'étuve (80 °C pendant 48 heures). La surface d'une feuille et son poids sec étant reliés linéairement (Aase 1978, Chanda et al. 1985), nous déterminons la surface spécifique (rapport entre la surface d'une feuille et son poids sec) de chaque sous-échantillon. Le calcul de la surface foliaire du poquet est fait en multipliant le poids de matière sèche des feuilles vertes de chaque poquet par sa surface spécifique. La surface des 8 poquets ainsi calculée est rapportée à la surface du sol occupée par ces 8 poquets;

- **La matière sèche aérienne:** chaque poquet prélevé est décortiqué de manière à séparer les feuilles vertes, les feuilles mortes, les tiges et les épis. Les gaines sont conservées avec les tiges. Après

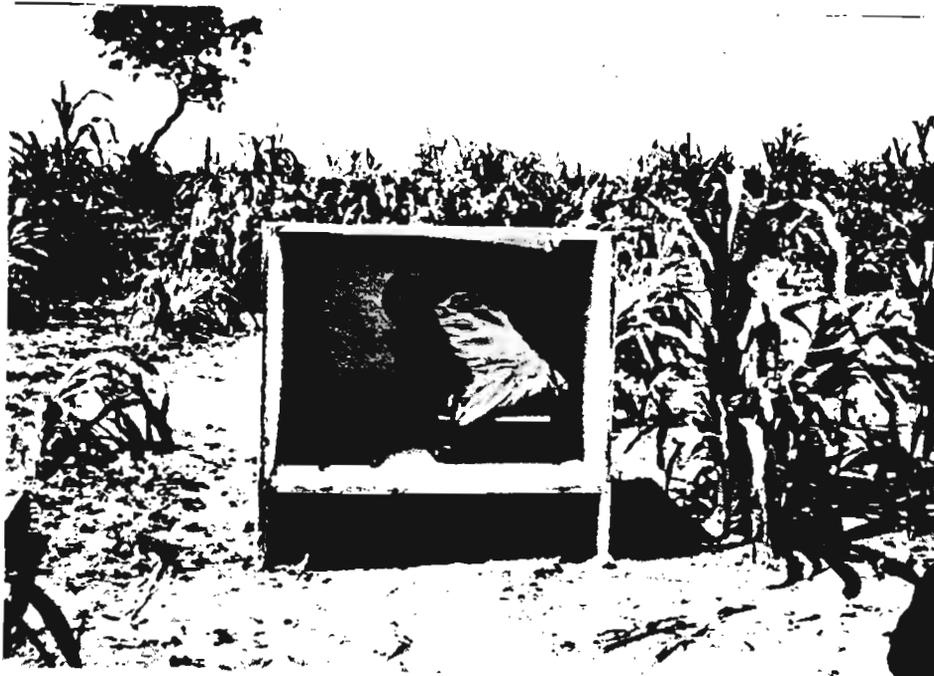


Photo 1: Mesure au champ du poids humide des feuilles de mil.



Photo 2: Description du profil racinaire du mil.

mesure sur le terrain du poids frais de ces différents organes (photo 1), un séchage à l'étuve à 80 °C pendant 48 heures est effectué. La matière sèche aérienne est la somme des poids secs des feuilles vertes et mortes, des tiges et des épis;

- La durée des différentes phases de développement du mil est notée (phase végétative, de reproduction et de maturation);

- L'évolution de la longueur et du poids sec des épis, ainsi que le rendement en grains sont également notés. Le calcul du rendement est fait sur 4 placettes carrées de 5 m de côté chacune. Chaque placette provenant d'une des 4 grandes zones d'hétérogénéité définies au début du cycle.

3.3.1.2 CARACTERISATION DU SYSTEME RACINAIRE.

Les mesures effectuées consistent, en la notation du profil racinaire, la profondeur du front racinaire et le poids de la matière sèche racinaire dans le premier mètre cube de sol autour du poquet. Ces mesures sont réalisées tous les 7 jours, sur 2 poquets en 1991 et sur un poquet en 1992.

+ Technique Utilisée: (photo 2)

Nous avons utilisé la technique de la grille à mailles carrées de 5 cm (Chopart, 1989). Cette méthode consiste à dégager une paroi verticale située à une distance connue de la ligne de semis. Les racines sont dénudées sur quelques millimètres afin de faciliter leur visualisation. Puis on applique sur la surface dégagée une grille constituée de mailles carrées de 5 cm, dont la position est elle aussi repérée dans l'espace afin que chacun des petits carrés de la grille soit à une distance connue de la surface du sol et du pied. Enfin nous comptons le nombre de racines observées dans chaque carré. Nous avons utilisé une échelle de notation à 5 valeurs pour simplifier les observations (Photo 2). Le front racinaire correspond au dernier plan horizontal de part et d'autre du poquet où l'on observe encore des racines.

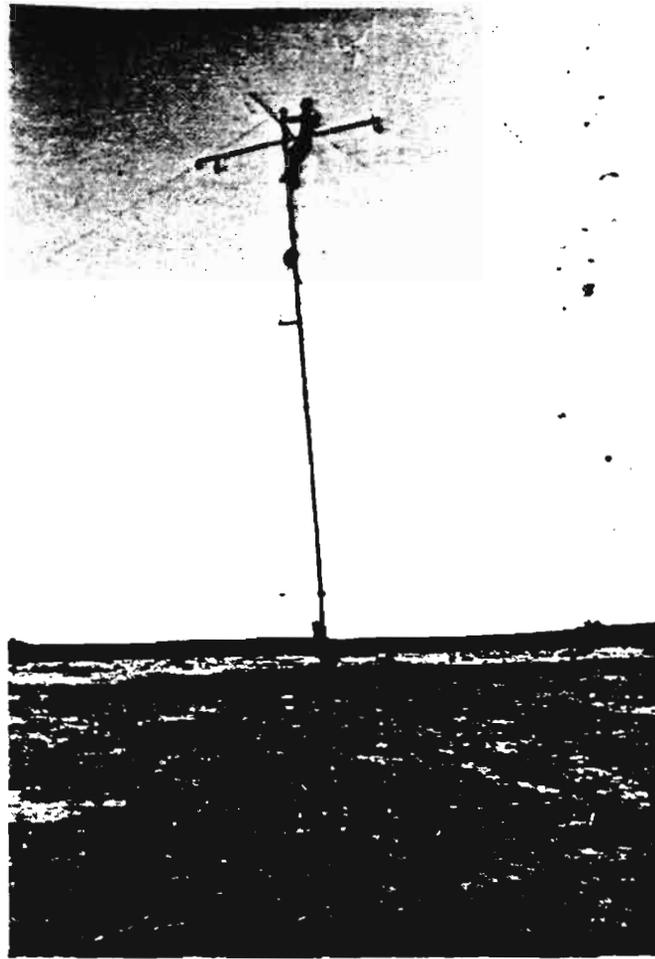


Photo 3: Dispositif de mesure des flux au dessus de la culture.



Photo 4: Dispositif de mesure des flux de la surface du sol nu.

Note 0: absence de racines	$x = 0$
Note 1: racines rares	$1 \leq x < 3$
Note 2: racines peu abondantes	$3 \leq x < 6$
Note 3: racines abondantes	$6 \leq x < 10$
Note 4: racines très abondantes	$x \geq 10$

X = nombre de racines par mailles de 5cm * 5cm

3.3.2 MESURES MICROMETEOROLOGIQUES.

3.3.2.1 DISPOSITIF MICROMETEOROLOGIQUE

Le dispositif micrométéorologique comprend:

- Un parc climatique installé à Banizoumbou (à environ 1.5 km du "mil Bas-fond") où les mesures de base sont réalisées: rayonnements global (Rg), diffus (Rd), photosynthétiquement actif (PAR), la température, l'humidité relative, la pression de vapeur d'eau de l'air, la température de la partie superficielle du sol (2 cm), la vitesse et la direction du vent. L'évapotranspiration potentielle standard ETo et l'ETP Penman sont calculés;
- Trois stations de mesure des flux (rayonnement, chaleur sensible et latente), dont 2 au niveau du "mil bas-fond", et une sur la "jupe sableuse". L'une des stations du "mil bas-fond", est constituée d'un grand mât haubané de 12 mètres portant les différents capteurs de mesure de flux au dessus du couvert (Photo 3), l'autre est faite d'un petit mât de 2 mètres portant des capteurs mesurant les flux au niveau du sol nu: "micro-Bowen" (Photo 4). La station de la "jupe sableuse" mesure également les flux de chaleur sensible et latente au dessus de la culture. La nature et la position des capteurs sur chaque site sont mentionnées sur le tableau 4. Le fetch est d'environ 250 m pour les 2 grands mâts du "mil Bas-fond" et de la "jupe sableuse". La technique de mesure des flux utilisée est celle du bilan d'énergie-rapport de Bowen (chapitre 212). Les mesures des gradients de température et d'humidité se faisaient à 0,5 m et 2,5 m au dessus de la surface de la culture sur les grands mâts, et à 0,25 m et 0,90 m au dessus de la surface du sol nu pour

Tableau 4: Nature et position des capteurs sur les sites

PARAMETRE (instrument de mesure)	MIL "BAS-FOND" 13°33'408 N 02°39'636 E		MIL "JUPE- SABLEUSE" 13°33'488 N 02°40'931 E
	Ensemble du couvert	sol interca- laire	
Sur le mât			
Rayonnement réfléchi (pyranomètre KZ inver sé: 380-3000 nm)	12 m		
Rayonnement net (Pyrradiobilanmètre Q6 380-90.000 nm)	12 m	1 m	12 m
Température de surfa- ce du couvert. (radiothermomètre EVEREST)	12 m	1 m	12 m
Profil température de l'air. (Thermoc. Cu-const.)	variable avec la croissance du mil	0.25 - 0.90 m	variable avec la croissance du mil.
Profil humidité air (Hygromètre Vaisala)	variable avec la croissance	0.25 - 0.90 m	variable avec la croissance
Vitesse du vent (Vector Inst. A100R)	7 m		7 m
Acquisition(CAMPBELL CR10) X X X			
Dans le sol			
Flux conductif dans le sol. (Fluxmètres)	un à 0.03 m	Trois à 0.03m	Trois à 0.03m
Températures dans le sol. (Thermocouples Cu-Const.)	0.00 ; 0.03 ; 0.05 ; 0.10 ; 0.20 ; 0.50 ; 1.00 m		0.00 ; 0.02 ; 0.05 ; 0.20 ; 0.50 ; 1.00 ; 1.50 m

le "micro-Bowen". La température de l'air est mesurée à l'aide de thermocouples cuivre-constantan, et la pression de vapeur d'eau de l'air à l'aide d'un hygromètre ("HMP35A; Vaisala sensor system") muni d'une pompe aspirant alternativement l'air au 2 niveaux précités. La scrutation est effectuée toutes les 10 secondes et les moyennes sur 20 minutes sont stockées sur une acquisition du type CR10. Ces mesures ont été réalisées de 8 h à 18 h pour la période du 17 juin au 31 Août en 1991, et 24 heures sur 24 du 6 juillet au 19 octobre en 1992. L'alimentation électrique est fournie par des batteries 12 volts chargées en continu par des panneaux solaires. L'ensemble des capteurs ont été étalonnés avant et après l'expérimentation, par comparaison avec des capteurs de référence. Les précisions de mesure données par les constructeurs sont de l'ordre de 5 % pour le rayonnement global, 6 % pour le rayonnement net, 5 % pour le flux conductif dans le sol, ± 0.1 °C pour les mesures de températures à l'aide de thermocouples, et 1 % pour la vitesse du vent.

3.3.2.2 MESURES DE LA RESISTANCE STOMATIQUE ET DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DES FEUILLES DE MIL.

Les résistances stomatiques et les températures de surface des feuilles étaient mesurées à l'aide d'un poromètre "DELTA T Device" emprunté à l'Institut de Radio Isotope de l'Université de Niamey. Des cinétiques journalières sont effectuées à 3 niveaux verticaux sur 4 pieds de mil choisis à chaque fois dans le lot. Pour chaque niveau, les mesures sont faites suivant les 4 orientations géographiques, sur la face inférieure et supérieure de la feuille. La moyenne harmonique pour les 2 faces de la feuille et arithmétique pour l'ensemble des feuilles est retenue comme résistance stomatique des feuilles du couvert. Les mesures de LAI sont utilisées pour calculer la résistance d'origine stomatique du couvert. Les mesures de températures de surface des feuilles sont en plus faites avec des thermocouples fins collés sur la face inférieure de la feuille. Ces thermocouples sont câblés sur une centrale d'acquisition de données type CR10.

Chapitre 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

Chapitre 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

4.1 EVALUATION ET MODELISATION DES CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES

4.1.1 CARACTERISATION DU SYSTEME AERIEN

Le démarrage de la saison des pluies à Banizoumbou a été précoce en 1991 et tardif en 1992 (figure 13). En 1991, Les semis ont été réalisés dès le 14 Avril après une pluie de 26 mm, les observations phénologiques ont commencé à partir du 53^{ème} jour après semis et se sont poursuivies jusqu'à la maturation, la densité des poquets était de 6800 poquets/ha sur le "mil bas-fond". En 1992, trois semis successifs ont dû être réalisés au niveau du bas-fond: un premier semis le 10 juin mais sans émergence deux semaines après; en effet, le cumul des pluies du 4 juin (8mm) et du 6 juin (6.5 mm) n'était pas suffisant pour favoriser la levée des jeunes plants, un deuxième semis le 30 juin après une pluie de 23 mm sur le site (les plants ont émergé 3 à 4 jours plus tard), et un semis complémentaire le 11 juillet pour remplacer les poquets manquants. Nous avons retenu la date du 30 juin 1992 comme date de semis sur le "mil bas-fond". Les observations phénologiques se sont déroulées à partir de cette date jusqu'à la maturation, la densité des poquets était de 7040 poquets/ha au niveau du bas-fond. La caractérisation du système aérien est présentée suivant les 3 phases du cycle de développement du mil: phase végétative, phase reproductrice et phase de maturation.

4.1.1.1 LA PHASE VEGETATIVE

La phase végétative chez le mil se caractérise par les processus d'émission des talles et des feuilles, ainsi que par la croissance de ces dernières. Elle peut inclure les deux principales

phases de croissance (tallage et montaison) pour les variétés à cycle tardif.

*** Le tallage et l'émission des feuilles.**

Le tallage commence habituellement chez le mil vers le 10^{ème} jour après la levée, quand les 4 à 5 premières feuilles du maître brin apparaissent (Siband 1981, Lambert 1983). Les noeuds de la base du maître brin forment un plateau de tallage d'où vont émerger les talles primaires. De l'aisselle des premières feuilles des talles primaires, peut démarrer un tallage secondaire environ 7 jours après le démarrage du tallage primaire. Les figures 19 et 20 représentent respectivement, l'évolution du nombre de talles par poquet en 1991 et 1992, et celle du nombre de feuilles par talle en 1992. On observe 2 phases bien distinctes aussi bien pour le tallage que pour l'émission des feuilles: une phase de multiplication, et une phase de régression des nombres de talles et de feuilles, avec un maximum de 16 à 17 talles par poquet et de 10 à 11 feuilles par talle, aux environs du 65^{ème} JAS. Comme l'a montré Lambert (1983), la multiplication des talles est indépendante quant à sa durée et à son rythme, de la durée du cycle de développement. Par contre, la quantité totale de talles émises peut extérioriser une différence entre 2 matériels. Des résultats obtenus à Bambey-Sénégal (Siband, 1981) et à l'ICRISAT-Niamey (Amadou et Fussel, 1987), confirment également cette observation tant que l'alimentation hydrique de la plante n'est pas limitante; cependant, en cas de manque d'eau (ICRISAT, 1984), cette durée peut être réduite de manière sensible (tableau 5). La chute du nombre de talles constatée, se traduit par un dessèchement des talles les plus jeunes, résultant de la concurrence entre ces dernières et les talles plus âgées vis à vis des facteurs trophiques. Cette aptitude qu'a le mil penicillaire de bloquer les jeunes talles en faveur des plus anciennes est semble-t-il à la base de la rusticité de cette plante qui lui confère une adaptation aux conditions d'alimentation hydrique les plus limitantes (Siband 1983). Vers la fin du cycle, le nombre de talles se stabilise à environ 6 talles par poquet. Seules ces talles produisent en fait des chandelles (épis): ce sont

Figure 19: Evolution temporelle du nombre moyen de talles par poquet: mil bas fond 1991 et 1992.

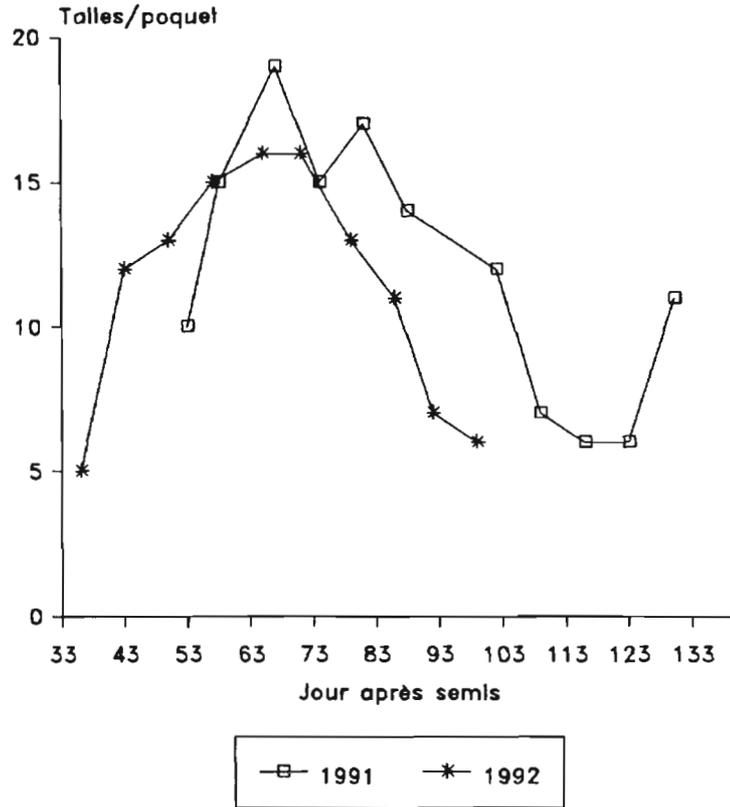
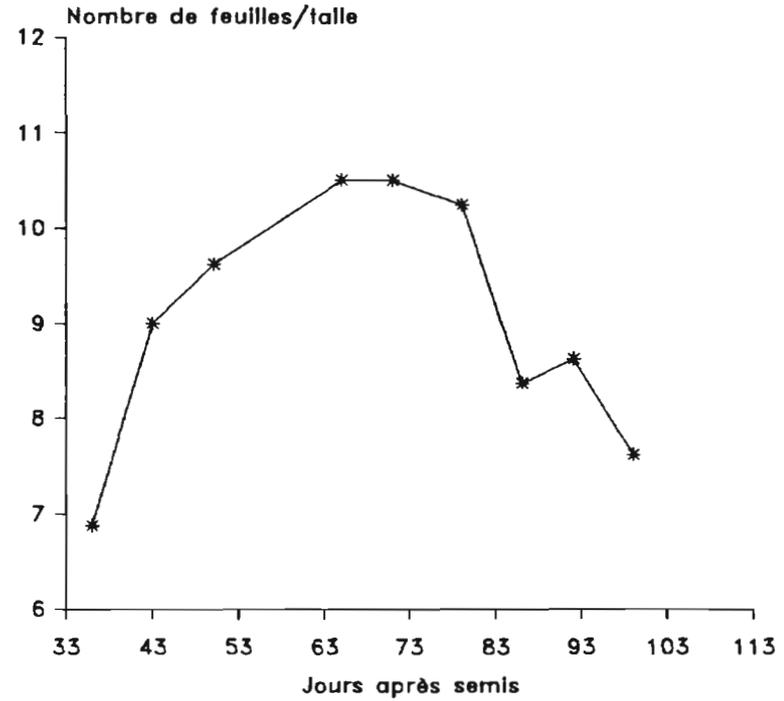


Figure 20: Evolution temporelle du nombre moyen des feuilles vertes par talle en 1992.



les "talles utiles". La reprise de tallage constatée après la floraison en 1991, est assez exceptionnelle car elle résulte des conditions d'alimentation hydrique assez favorables qui ont caractérisé la fin de cet hivernage. Les caractéristiques au tallage du "mil bas-fond", sont présentées sur le tableau 6.

Tableau 5: Durées de la période de tallage du mil obtenues sur 3 expériences

Site d'étude	Année	Pluie (mm)	Irrigation (mm)	Période de tallage (jours)
Bambey (station)	1978	630	0	30
Bambey (station)	1979	430	170	30
ICRISAT-CSI (station)	1984	260	0	23
ICRISAT-CSI (station)	1985	542	0	30
ICRISAT-CSI (station)	1986	657	0	30
Banizoumbou (champ paysan)	1991	522	0	27
Banizoumbou (champ paysan)	1992	420	0	33

Tableau 6: Caractéristiques de tallage du mil "Bas-fond"

	Nombre maximum de talles atteint	Nombre de talles portants des épis à la maturité	Vitesse de multiplication Vitesse de sénescence	
			Période (j.)	Nb. talles/j
1991	17 ±2	6 ±1	53 - 81	0.25
			81 - 116	0.31
1992	16 ±2	6 ±1	36 - 71	0.29
			71 - 99	0.34

*** Montaison**

La montaison correspond à un allongement des entre-noeuds des tiges de la plante. Elle se déroule en partie pendant la phase de tallage pour les mils précoces et au contraire après la fin tallage

Figure 21: Croissance en hauteur de la partie aérienne et progression du front racinaire du mil en 1991 et 1992:

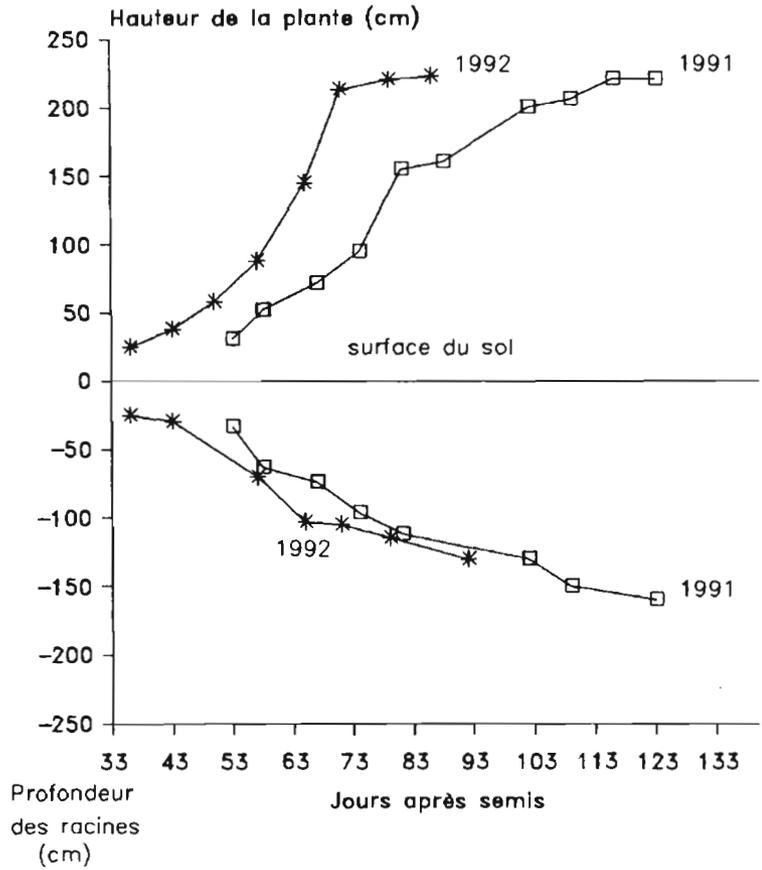
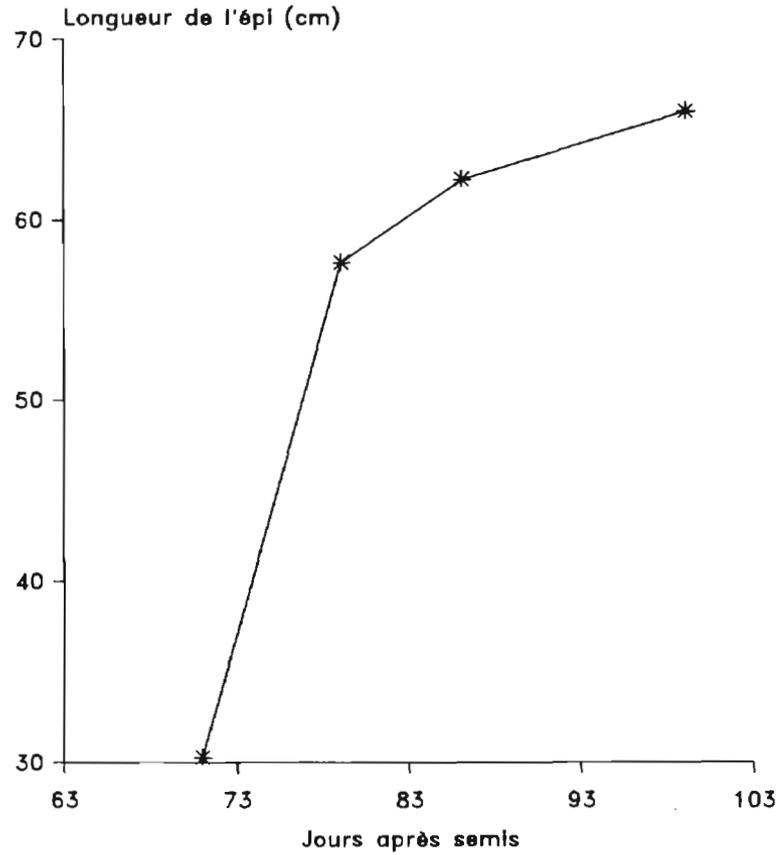


Figure 22: Evolution temporelle de la longueur de l'épi de mil en 1992.



pour les mils tardifs. Elle comprend habituellement 3 phases: une phase de croissance lente en début de cycle, jusqu'au 53^{ème} JAS sur la figure 21 (résultats 1992), une phase de croissance accélérée qui correspond à la période 53-73^{ème} JAS des mesures réalisées en 1992, et une phase de stabilisation de la croissance pendant la période reproductrice. La hauteur moyenne définitive des tiges est d'environ 220 cm. La phase de croissance lente coïncide avec la période de tallage, aussi la plante mobilise-t-elle tout son métabolisme pour la multiplication des talles d'abord, avant de le réorienter par la suite pour une croissance accélérée? La croissance de la chandelle est aussi lente dans une première phase, puis devient très rapide avant d'atteindre la taille finale moyenne de l'épi: 66 cm (figure 22).

* La Production de la matière sèche.

L'émission des talles et l'élongation des tiges se traduisent aussi par une augmentation de la matière végétale (figure 23). La croissance pondérale aérienne chez le mil présente successivement 3 phases: lente, accélérée, et ralentie. Sur la figure 23, on voit que la phase de croissance lente se termine vers le 53^{ème} JAS pour les données 1992, et la phase de croissance accélérée vers le 73-80^{ème} JAS pour les 2 campagnes. La phase de croissance ralentie se traduit par l'arrêt de croissance de la tige qui est compensée par une augmentation de la matière sèche des épis. Cette dernière croît de façon linéaire (figure 24). Les poids de la matière sèche des tiges et des feuilles vertes présentent des allures semblables sur tout le cycle, leur rapport est d'ailleurs proche de 1 en début de cycle. Vers la fin du cycle, les feuilles âgées des 1^{ères} talles se dessèchent, réduisant du coup le volume des feuilles vertes. La teneur moyenne en eau d'un poquet passe de sa valeur maximale de 3,5 kg à 2,3 kg d'eau en fin de cycle (figure 25). Le poids total de la matière sèche aérienne en fin de cycle est d'environ 6 tonnes à l'hectare, dont 2767 kg de tiges, 778 kg de feuilles vertes, 406 kg de feuilles mortes et 1854 kg d'épis.

Figure 23: Evolution dans le temps du poids de la matière sèche aérienne du mil en 1991 et 1992.

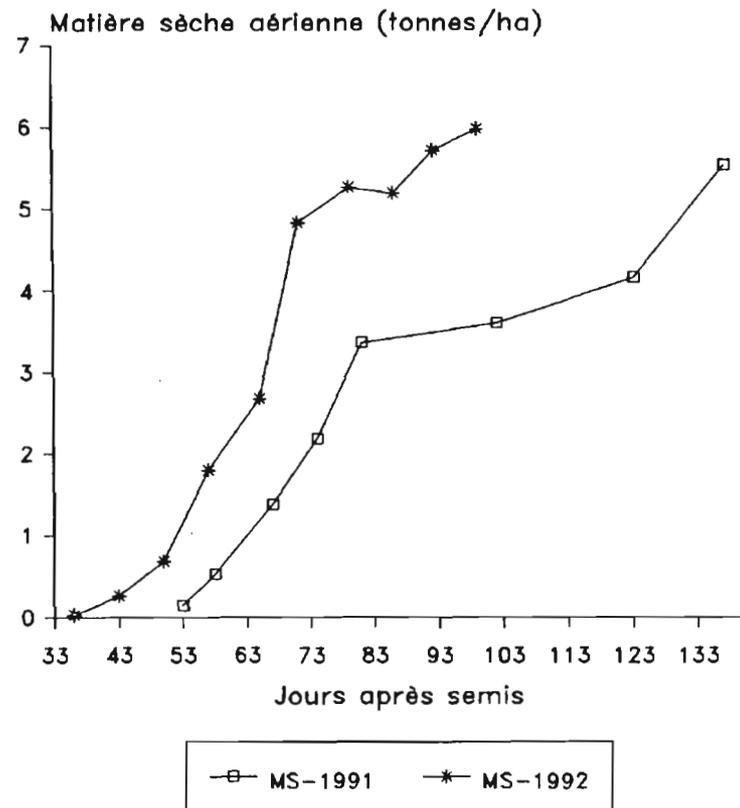


Figure 24: Croissance pondérale des différentes parties aériennes du mil: feuilles vertes et mortes, tiges, épis (1992)

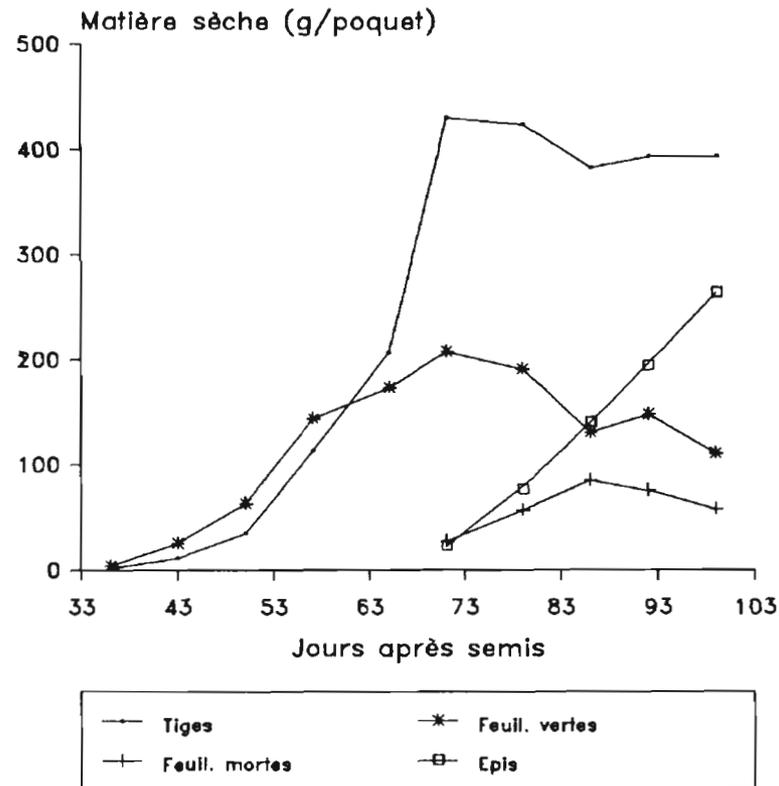
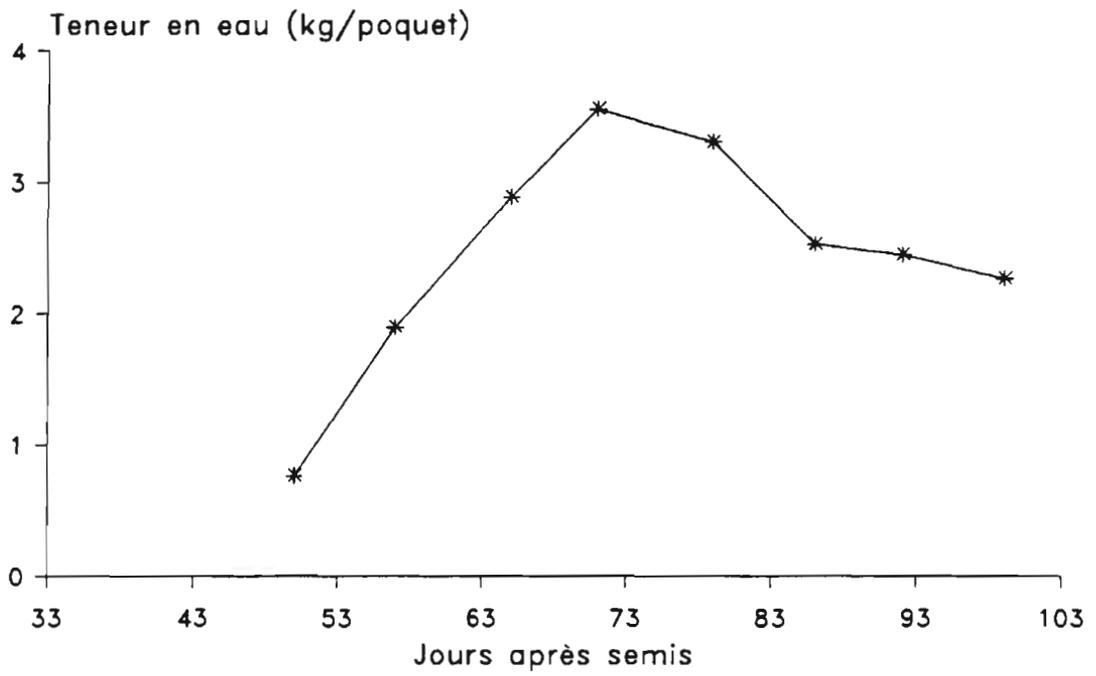


Figure 25: Evolution temporelle de la teneur en eau de la partie aérienne du mil en 1992.



* L'indice foliaire

L'indice foliaire ou LAI ("Leaf Area Index") donne une idée de l'importance du volume foliaire vert de la plante, il est le facteur primordial de la photosynthèse et de la transpiration chez le mil. De manière générale 3 phases de développement du LAI sont observées chez le mil (figure 26): accélérée, constante et déclinante. L'augmentation du LAI en début de cycle est liée à la multiplication du nombre de talles et de feuilles, et à l'élongation de ces dernières pendant la phase végétative. Quant à la réduction observée, elle s'explique non seulement par un dessèchement progressif des feuilles âgées des premières talles, mais aussi par l'élimination des jeunes talles en faveur des plus anciennes.

* Le degré de recouvrement du sol

Le mil est un couvert épars et poreux à l'intérieur des poquets. La surface de sol non couverte par la végétation joue un rôle important dans les différents processus d'échange d'énergie et de vapeur d'eau. Une estimation de l'évolution de cette surface au cours du cycle de la plante, à travers le degré de recouvrement est nécessaire pour comprendre ces échanges. L'évolution temporelle du degré de recouvrement suit à peu près l'évolution de l'indice foliaire (figure 27). En 1991 lorsque le mil était à son maximum de végétation, seulement 35 % de surfaces de sol étaient couvertes par la plante, contre 55 % en 1992. L'écart constaté entre les mesures 91 et 92 s'explique non seulement par la différence de densité de semis entre les deux saisons (6800 Poquets/ha en 91 contre 7040 Poquets/ha en 92), mais surtout par une répartition temporelle de la pluviométrie plus régulière en 1992 (figure 13).

Figure 26: Evolution au cours du cycle cultural de l'Indice foliaire (LAI) du mil: 1991 et 1992.

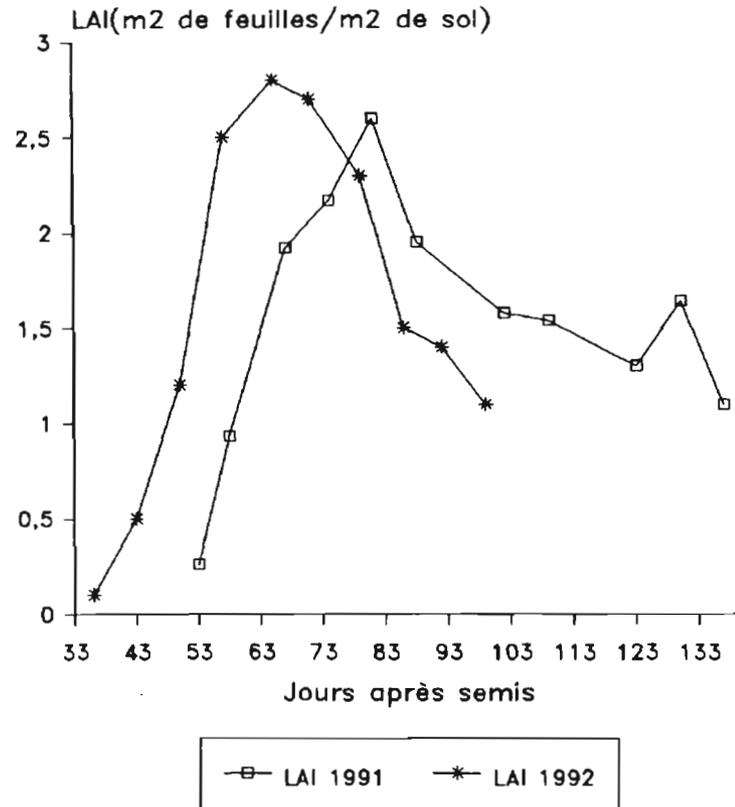
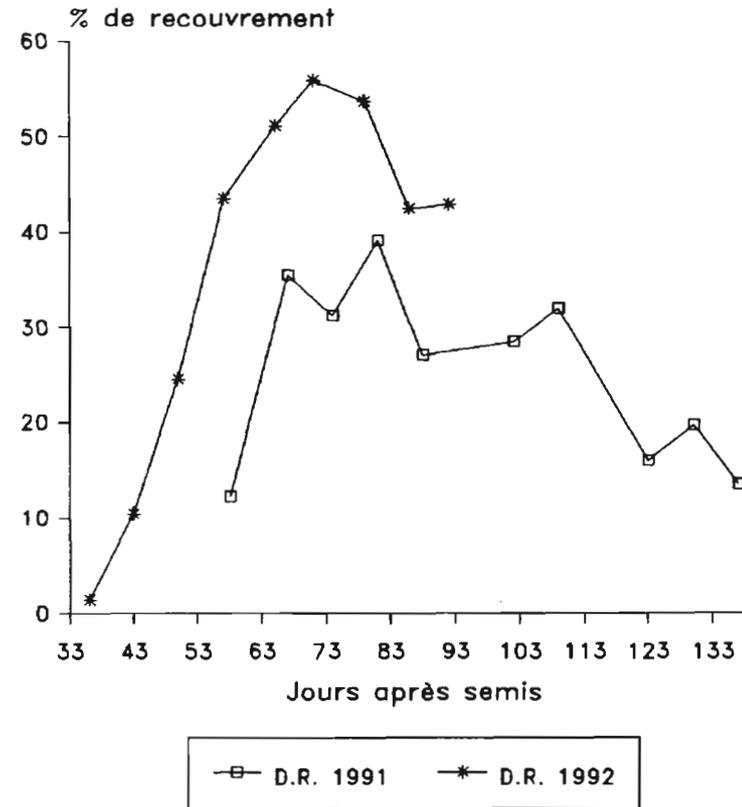


Figure 27: Evolution au cours du cycle cultural du pourcentage de recouvrement du sol par le mil: 1991 et 1992.



4.1.1.2 LES CARACTERISTIQUES DU MIL A LA FLORAISON ET A LA MATURATION.

Nous avons considéré le nombre de jours à 50 % de floraison mâle (inflorescences entièrement couvertes d'étamines) comme date de floraison. La date de maturation est également atteinte quand 50 % des épis de la parcelle considérée portent des grains secs et durs. Les caractéristiques à la floraison et à la maturation du mil que nous avons étudié en 1991 et 1992, sont récapitulées au tableau 7.

Tableau 7: Caractéristiques à la floraison et à la maturation du "mil Bas-fond".

	Nombre de jours à 50 %	Haut. tige (cm)	Long. épi (cm)	LAI	Dr (%)	Teneur en eau kg/pqt	Matière sèche (kg/ha)	Rdt grain kg/ha
Floraison	91	102	200	64	1.58	29	-	3600
	92	80	220	58	2.26	55	3.3	5259
Maturation	91	133	220	63	1.40	17	-	5533
	92	99	223	66	1.07	43	2.3	5972
écart-type #		±17	±8	±0.3	±2	±0.8	±1800	

écart-type de la moyenne des 8 poquets.

La floraison et la maturation ont été relativement tardives en 1991. A titre de comparaison, un essai conduit à l'ICRISAT (Amadou et Fussel, 1987) sur la variété locale de Sadoré et la variété améliorée CIVT a donné les résultats ci-dessous:

Tableau 8. Date de floraison et de maturation de deux variétés de mil, lors d'un essai en 1986 à l'ICRISAT (Pluviométrie = 657 mm)

	Nombre de jours à 50 % floraison	Nombre de jours à 50 % maturation
Locale	93	114
CIVT	74	101

Ces dernières dates de floraison et de maturation sont également apparues tardives par rapport aux cycles normaux des 2 variétés. Les raisons évoquées pour expliquer ce retard, sont la précocité des semis et la mauvaise répartition dans le temps des pluies. En fait, il est généralement admis que les dates de semis et les conditions d'insolation font varier la durée des cycles végétatifs des variétés (Santens, 1982). Les rendements en grains obtenus en 1991 (554 kg/ha pour 522 mm de pluie), sont proches de ceux qu'on observe habituellement en milieu paysan. L'écart entre ce rendement et celui de 1992 (1362 kg/ha pour 424 mm de pluie) illustre le rôle d'une bonne répartition temporelle de la pluviométrie.

4.1.2 CARACTERISATION DU SYSTEME RACINAIRE

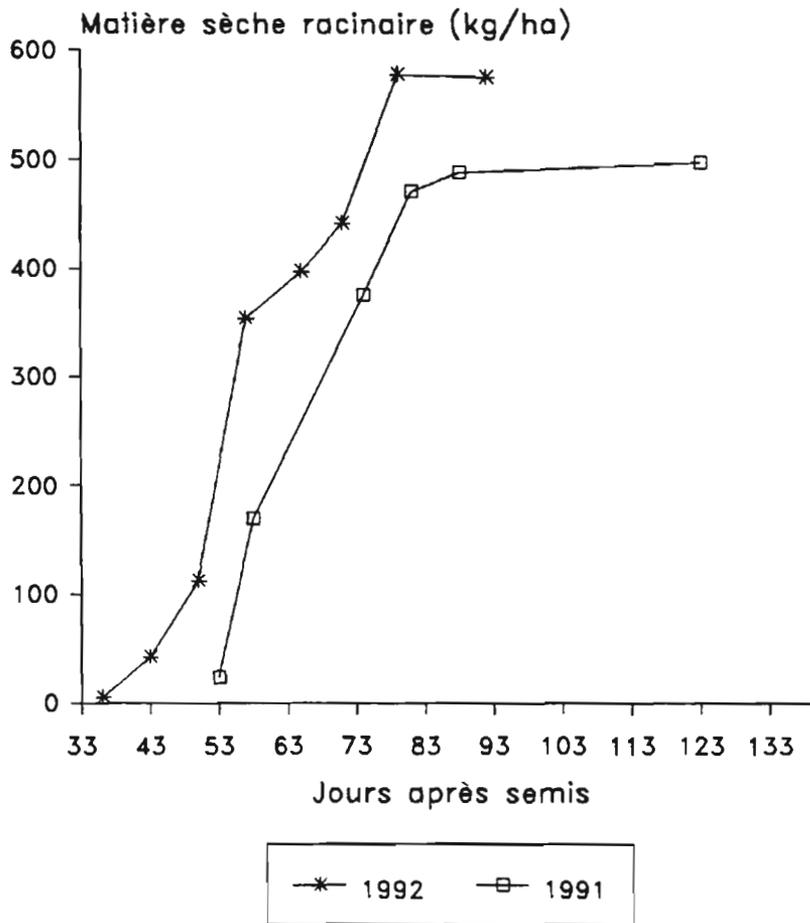
Les racines jouent un rôle fondamental dans la vie de la plante: rôle d'ancrage, d'absorption de l'eau et des éléments minéraux. Ainsi, pour comprendre le fonctionnement hydrique d'une plante, il faut non seulement une caractérisation de son système aérien, mais aussi celle de son système racinaire. Deux objectifs étaient visés à travers cette investigation: d'une part, avoir une idée du volume de sol prospecté par les racines à un stade de végétation donné, ce qui permettra de mieux quantifier le volume d'eau du sol participant effectivement à l'alimentation hydrique du mil; et d'autre part, quantifier la biomasse racinaire restant dans le sol après la récolte, ainsi que sa répartition spatiale dans le profil.

4.1.2.1 PROGRESSION DU FRONT RACINAIRE

Chopart (1983), a décrit la dynamique d'enracinement de la variété de mil Souna III au Sénégal, où il distingue 3 phases de croissance:

- Une phase de croissance lente jusqu'au 15^{ème} JAS, dominée par la progression du système séminal;

Figure 28: Croissance racinaire du mil:
Evolution du poids de la matière sèche
racinaire en 1991 et 1992.



- Une phase de croissance accélérée des racines nodales du 15^{ème} JAS jusqu'à la montaison avec une vitesse maximale de 3,5 cm/jour;
- Une phase de chute de la vitesse de croissance entre la fin de la montaison et la récolte.

En ce qui concerne la variété locale de Banizoumbou (figure 21), seules les 2 dernières phases sont représentées en raison du démarrage tardif des observations. La croissance est plus rapide en 1992 qu'en 1991, par contre, le front racinaire est plus profond en 1991. La profondeur maximale atteinte par les racines est de 160 cm en 1991 et 130 cm en 1992. Cette différence de comportement du système racinaire durant les 2 campagnes peut s'expliquer par la bonne continuité temporelle de la pluviométrie qui a caractérisée la saison 92, et qui avait manqué en 1991. Par ailleurs, on peut noter une progression du front racinaire de la floraison à la maturation en 1991. Ces résultats rejoignent ceux de Marini et al. (1988), qui ont mis en évidence l'existence d'une importante néogenèse racinaire post-florale du mil sous stress hydrique. Les investigations doivent continuer dans ce domaine avec un échantillonnage plus important, afin de faire la part des rôles joués par le matériel végétal et les conditions physiques du milieu d'étude.

4.1.2.2 LA CROISSANCE PONDERALE DES RACINES

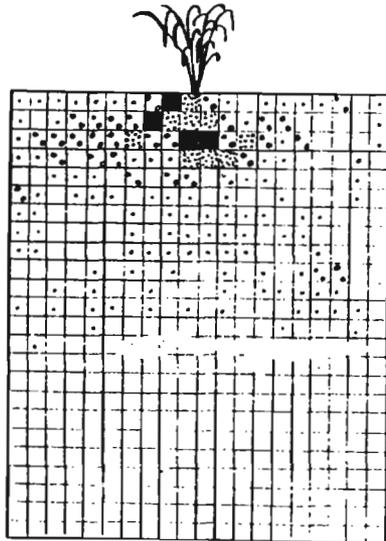
La croissance du poids sec des racines se fait habituellement en 3 phases chez le mil (Chopart, 1980): lente, accélérée et constante. Sur la figure 28 on observe, une phase de croissance accélérée du 53^{ème} au 81^{ème} JAS, et une phase de stagnation du poids de la matière sèche racinaire à environ 500 kg/ha en 1991 et 600 kg/ha en 1992. Ces valeurs représentent l'apport de matière organique sous forme de biomasse racinaire restant dans le sol après la récolte. Elles sont légèrement supérieures à la valeur proposée par Chopart (1983): 350 à 400 kg/ha. Il semble que l'apport réel de matière organique au sol provenant de la biomasse racinaire du mil, dépasse de 30 à 50 % cette valeur. Ceci, à cause de la dégénération d'une importante partie du système racinaire en cours de végétation (Allard, 1980: in Chopart, 1983). Cette

Figure 29: Relevé des profils racinaires par la méthode de la grille à mailles carrées de 5 centimètres.
(Banizoumbou, 1991)

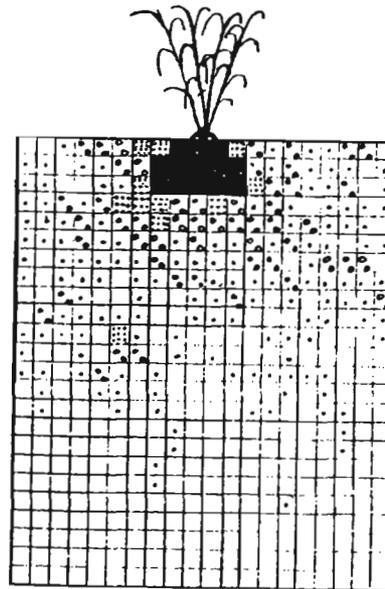
LEGENDE: échelle de notation à 5 valeurs
X = nombre de racines par maille carrée de 5 cm de côté

■	Note 4 = racines très abondantes	$X \geq 10$
▣	Note 3 = racines abondantes	$6 \leq X < 10$
◻	Note 2 = racines peu abondantes	$3 \leq X < 6$
◻	Note 1 = racines rares	$1 \leq X < 3$
◻	Note 0 = absence de racines	$X = 0$

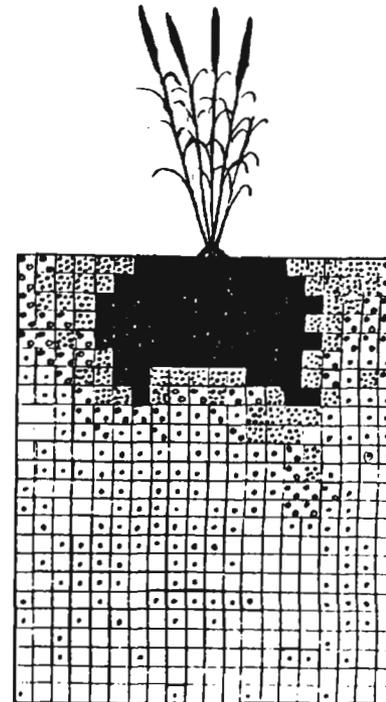
a) 58^{ème} jour après semis



b) 74^{ème} jour après semis



c) 133^{ème} jour après semis
(maturation)



restitution au sol de matière organique en provenance des racines de mil paraît faible par rapport à la matière organique totale du sol, mais elle est loin d'être négligeable, ajoute Chopart qui donne l'exemple d'un sol sableux du Sénégal, où l'apport de matière organique provenant des résidus de racines de mil et d'arachide représente 5 à 8 % de la matière organique totale de ce sol.

4.1.2.3 LE PROFIL RACINAIRE DU MIL

Nous avons choisi 3 profils racinaires parmi les 15 que nous avons ouverts en 1991, pour illustrer l'évolution de la colonisation racinaire du sol. Ces 3 profils sont :

- Un profil au 58^{ème} JAS (figure 29.a);
- Un profil au 74^{ème} JAS (figure 29.b);
- Un profil à la maturité (figure 29.c).

Au 58^{ème} JAS les racines sont peu abondantes, cependant une couronne est déjà formée juste au niveau du pieds dans les 15 premiers cm du sol (figure 29.a). A ce stade, les racines prospectent déjà le sol à plus de 50 cm de part et d'autre de la ligne de semis. La couronne s'élargit au 74^{ème} JAS et la densité racinaire augmente dans le premier mètre cube de sol autour du pieds (figure 29.b), environ 45 % des racines du profil sont dans les 20 premiers cm de profondeur du sol. La floraison se traduit par une augmentation du volume de la couronne aussi bien en profondeur que de part et d'autre de la ligne de semis. La colonisation du sol par les racines qui était encore disparate en dessous de 20 cm de profondeur, prend de l'importance. A la maturité, le système racinaire atteint son stade de développement maximum lui permettant une utilisation optimum des réserves hydriques du sol (figure 29.c). A ce stade, un pieds de mil compte en moyenne 200 racines nodales, dont 33 sur les tiges sans chandelle et 167 sur les tiges avec chandelle. Chopart en a compté 262 racines par pieds de mil.

4.1.3 MODELISATION DES CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES.

La modélisation des paramètres biologiques a été envisagée, pour minimiser l'influence des fluctuations d'échantillonnage et permettre une interpolation entre dates de mesures dans une optique d'utilisation conjointe des mesures biologiques et bioclimatiques.

4.1.3.1 LOI DE VARIATION AVEC LE TEMPS DES PARAMETRES BIOLOGIQUES.

Nous avons procédé à l'ajustement des variations temporelles des paramètres biologiques à des lois mathématiques, ce qui nous permettra d'analyser les variations instantanées par dérivation des fonctions ajustées. L'échelle de temps considérée est le nombre de jours après semis (JAS). Les ajustements ont été faits sur les données 1992, en condition de croissance régulière. Les paramètres biologiques étudiés peuvent être classés en 2 catégories: ceux dont l'évolution temporelle suit une loi de GAUSS: Nombres de feuilles et de talles, indice foliaire et degré de recouvrement (en effet il est généralement admis chez les graminées que le taux d'apparition des feuilles est en général égal au taux de sénescence (Bean 1964, dans Jewis 1966)), et ceux dont l'évolution temporelle se fait suivant un modèle logistique: hauteur de la plante, la profondeur racinaire et les poids de matière sèche aérienne et racinaire. Ces 2 types de lois de croissance sont formulées au tableau 9. Les comparaisons entre valeurs mesurées et estimées sont représentées sur les figures 30 et 31.

Par dérivation de la fonction logistique, on obtient les formulations des vitesses de croissance représentées sur les figures 32 et 33. Les vitesses de croissance ainsi représentées extériorisent mieux le rythme de croissance du mil. Au début du cycle, les racines croissent plus vite que les tiges permettant ainsi à la plante de mieux s'ancrer au sol pour relancer la croissance aérienne (figure 32). La vitesse maximale de croissance linéaire des racines (3 cm/j) est atteinte vers le 53^{ème} JAS, tandis que celle des tiges (6 cm/j) est atteinte 10 jours plus

Tableau 9: Ajustement à des lois mathématiques connues des évolutions temporelles des paramètres biologiques.

- Fonction de GAUSS:

$$Y = (a/(b*(2\pi)^{0.5})) * \text{EXP}(-0.5*((X-c)/b)^2) \quad (36)$$

(Nombre de talles par poquet et nombre de feuilles par talles)

- Fonction de GAUSS avec le logarithme décimal des abscisses

$$Y = (a/(b*(2)^{0.5})*\text{EXP}(-0.5*((\text{LOGX}-c)/b)^2)) \quad (37)$$

(LAI et degré de recouvrement du sol)

- Modèle logistique:

$$Y = a/(1+b*\text{EXP}(-c*X)) \quad (38)$$

(Hauteur, profondeur racinaire, Matière sèche aérienne et racinaire)

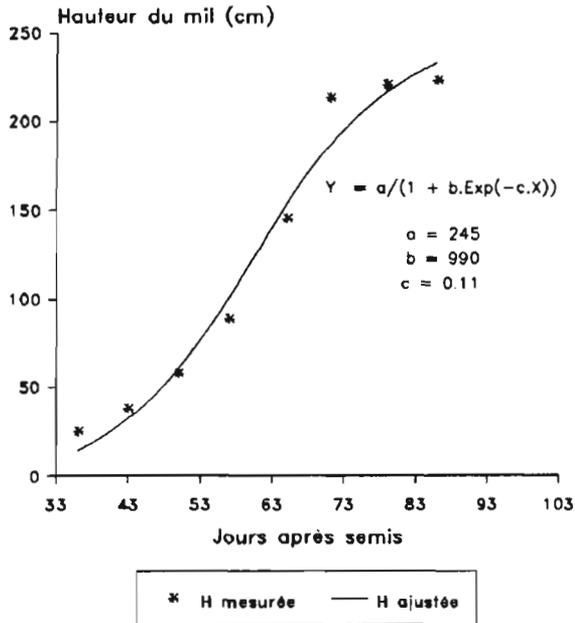
X = Nombre de jours après semis (JAS).

Y = variable biologique.

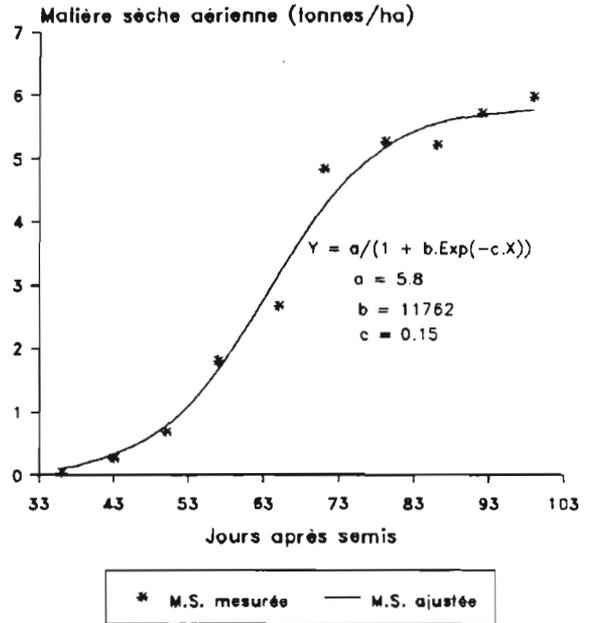
Variable Y (unité)	Type de modèle coefficient de détermination	Paramètres du modèle
Indice foliaire (m2 feuil./m2 sol)	Fonction de GAUSS 0.97	a = 0.769 b = 0.109 c = 1.827
Degré de recouvrement (%)	Fonction de GAUSS 0.99	a = 17.733 b = 0.127 c = 1.857
Nombre de talles par poquet	Fonction de GAUSS 0.93	a = 910 b = 22 c = 65
Nombre de feuilles par talle	Fonction de GAUSS 0.79	a = 997 b = 37 c = 67
Hauteur de la plante (cm)	Modèle logistique 0.98	a = 245 b = 990 c = 0.11
Profondeur du front racinaire (cm)	Modèle logistique 0.99	a = 132 b = 142 c = 0.09
Poids de la matière sèche aérienne (tonnes/ha)	Modèle logistique 0.99	a = 5.80 b = 11762 c = 0.15
Poids de la matière sèche racinaire (kg/ha)	Modèle logistique 0.96	a = 562 b = 4942 c = 0.15

Figure 30:

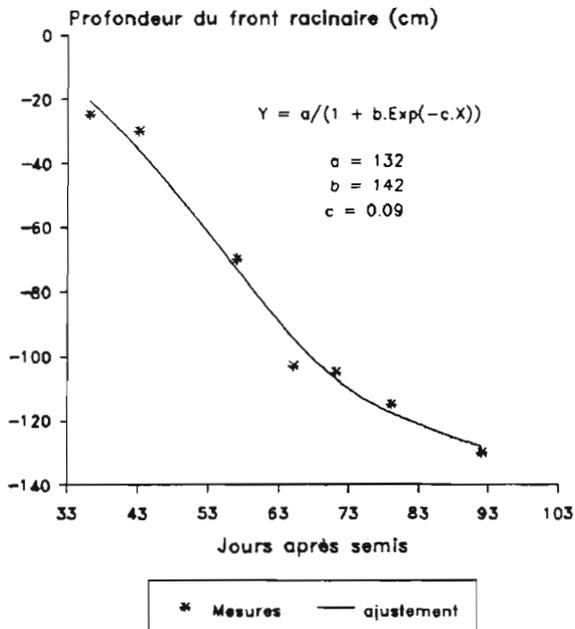
(a): Ajustement à une fonction logist- que des mesures-1992 de la hauteur moyenne du mil.



(b): Ajustement à une fonction logisti- que des mesures-1992 du poids de la matière sèche aérienne du mil.



(c): Ajustement à une fonction logisti- que des mesures-1992 de la profondeur du front racinaire du mil.



(d): Ajustement à une fonction logisti- que des mesures-1992 du poids de la matière sèche racinaire du mil.

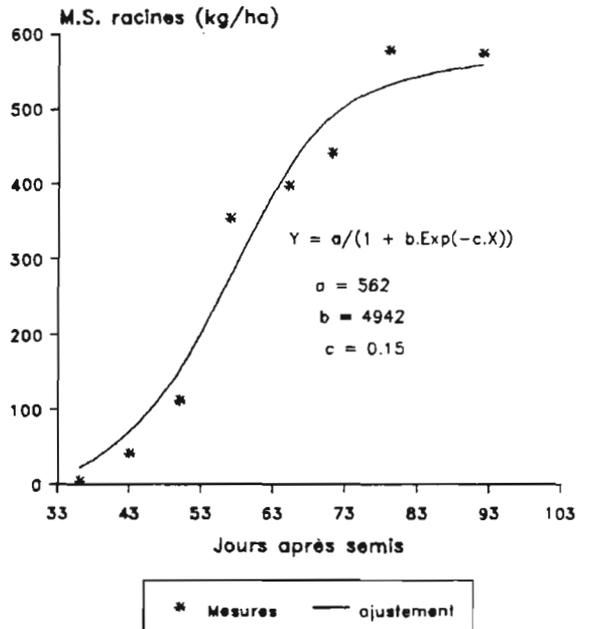
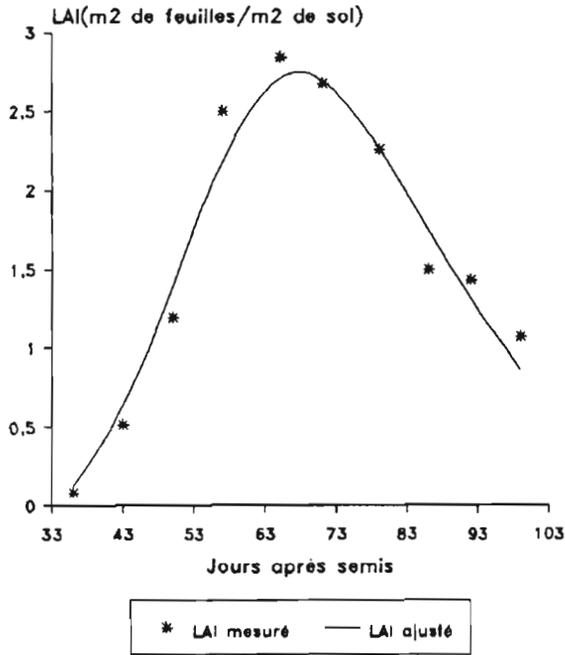
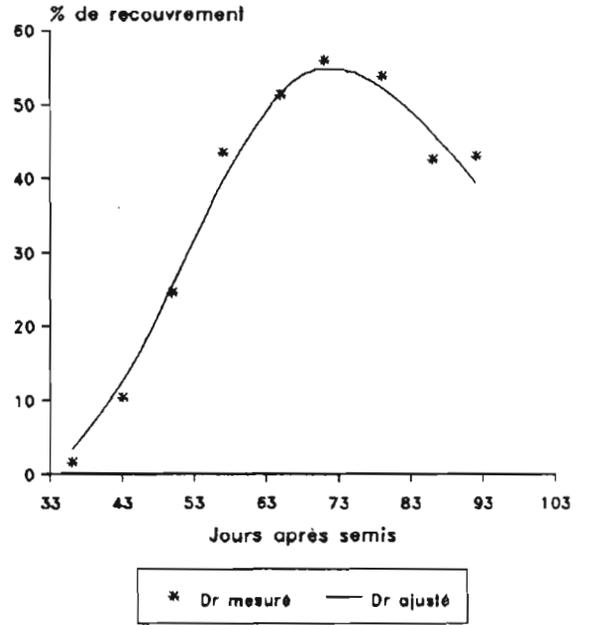


Figure 31:

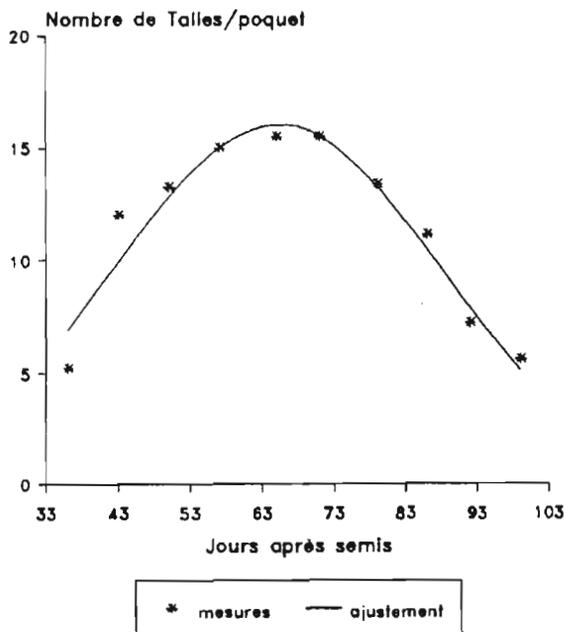
(a): Ajustement des mesures de LAI-1992 à une fonction de GAUSS.



(b): Ajustement à une fonction de GAUSS des mesures-1992 du degré de recouvrement du sol par le mil.



(c): Ajustement à une fonction de GAUSS de l'évolution du nombre de tiges par poquet de mil en 1992.



(d): Ajustement à une fonction de GAUSS de l'évolution du nombre de feuilles par tige de mil en 1992.

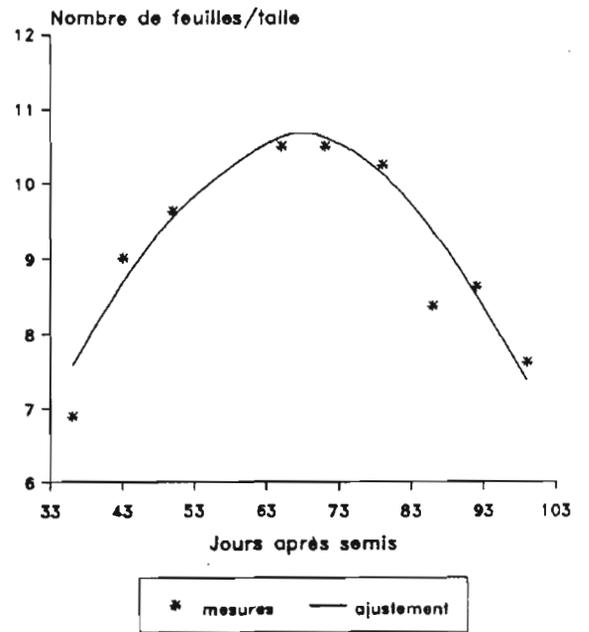


Figure 32: Vitesses de croissance linéaire des tiges et des racines de mil en 1992.

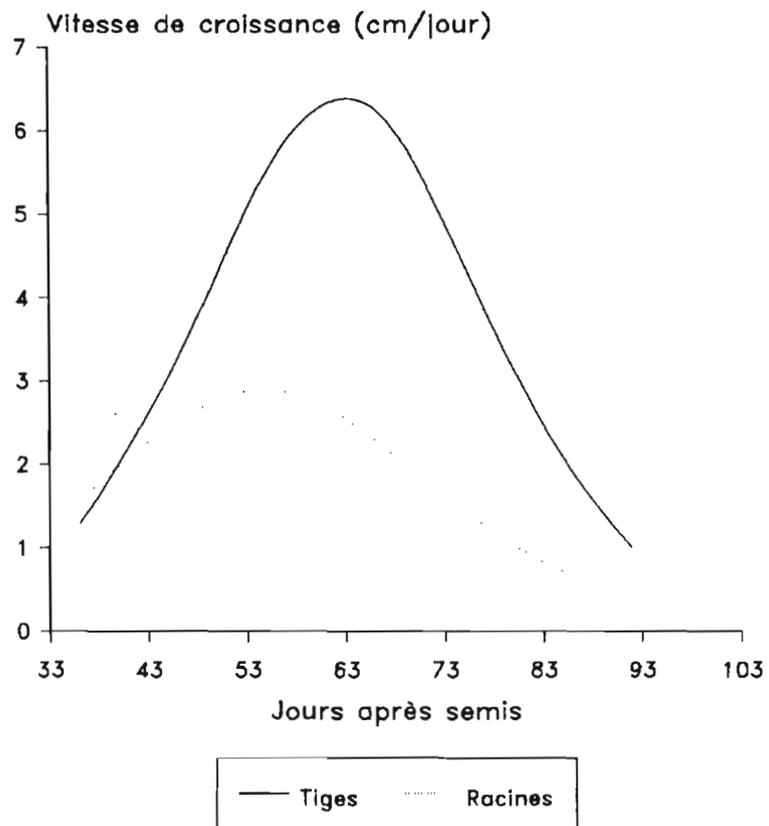
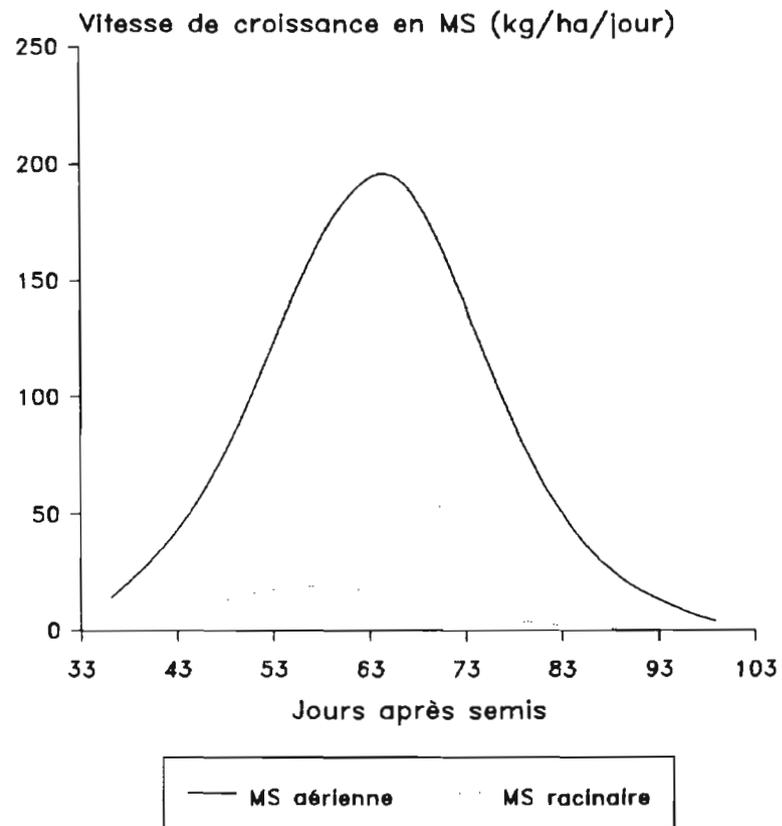


Figure 33: Vitesse de croissance pondérale des parties aérienne et racinaire du mil en 1992.



tard. La vitesse de croissance pondérale de la partie aérienne atteint 200 kg/ha/j (figure 33), très loin du record observé chez cette plante: 540 kg/ha/j avec un rayonnement solaire global de 21 M.J/m²/j (Ferraris 1973, in Siband 1981). Dans nos conditions expérimentales le rayonnement global est du même ordre de grandeur (figure 14).

4.1.3.2 DETERMINATION DE LA SURFACE DES FEUILLES DE MIL.

La surface des feuilles d'un couvert peut être soit mesurée directement à l'aide d'un planimètre ou bien estimée à partir de relations proposées dans la littérature. Les mesures réalisées au planimètre sont destructrices et coûteuses en temps. Pour pallier ces contraintes, certains auteurs ont proposé des relations permettant d'estimer la surface d'une feuille connaissant ses dimensions linéaires ou son poids sec. Ces relations très souvent de type empirique sont difficilement applicables à d'autres variétés que celles pour lesquelles elles ont été établies.

*** Estimation de la surface des feuilles à partir de leur poids sec.**

Plusieurs auteurs (Aase 1978, Chanda et al. 1985, Begue 1991) ont montré qu'il existe une relation linéaire positive entre la surface d'une feuille et sa biomasse sèche, ce qui est vérifié avec nos données (figure 34). En effet, le rapport entre la surface des feuilles et leur poids sec ou surface spécifique, habituellement compris entre 150 et 300 cm²/g chez les graminées (Maas 1991, in Troufleau 1991) varie au cours d'un cycle cultural suivant l'éclairement, la température et l'âge des feuilles (Friend 1966, Blackman 1956). Cependant, on peut noter une stabilisation de la surface spécifique autour de 168 cm²/g chez le "mil bas-fond" à la fin de la phase végétative lorsque les feuilles atteignent leur taille définitive (figure 35). La surface spécifique de la variété améliorée CIVT est de 144 cm²/g. Ces résultats confrontés à ceux

Figure 34: Relation entre la surface des feuilles vertes du mil et leur poids sec (Banizoumbou, 1991)

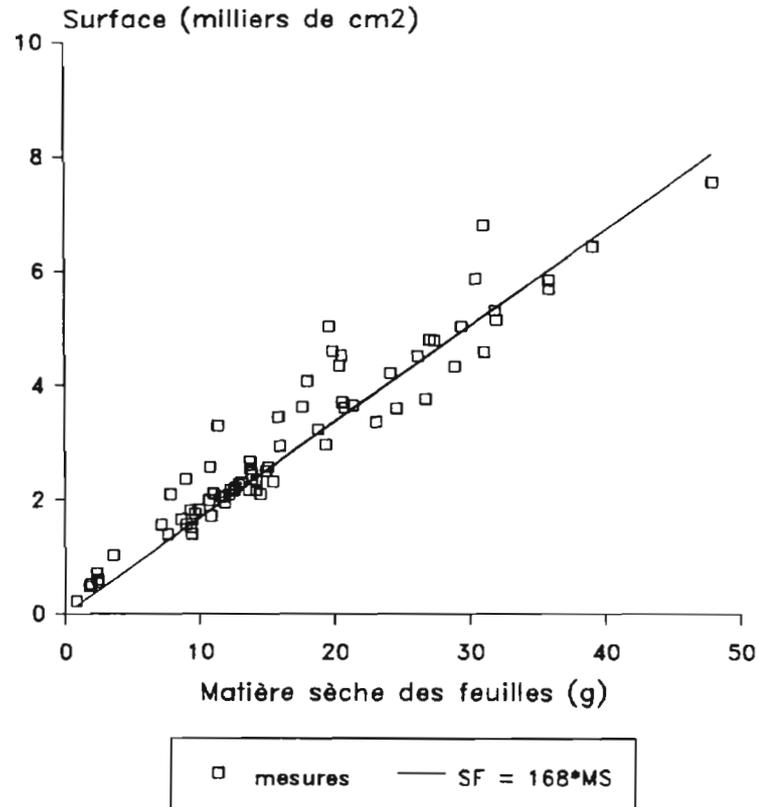
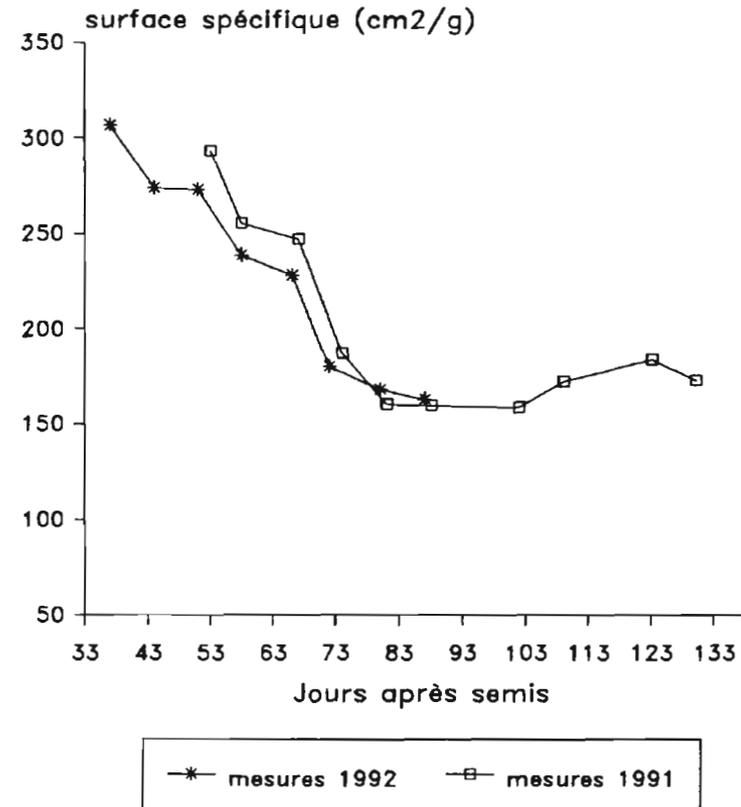


Figure 35: Variation au cours du cycle de la surface spécifique des feuilles de mil en 1991 et 1992.



de Begue (1991), indiquent une certaine variation de la surface spécifique selon la variété de mil étudiée (tableau 10).

Tableau 10: Relations entre la surface des feuilles de mil (cm²) et leur poids sec (g) pour différentes variétés de mil.

Daney-Gourou 1988 (Begue, 1991)			
	S = 125.1 MS + 27;	N = 860 feuilles;	r2 = 0.95
Daney-Gourou 1989 (Begue, 1991)			
	S = 140.8 MS + 15;	N = 213 feuilles;	-
AGRHYMET: variété HKP (Begue, 1991)			
	S = 131.8 MS + 58;	N = 77 feuilles;	-
Banizoumbou 1991 (mil Bas-fond; variété locale)			
	S = 168 MS;	N = 51 échantillons;	r2 = 0.98
Banizoumbou 1992 (mil Jupe sableuse; variété CIVT)			
	S = 144 MS;	N = 74 échantillons;	r2 = 0.90

* Estimation de la surface d'une feuille à partir du produit de sa longueur et de sa grande largeur.

Cette méthode consiste à déterminer une relation linéaire ou du type polynomiale entre la surface d'une feuille et ses dimensions linéaires (Bonhomme et Varlet-grancher 1978, Prévot 1985, Begue 1991). La méthode présente l'avantage de n'être pas destructrice et permet un gain de temps assez considérable. La figure 36, donne un exemple de ce type de relation sur la variété CIVT ("mil jupe sableuse 1992"). Ces relations varient également selon la variété de mil étudiée (tableau 11).

Tableau 11: Relations entre la surface des feuilles de mil (cm²) et leurs dimensions linéaires (cm) pour plusieurs variétés de mil.

AGRHYMET: variété HKP (Begue, 1991)

$$l/lm = 0.534 + 2.67 L/Lm - 4.12(L/Lm)^2 + 0.93(L/Lm)^3 \quad r^2 = 0.95$$

Où Lm, lm, sont respectivement la longueur et la largeur maximale de la feuille; l est la largeur de la feuille à une distance L de sa base. L'intégration de cette relation donne la surface d'une feuille connaissant Lm et lm.

Daney-Gourou 1988 (Begue, 1991)

$$S = 0.68 Llm \quad r^2 = 0.989 \quad N = 130 \text{ feuilles}$$

AGRHYMET (Begue, 1991)

$$S = 0.73 Llm \quad r^2 = 0.960 \quad N = 70 \text{ feuilles}$$

Chanda et al. (1985)

$$S = 0.77 Llm \quad r^2 = 0.99 \quad N = 88 \text{ feuilles}$$

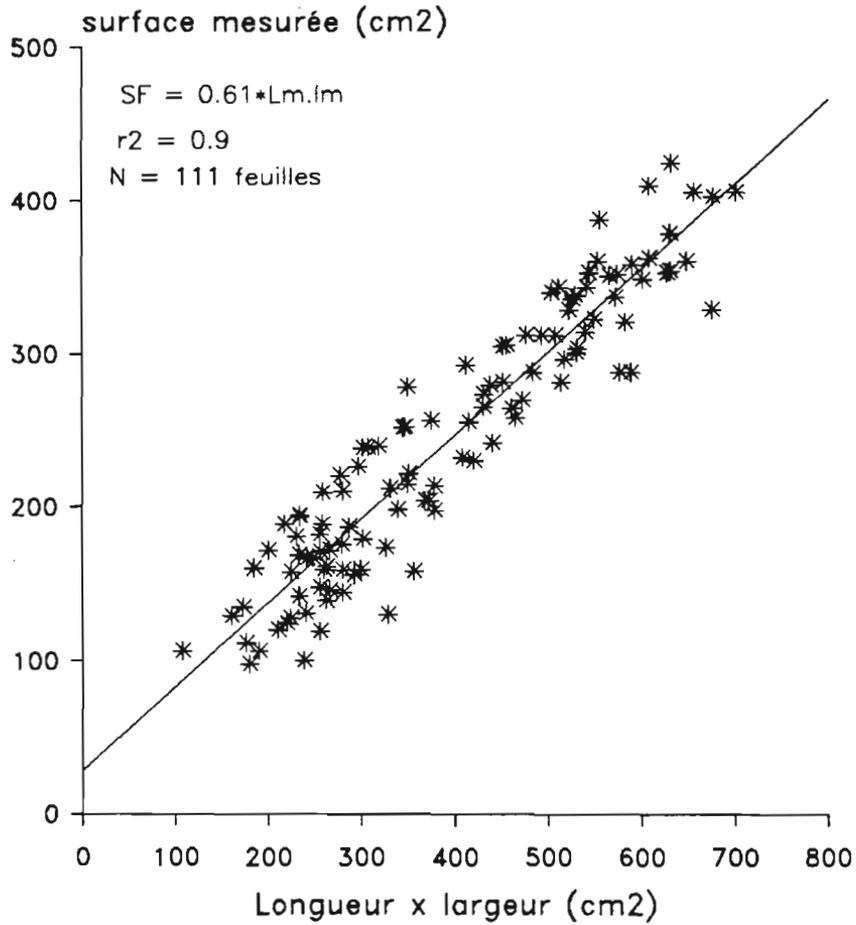
Banizoumbou 1992 (mil Bas-fond; variété locale)

$$S = 0.63 Llm \quad r^2 = 0.90 \quad N = 75 \text{ feuilles}$$

Banizoumbou 1992 (mil Jupe sableuse; variété CIVT)

$$S = 0.61 Llm \quad r^2 = 0.90 \quad N = 111 \text{ feuilles}$$

Figure 36: Relation entre le produit longueur x largeur d'une feuille et sa surface: mil CIVT, Jupe sableuse 1992.



4.2 LES CARACTERISTIQUES RADIATIVES DE LA CULTURE

4.2.1 REPARTITION DE L'ENERGIE RADIATIVE ENTRE BILAN DE COURTES LONGUEURS D'ONDES ET BILAN DE GRANDES LONGUEURS D'ONDES.

Nous avons choisi une journée de fort ensoleillement et pendant la phase de végétation maximale du mil (71 JAS) en 1992, pour illustrer cette répartition de l'énergie radiative (figure 37). Le bilan de grandes longueurs d'ondes est obtenu par soustraction de la valeur du bilan de courtes longueurs d'ondes à la valeur du rayonnement net de la culture. Le bilan de grandes longueurs d'ondes est négatif de jour comme de nuit, et le bilan de courtes longueurs d'ondes est positif pendant la journée et nul la nuit. Ces deux bilans évoluent en opposition de phase, mais suivent l'évolution du rayonnement global. Une régression linéaire réalisée entre ces 2 bilans, est utilisée pour estimer le bilan de grandes longueurs non mesuré en routine (Monteny et Lhomme, 1980), permettant ainsi d'établir le bilan radiatif à défaut d'une mesure de rayonnement net. Une telle régression établie avec les données mil-1992, pour différentes valeurs de LAI, a donné des résultats similaires sur l'ensemble du cycle de la plante (figure 38 et tableau 12). Cette constance sur l'ensemble du cycle cultural de la relation entre les 2 bilans, traduit une faible sensibilité de la fonction à la variation des propriétés optiques de la surface, à travers le rapport R_r/R_n dont dépend la pente de la régression. La validation de la relation ainsi établie, réalisée avec les données mil-1991 (11 journées) a donné des résultats satisfaisants (figure 39).

La quantité d'énergie rayonnante disponible (R_n) pour l'évapotranspiration et les transferts de chaleur sensible et conductive, peut également être estimée directement à partir du rayonnement global. De nombreux auteurs ont formulé une relation linéaire entre ces 2 termes pour différents types de surfaces: Monteith et Szeicz (1961), Stanton et Thomas (1972), Kassam et Kowal (1975), Monteny et Gosse (1976), Monteny et Leroux (1991), N'Guessan et Osseni (1989), pour ne citer que ceux là. Une telle régression éta-

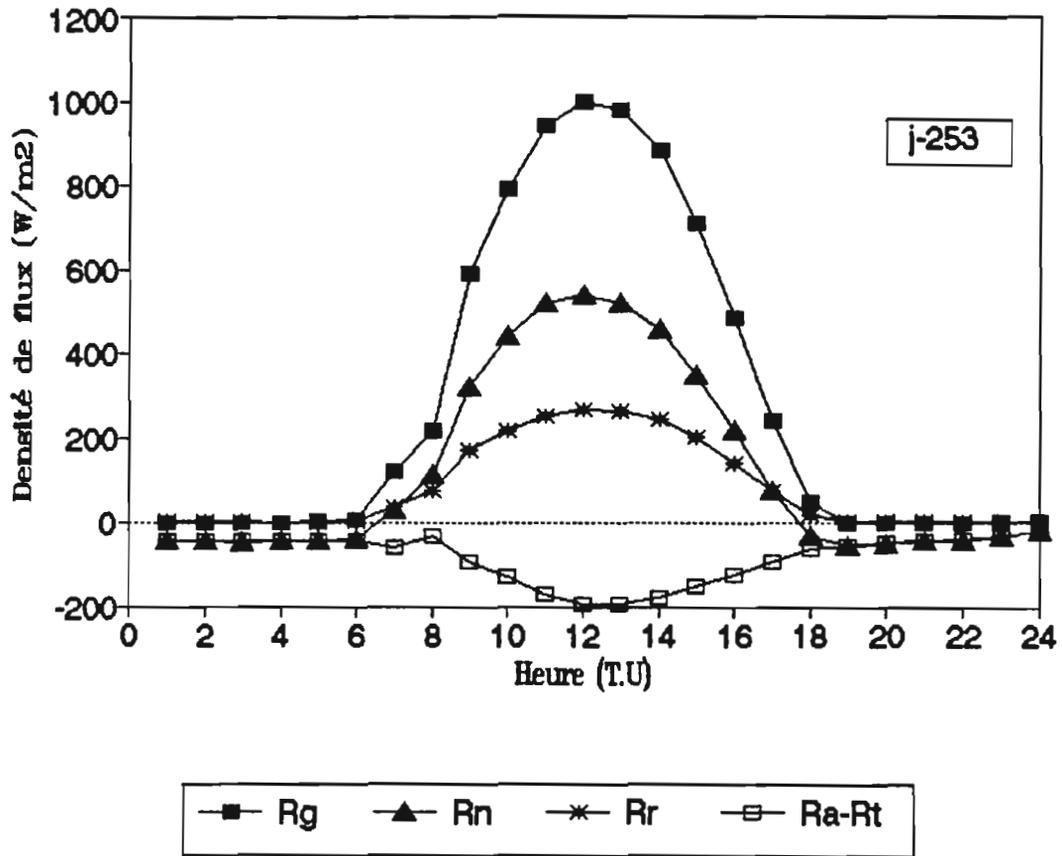


Figure 37: Exemple de bilan radiatif horaire au dessus d'une culture de mil (71^{ème} jour après semis, Banizoumbou 1992).

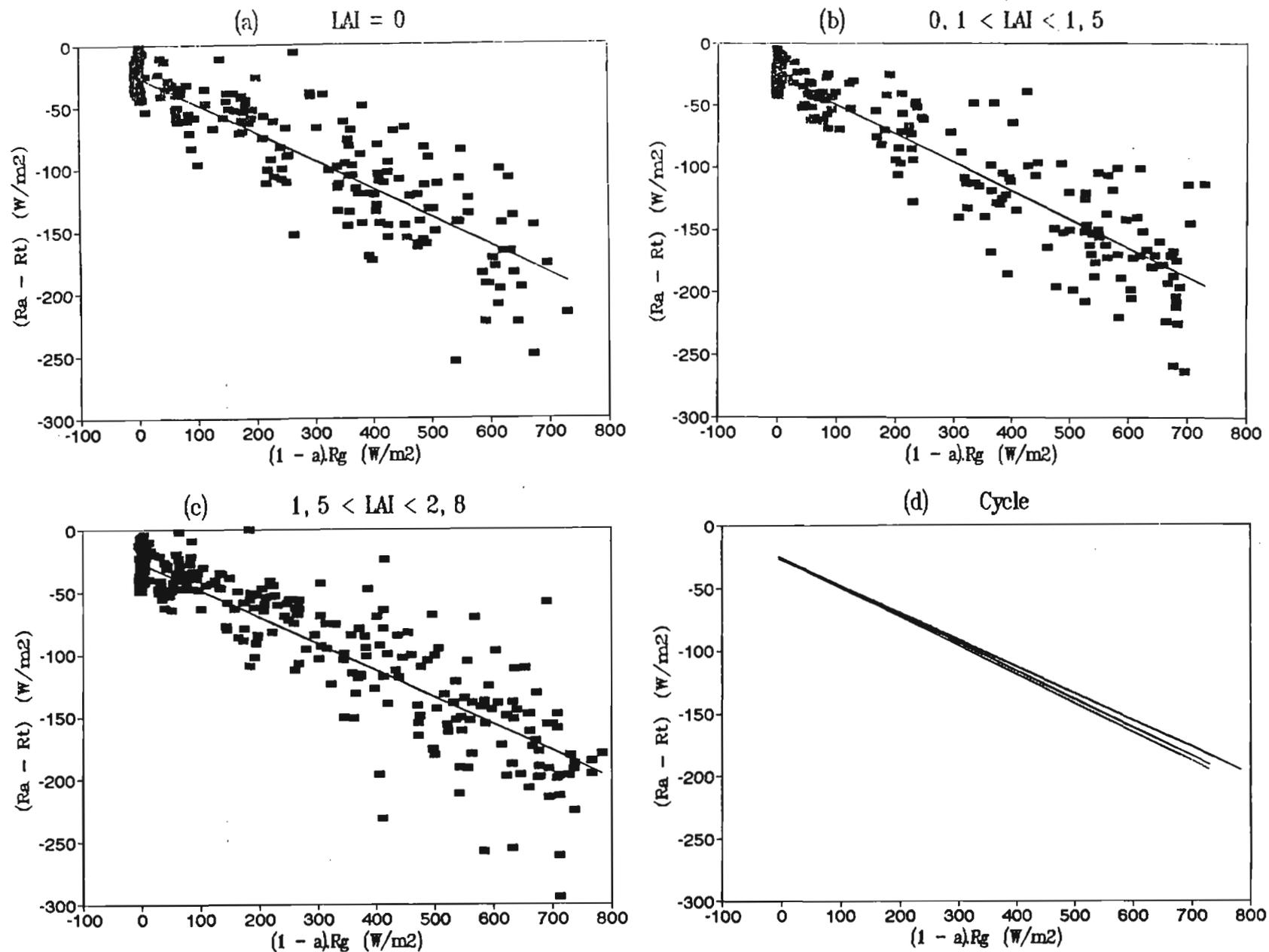


Figure 38: Régression linéaire entre bilan de courtes longueurs d'ondes $(1 - a)R_g$ et bilan de grandes longueurs d'ondes $(R_a - R_t)$ pour 3 différentes périodes du cycle du mil en 1992. (a): début de cycle ($\text{LAI} = 0$); (b): croissance végétative ($0,1 < \text{LAI} < 1,5$); (c): croissance végétative ($1,5 < \text{LAI} < 2,8$); (d): les droites de régression correspondant à ces 3 phases.

Figure 39: Comparaison entre $(Ra-Rt)$ calculé et $(Ra-Rt)$ mesuré en 1991.

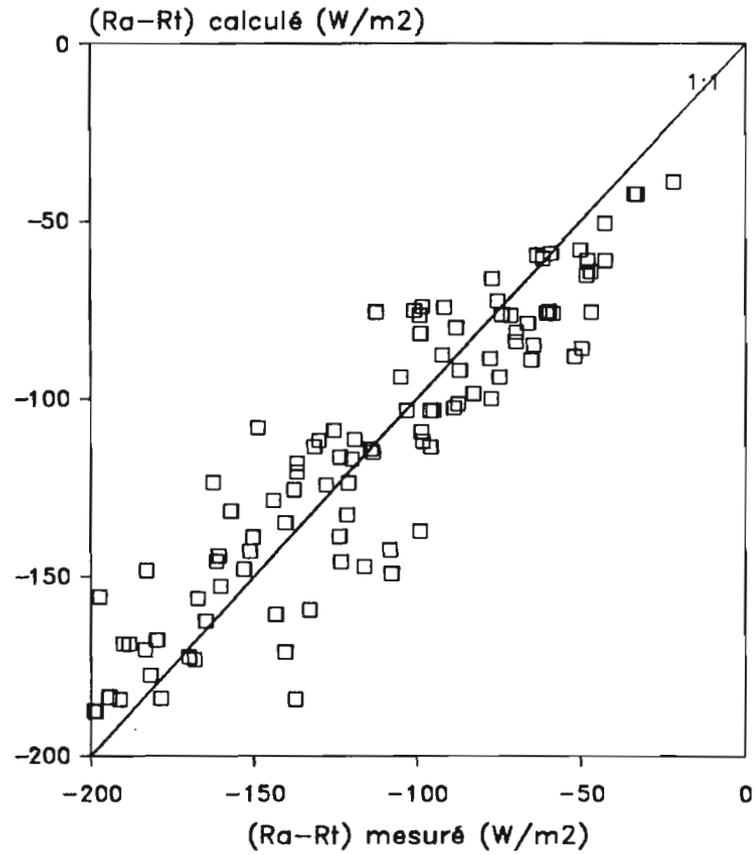
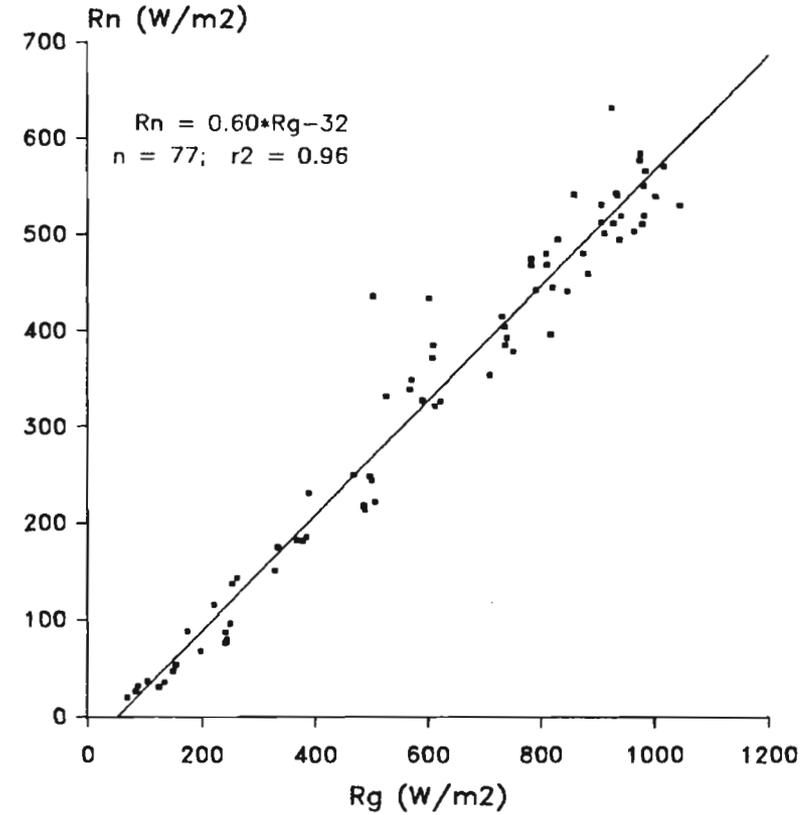


Figure 40: Relation entre le rayonnement global et le rayonnement net pendant la phase de croissance végétative du mil en 1992



blie sur le mil en phase de végétation maximale a donné les résultats de la figure 40. Cette relation varie selon les stades phénologiques de la culture (tableau 13), en raison du développement de l'indice foliaire et du degré de recouvrement du sol par le feuillage. La valeur moyenne sur le cycle du mil du rapport R_n/R_g est d'environ 0,5 en 1991 et 1992 (Tableau 14 et 15).

Tableau 12 : Relations linéaires entre bilans radiatifs horaires (W/m^2) de courtes longueurs d'ondes $(1-a)R_g$, et de grandes longueurs d'ondes (R_a-R_t) de la culture de mil en 1992. N, est le nombre de valeurs horaires utilisées dans la régression; s_y , l'erreur standard sur les valeurs de (R_a-R_t) ; s_α , l'erreur standard sur le coefficient de régression α ; r^2 , le coefficient de corrélation linéaire.

Période du cycle	$(R_a-R_t)=\alpha.(1-a).R_g + \beta$		LAI
début du cycle	$\alpha = -0,23$ N = 328 $s_y = 21$	$\beta = -26$ $r^2 = 0,83$ $s_\alpha = 0,005$	LAI = 0,0
croissance végétative	$\alpha = -0,23$ N = 308 $s_y = 21$	$\beta = -27$ $r^2 = 0,87$ $s_\alpha = 0,005$	$0,1 < LAI < 2,8$
sénescence	$\alpha = -0,21$ N = 452 $s_y = 23$	$\beta = -27$ $r^2 = 0,83$ $s_\alpha = 0,005$	$2,8 < LAI < 1,1$

Tableau 13 : Relation entre le rayonnement ($W.m^{-2}$) net et le rayonnement global ($W.m^{-2}$) selon les stades phénologiques du mil: Banizoumbou, 1992. (l'exemple de la phase végétative est donné sur la figure 40).

Période du cycle	$R_n = a \cdot R_g + b$	LAI
début de cycle	$R_n = 0,52 \cdot R_g - 31$ $r^2=0,97$ N=75	0,0
Croissance végétative	$R_n = 0,60 \cdot R_g - 32$ $r^2=0,96$ N=77	$0,1 < LAI < 2,8$
Sénescence	$R_n = 0,56 \cdot R_g - 63$ $r^2=0,99$ N=59	$2,8 < LAI < 1,1$

Tableau 14: Bilan radiatif diurne du mil en 1991
(MJ/m²/j)

semaine 1991	LAI m ² /m ²	Pluie (mm)	Nombre de pluies	Rg	Rr	Rn	Ra-Rt	albédo	Rn/Rg
24	1,9	15,5	3	22,1	6,5	11,2	-4,3	0,28	0,50
25	2,2	4,7	3	24,4	7,7	10,7	-7,8	0,28	0,42
26	2,6	12,5	1	21,9	6,2	7,8	-7,8	0,28	0,36
27	2,0	3,1	1	21,8	6,4	8,9	-8,4	0,27	0,40
28		15,3	3	19,1	5,4	10,4	-4,3	0,26	0,50
29	1,6	19,7	3	18,2	4,5	9,1	-3,5	0,26	0,49
30		23,5	1	19,5	4,9	10,9	-3,7	0,24	0,56
31	1,5	37,3	2	22,8	5,9	12,6	-4,4	0,25	0,57
32		25,4	3	18,1	4,7	11,4	-2,0	0,25	0,60
33	1,3	23,5	3	21,7	5,8	12,3	-4,7	0,23	0,57
34		26,9	4	19,7	4,2	11,6	-3,5	0,21	0,55
35	1,1	38	2	22,0	4,9	13,6	-4,0	0,22	0,60
Total		245,4	29	1759,2	468,8	913,9	-408,3		
Moyenne				20,9	5,6	10,9	-4,9	0,25	0,51

Tableau 15: Bilan radiatif diurne du mil en 1992
(MJ/m²/j)

semaine 1992	LAI m ² /m ²	Pluie (mm)	Nombre de pluies	Rg	Rgr	Rn	Ra-Rt	albédo	Rn/Rg
30	0	26,7	2	20,9	7,3	10,3	-3,8	0,34	0,49
31	0	52,5	2	21,1	7,3	10,1	-3,8	0,34	0,49
32	0,1	7,5	1	22,2	7,3	11,1	-4,3	0,33	0,50
33	0,5	27	3	23,0	8,0	11,2	-5,0	0,32	0,49
34	1,2	56,7	3	21,2	5,9	10,0	-4,2	0,29	0,49
35	2,5	93,4	6	21,0	5,7	11,1	-4,2	0,27	0,54
36	2,8	26	1	22,3	6,6	11,3	-4,5	0,29	0,52
37	2,7	31,4	1	24,0	6,2	13,1	-4,7	0,26	0,55
38	2,3	21,6	2	20,4	5,1	11,2	-4,4	0,24	0,56
39	1,5	0	0	24,0		12,9			0,55
40	1,4	0	0	22,8		11,3			0,52
41	1,1	0	0	22,2		10,6			0,50
Total		342,8	21	1855,9		938,5			
Moyenne				22,1	6,6	11,2	-4,3	0,30	0,5

4.2.2 ALBEDO DU MIL

L'albédo varie essentiellement avec la nature et les propriétés optiques de la surface, la composition spectrale du rayonnement incident, et l'angle zénithal solaire. Une représentation de l'évolution journalière de l'albédo du mil (figure 41), montre qu'il est peu sensible à la variation de la hauteur du soleil en raison du piégeage par réflexion-diffusion des rayons solaires par les surfaces des feuilles. La valeur moyenne journalière décroît du début à la fin du cycle du mil (tableau 14 et 15), en raison d'une absorption croissante et donc une réflexion de plus en plus faible, au fur et à mesure que la plante se développe. Cette valeur moyenne de l'albédo varie aussi avec le degré d'humectation du sol (tableau 16). La valeur de l'albédo la plus élevée ($a = 0.33$) est mesurée en absence de végétation sur sol nu sableux sec. Sa valeur la plus faible est obtenu en fin de cycle. En effet les feuilles qui se dessèchent restent fixées sur la plante et piègent le rayonnement solaire par le phénomène de réflexions multiples décrit plus haut. Ce rayonnement est finalement absorbé par le sol et les plantes adventices de fin de cycle. A titre de comparaison, l'albédo d'un bourgou qui est une graminée fourragère très dense poussant dans la vallée du fleuve Niger, est de 0,23. Si l'on se limite à la zone de LAI croissant, et considérant que l'albédo prend sa valeur maximale en absence de végétation (LAI = 0,0), sa variation au cours du cycle cultural en fonction du LAI (Figure 42) peut être formulée de la façon suivante:

$$\text{albédo} = \frac{R_r}{R_g} = 0,33 \exp(-0,08 \text{LAI}) \quad (39)$$

Tableau 16: Valeurs d'albédo de plusieurs types de surfaces

types de Surfaces	albédo	LAI
Sol nu sableux sec	0.33	-
Sol nu sableux humide	0.29	-
Bourgou (<i>Echinochloa stagnina</i>)	0.23	-
Mil: * début de cycle		0,0
- journées sèches	0.31	
- journées humides	0.29	
* phase végétative		0,1<LAI<2,8
- journées sèches	0.27	
- journées humides	0.25	

Figure 41: Evolution diurne de l'albédo du ml, comparaison avec l'albédo d'un sol nu sableux sec: Banizoumbou 1992.

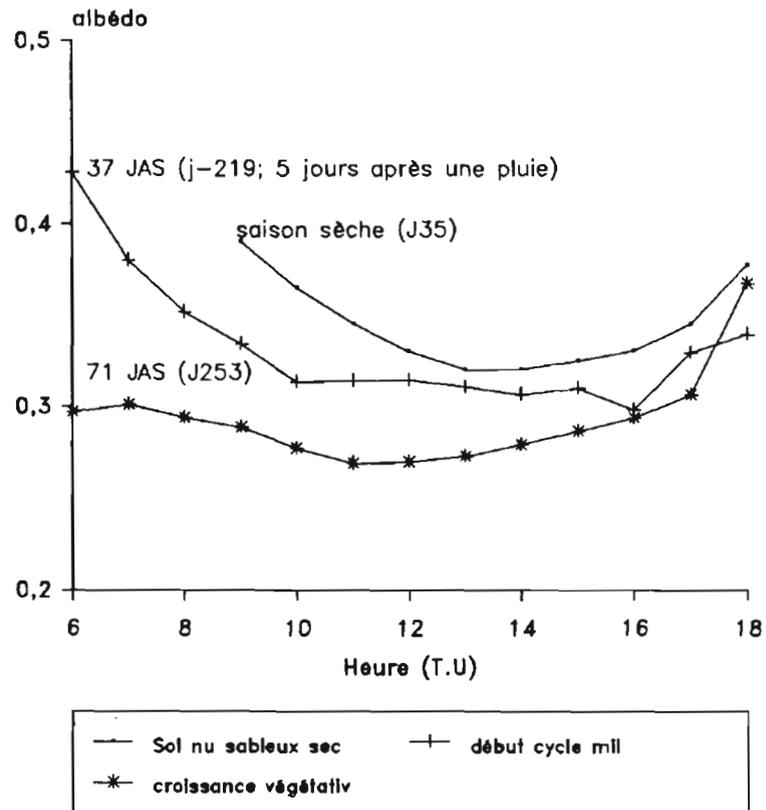
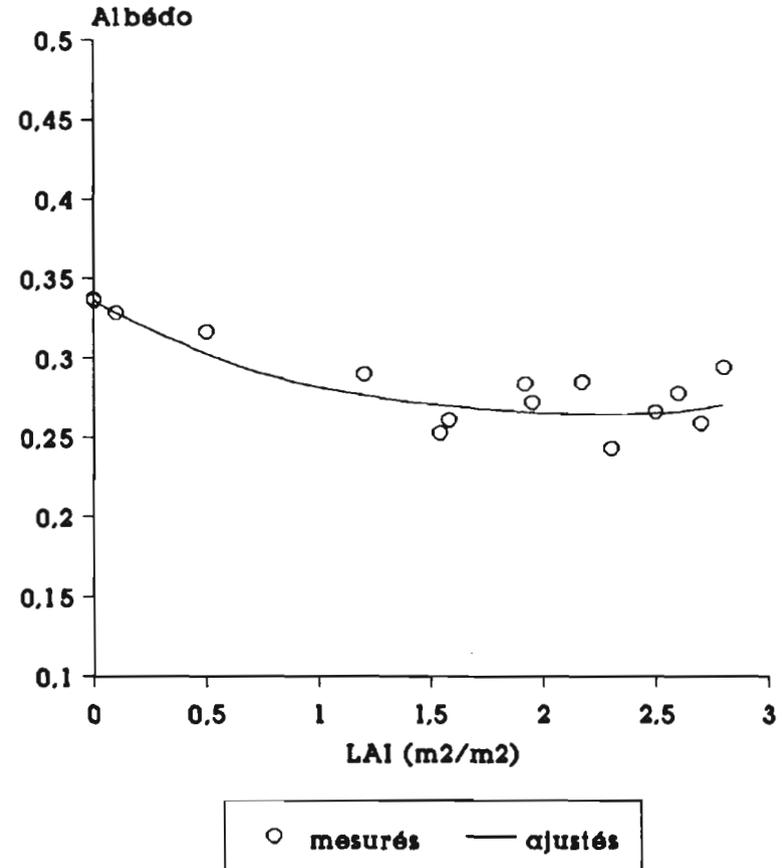


Figure 42: Variation de l'albédo du ml en fonction du LAI.



4.3 EVALUATION DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN D'ENERGIE DU MIL

4.3.1 CORRECTION DES VALEURS DU FLUX CONDUCTIF DANS LE SOL

Les valeurs de flux conductif dans le sol (G), sont mesurées à l'aide de 4 fluxmètres réparties à 3 cm de profondeur dans le sol de l'espace inter-poquet et en dessous du poquet. Les fluxmètres sont enfouis à 3 cm de profondeur dans le sol pour les protéger des effets parasites de l'environnement (rayonnement solaire, vent, pluie etc..). Les mesures obtenues dans ces conditions ne correspondent pas au flux conductif à la surface du sol. Grâce aux profils de température que nous avons réalisés dont un exemple est présenté à la figure 52, nous avons utilisé la méthode de stockage thermique, pour retrouver les valeurs réelles du flux conductif à la surface du sol, suivant la formulation qui suit:

$$(40) \quad G = G_m + \int_0^{\infty} C(z) (\partial T / \partial t) (z) dz$$

Où, G est le flux conductif à la surface du sol, G_m le flux conductif mesuré à 3 cm de profondeur dans le sol, $C(z)$ est la capacité calorifique du sol à la profondeur z , $(\partial T / \partial t) (z)$, la variation de la température du sol à la profondeur z . La densité et les profils d'humidité du sol mesurés sur la même parcelle par Sicot et al. (communication personnelle), ont été utilisées pour calculer la capacité calorifique du sol à différentes profondeurs, selon la méthode de De vries (1963) (Cellier et al., 1993). Ainsi, une valeur de $C = 1,32 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ pour les 10 premiers centimètres du sol et une valeur de $C = 1,45 \cdot 10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ pour le restant du profil ont été utilisées. La densité moyenne du profil est de 1,5. Les corrections ont porté sur toutes les journées où nous disposons de profils de température dans le sol. Quelques exemples de comparaison de flux conductif à la surface (G corrigés) et de flux conductif mesuré à 3 cm de profondeur dans le sol (G mesurés), sont représentés sur la figure 43. La densité de flux conductif superficiel (0 à 3cm) représente une proportion non négligeable du flux total, 20 % en moyenne, d'où l'intérêt de ces corrections.

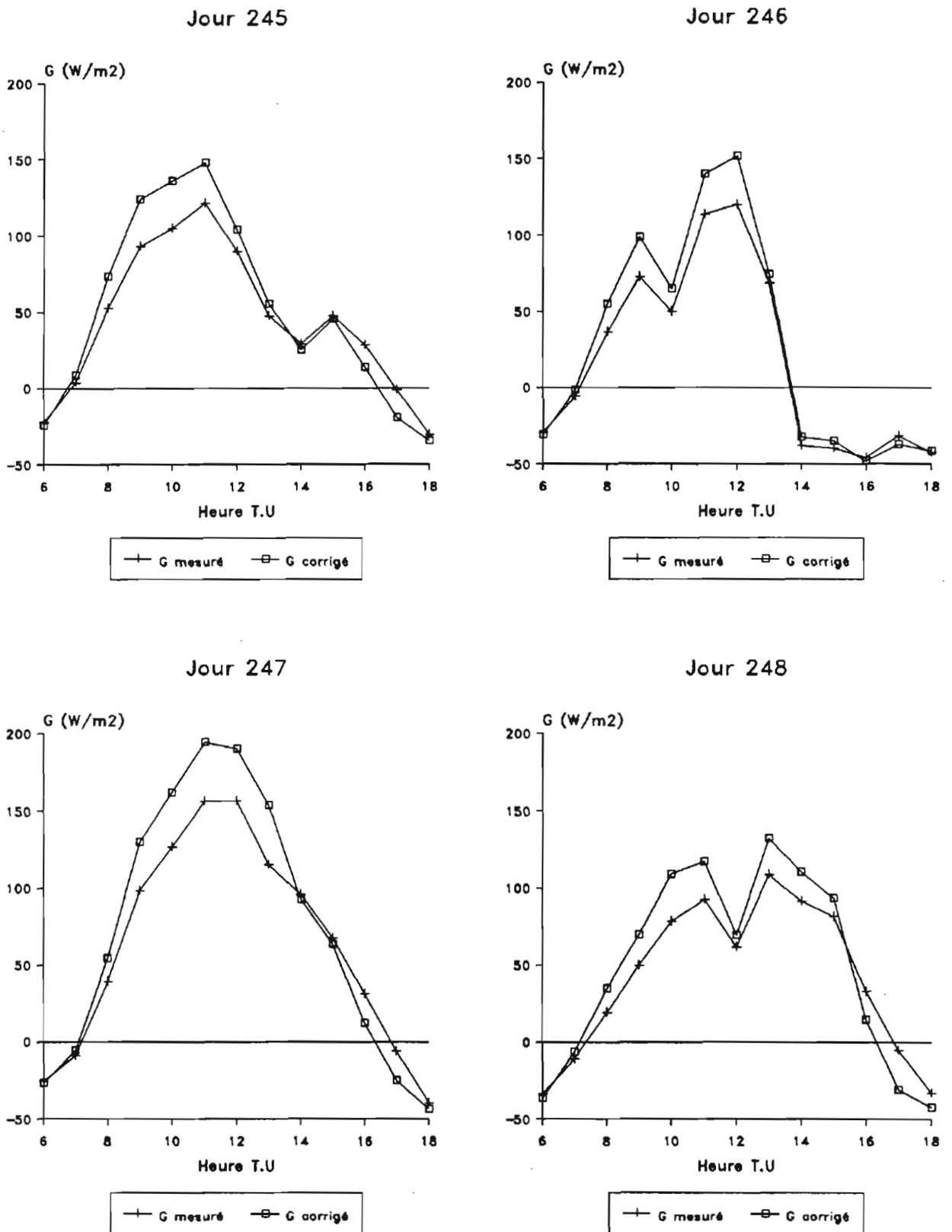


Figure 43: Comparaison des valeurs de flux conductif à la surface du sol (G corrigé) à celles qui sont mesurées à 3 cm de profondeur dans ce sol (G mesuré) pour 4 journées en 1992.

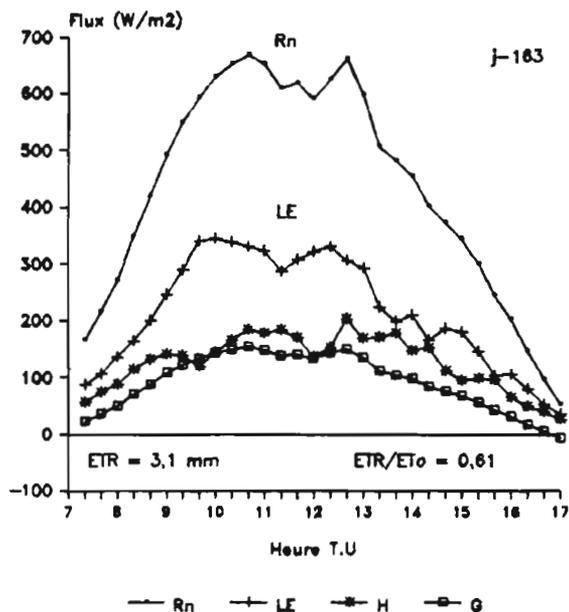
4.3.2 EVOLUTION DIURNE DES DIFFERENTS TERMES DU BILAN D'ENERGIE.

Nous avons choisi 3 journées successives après une pluie de 13 mm et une journée de stress hydrique très marqué en 1991, pour illustrer l'évolution des différents termes du bilan énergétique (Figure 44). Au 59^{ème} JAS, le lendemain d'une pluie de 13 mm, le flux de chaleur latente (LE) représente le terme dominant de dissipation d'énergie, ensuite vient le flux de chaleur sensible (H), le flux conductif dans le sol (G), est légèrement inférieur à H (Figure 44a). Le rapport ETR/Rn atteint 48 % au cours de cette journée, le cumul du rayonnement net diurne est de 16 M.J/m². Au 60^{ème} JAS, pour un Rn légèrement inférieur à celui de la journée précédente (12 M.J/m²), le rapport ETR/Rn n'est plus que de 35 % et le flux de chaleur latente est presque confondu au flux de chaleur sensible (Figure 44b). Cette situation se maintient jusqu'au lendemain (61^{ème} JAS), malgré un Rn plus faible (10 M.J/m²) (Figure 44c). Donc, tout semble se passer comme si le sol n'évaporait plus d'eau. L'évapotranspiration est réduite à la transpiration de la plante qui serait alors égale à 1,6 mm au 61^{ème} JAS. Cette valeur représente environ 1/3 de la valeur d'ETR de départ (59^{ème} JAS, LAI = 0,95). Si le stress hydrique persistait, la transpiration se réduirait du fait de la fermeture des stomates de la plante, l'essentiel de l'énergie reçue par le système se dissiperait sous forme de chaleur sensible, comme le montre la figure 44d avec H > LE. Cette dernière situation est typique des journées de stress hydrique sur le mil.

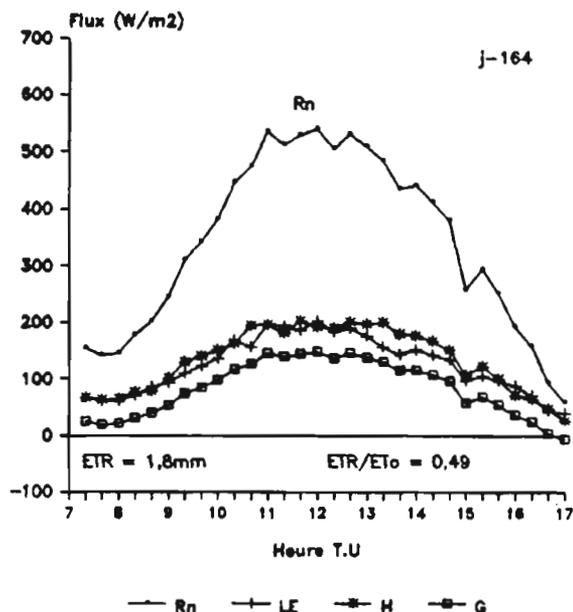
4.3.3 BILAN D'ENERGIE SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DU MIL

Les valeurs journalières des différents termes du bilan d'énergie, moyennées sur 7 jours en 1991 et 1992, sont mentionnées sur les tableaux 17 et 18. La valeur moyenne du rayonnement net totalisé sur 12 semaines du cycle est de 914 M.J.m⁻².j⁻¹ en 1991 et 939 M.J.m⁻².j⁻¹ en 1992, soit respectivement 10,9 M.J.m⁻².j⁻¹ et 11,2 M.J.m⁻².j⁻¹ en moyenne journalière. La densité du flux de chaleur

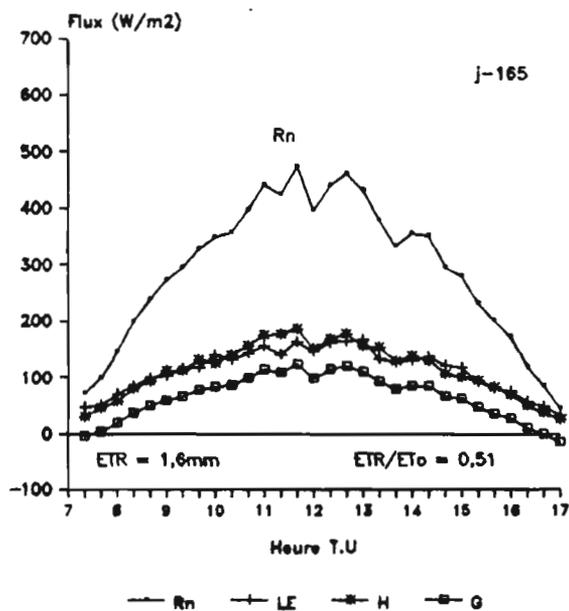
(a) : Bilan d'énergie d'une culture de mil au 59 JAS, le lendemain d'une pluie de 13mm (LAI=0.93 DR=12%). 12/06/91



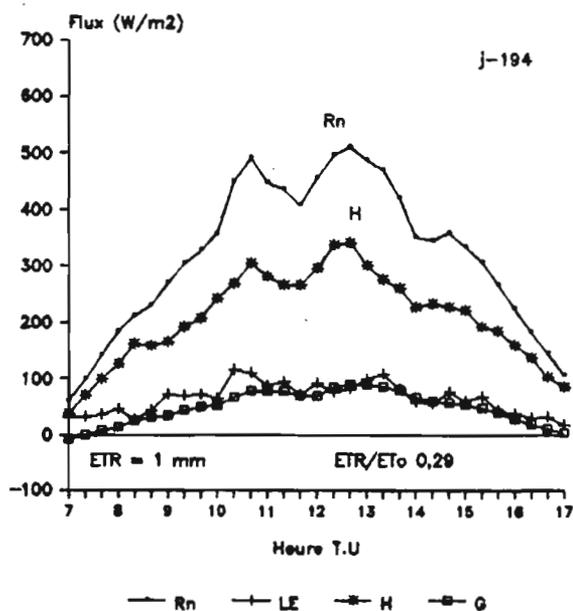
(b) : Bilan d'énergie d'une culture de mil au 60 ème JAS. Banizoumbou 13/06/91.



(c) : Bilan d'énergie d'une culture de mil au 61 JAS, 2 jours après la pluie de 13 mm. Banizoumbou, 14/06/91.



(d) : Bilan d'énergie d'une culture de mil au 90 ème JAS. (LAI = 1,95 DR = 27 %). 12/07/91 = journée de stress hydrique.



Banizoumbou, Nivernois 1991.

Figure 44: Exemples d'évolutions diurnes des différents termes du bilan d'énergie du mil, en 1991.

latente atteint 48 % de la valeur du rayonnement net total en 1992 contre 38 % en 1991. Les pourcentages respectifs du flux de chaleur sensible sont de 31 % et 43 %. Ces proportions indiquent que le mil a mieux valorisé l'énergie disponible pour l'alimentation hydrique en 1992 qu'en 1991. La différence entre les deux campagnes s'explique par l'écart de LAI résultant en grande partie de la bonne répartition temporelle de la pluviométrie qui a caractérisé l'année 1992. La proportion moyenne du flux conductif dans le sol est par contre semblable pour les 2 campagnes: 21 % de la valeur du rayonnement net total. Cette proportion est assez importante pour être négligée, elle est comparable à celle que l'on retrouve sur les couverts continus (Brutsaert 1982).

En ce qui concerne la variation saisonnière des différents termes du bilan d'énergie (tableau 17 et 18), on constate que R_n est peu variable du début à la fin du cycle, tandis-que le flux de chaleur latente prend sa valeur maximale dans la période des forts LAI, indiquant une activité transpiratoire intense de la culture. Le rapport G/R_n présente un certain gradient proportionnel à la fraction de sol nu de la culture (Tableau 18).

Tableau 17: Bilan d'énergie diurne du mil en 1991
(MJ/m²/j)

semaine 1991	LAI m ² /m ²	Pluie (mm)	Nombre de pluies	Rn	LE	H	G	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
24	1,9	15,5	3	11,2	4,8	4,1	2,2	0,43	0,37	0,21
25	2,2	4,7	3	10,7	4,2	4,1	2,4	0,40	0,38	0,24
26	2,6	12,5	1	7,8	3,3	3,0	2,0	0,42	0,39	0,27
27	2,0	3,1	1	8,9	2,6	4,0	2,3	0,30	0,44	0,29
28		15,3	3	10,4	3,1	5,7	1,6	0,29	0,55	0,19
29	1,6	19,7	3	9,1	3,3	4,4	1,4	0,37	0,48	0,14
30		23,5	1	10,9	4,1	4,9	1,9	0,38	0,45	0,16
31	1,5	37,3	2	12,6	3,9	6,0	2,6	0,31	0,48	0,23
32		25,4	3	11,4	5,1	4,6	1,7	0,45	0,40	0,15
33	1,3	23,5	3	12,3	4,6	5,3	2,3	0,38	0,43	0,19
34		26,9	4	11,6	4,8	5,1	3,0	0,42	0,43	0,23
35	1,1	38,0	2	13,6	5,6	5,4	2,6	0,41	0,40	0,22
Total		245,4	29	913,9	347,7	396,6	183,5			
Moyenne				10,9	4,1	4,7	2,2	0,38	0,43	0,21

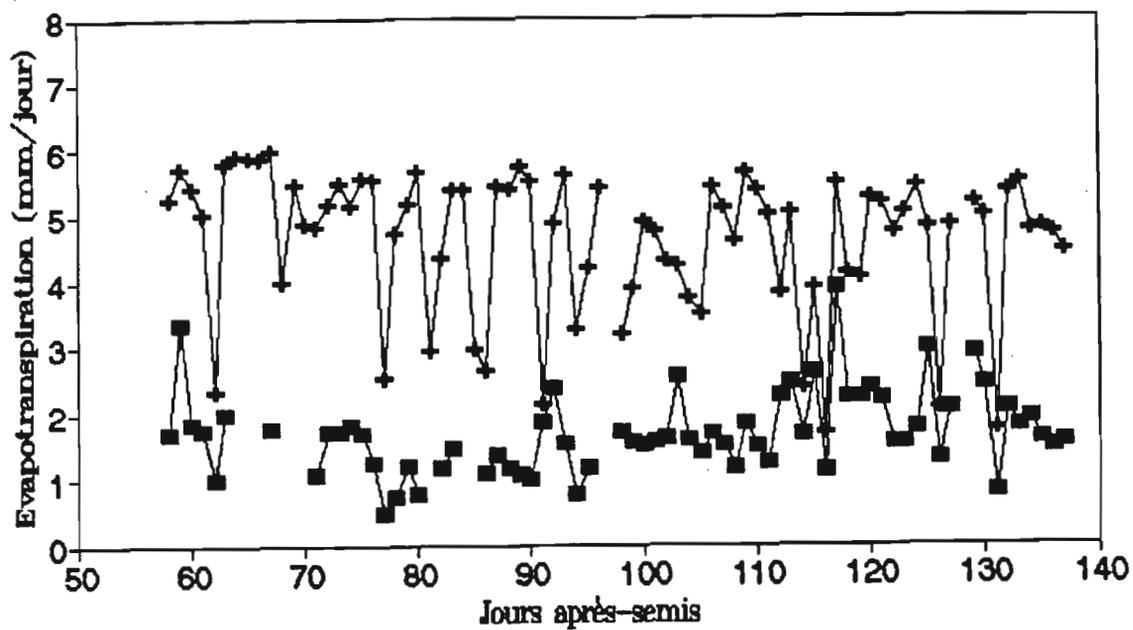
Tableau 18: Bilan d'énergie diurne du mil en 1992
(MJ/m²/j)

Semaine 1992	LAI m ² /m ²	Pluie (mm)	Nombre de pluies	Rn	LE	H	G	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
30	0	26,7	2	10,3	4,8	2,9	2,7	0,47	0,28	0,26
31	0	52,5	2	10,1	5,2	2,2	2,7	0,52	0,22	0,26
32	0,1	7,5	1	11,1	3,5	4,4	3,2	0,32	0,39	0,29
33	0,5	27	3	11,2	4,3	4,0	2,8	0,39	0,36	0,25
34	1,2	56,7	3	10,0	5,4	2,5	2,1	0,54	0,25	0,21
35	2,5	93,4	6	11,1	6,7	2,2	2,2	0,60	0,20	0,20
36	2,8	26	1	11,3	6,8	2,1	2,3	0,60	0,19	0,21
37	2,7	31,4	1	13,1	7,2	3,4	2,5	0,55	0,26	0,19
38	2,3	21,6	2	11,2	5,5	3,6	2,0	0,49	0,33	0,18
39	1,5	0	0	12,9						
40	1,4	0	0	11,3	4,5	5,1	1,8	0,40	0,45	0,16
41	1,1	0	0	10,6	3,7	5,4	1,4	0,35	0,51	0,13
Total		342,8	21	938,5	439,3	296,4	193,2			
Moyenne				11,2	5,2	3,5	2,3	0,48	0,31	0,21

4.4 LE BILAN HYDRIQUE DE LA CULTURE

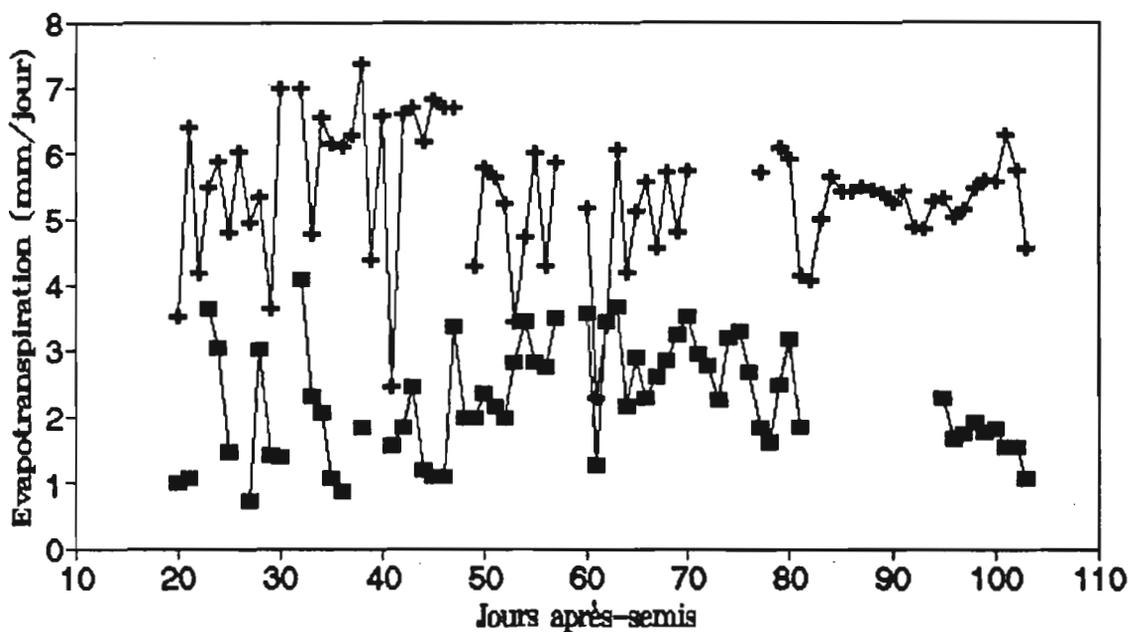
4.4.1 VARIATIONS SAISONNIERES DE L'ETR DU MIL

Les valeurs journalières de l'ETR du mil (couvert végétal + sol) mesurées directement par la méthode du bilan d'énergie-rapport de Bowen pendant les campagnes 1991 et 1992 sont représentées sur les figures 45 et 46. Les ETR suivent les fluctuations de la demande climatique (ETP-Penman) et de l'apport d'eau par les pluies (Figure 13). En milieu de cycle, on peut observer des valeurs d'ETR plus élevées en 1992 qu'en 1991. Cette différence s'explique par une plus grande captation de l'énergie solaire par le feuillage du mil (LAI élevé) associée à une bonne disponibilité en eau qui ont caractérisé l'année 1992. Les valeurs décadaires du coefficient cultural (ETR/ETP-Penman) représentées sur les figures 47 et 48 illustrent bien cette différence de consommation en eau du mil entre la saison 1991 et 1992. Les réductions successives des valeurs de ce rapport en 1991 indiquent la présence de périodes sèches au cours de la saison humide. Ces derniers résultats plus ceux portant sur la biologie de la plante, nous amènent à considérer l'année 1992, comme une année optimale du point de la croissance du mil et de son alimentation hydrique. Partant de cette hypothèse, on peut confronter les valeurs du coefficient cultural mesurées en 1992 (figure 48) à celles qui ont été relevées dans la bibliographie (figure 6). Ici encore, on n'observe pas de conformité entre nos valeurs d'ETR/ETP-1992 et celles représentées sur la figure 6. Cette dernière confrontation des valeurs de coefficient cultural du mil confirme une fois de plus les objections de Wallace et al. (1993), pour l'utilisation de l'approche dite du "coefficient cultural" pour la prévision de l'ETR du mil. Cependant, pour des applications opérationnelles à l'échelle régionale et à celle du cycle cultural telle que la prévision des rendements en grains, cette méthode peut bel et bien être un outil de travail intéressant.



■ ETR-1991 + ETP-1991

Figure 45: Valeurs journalières de l'ETR du mil en 1991, comparaison avec l'ETP-Penman.



■ ETR-1992 + ETP-1992

Figure 46: Valeurs journalières de l'ETR du mil en 1992, comparaison avec l'ETP-Penman.

Figure 47: Moyennes décadales du rapport ETR/ETP-Penman au cours du cycle du mil-1991

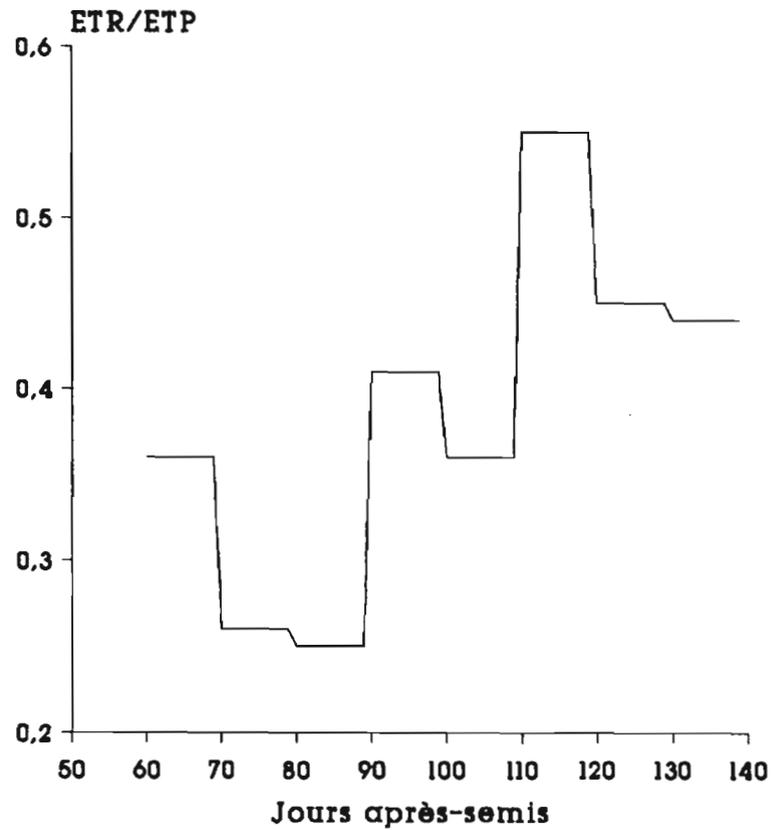
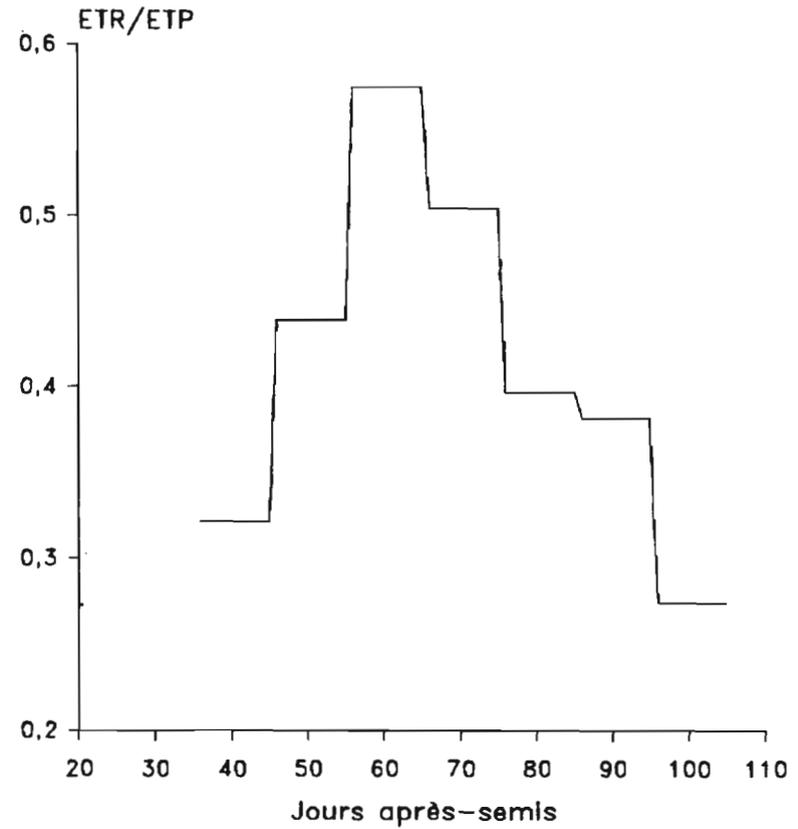


Figure 48: Moyennes décadales du rapport ETR/ETP-Penman au cours du cycle du mil-1992



4.4.2 BILAN HYDRIQUE SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE

Les tableaux 19 et 20 donnent un bilan hydrique simplifié pour les 2 campagnes de mesure. Les valeurs d'ETR totales (méthode du bilan d'énergie / rapport de Bowen) pour les 2 campagnes sont nettement inférieures à celles qui sont généralement mesurées par la méthode du bilan hydrique utilisant l'humidimétrie neutronique (tableau 21). Cette différence provient de la non prise en compte dans l'utilisation de la méthode neutronique des termes de drainage et de ruissellement qui sont très souvent considérés comme non significatifs. L'ETR calculée comme terme résiduel du bilan hydrique, est alors surestimée car incluant les termes de drainage et de ruissellement. Les résultats des tableaux 19 et 20 indiquent, qu'environ 99 mm de pluie soit 40 % du cumul pluviométrique total en 1991, et 158 mm soit 46 % en 1992, n'ont pas été utilisées par la culture. Cette eau draine en grande partie dans les horizons profonds hors de portée des racines. Ceci confirme les idées récentes de nombreux auteurs (cf chapitre 2.2.4), qui ont signalé la faible efficacité d'utilisation de l'eau de pluie par le mil en conditions de cultures paysannes. De nombreuses solutions sont proposées dans la littérature pour remédier à ce problème: amélioration des conditions de fertilité, cultures associées, agroforesterie, multiplication des sarclages, etc...

Concernant la première alternative, la plupart des auteurs s'accordent sur l'effet bénéfique des amendements organiques sur le rendement des cultures vivrières au Sahel. Cet effet se traduit par une augmentation de l'ETR et une réduction du drainage et lessivage en profondeur (Forest, 1991). Cependant un excès de l'apport de fumure organique peut avoir des effets pervers sur la production au cas où l'eau viendrait à manquer (Affholder, 1991). Donc il conviendrait de trouver le mode d'application adéquat pour chaque condition pédoclimatique donnée. Dans cette perspective, Brouwer et Powell (1994) ont suggéré des applications plus fréquentes de petites quantités de fumure plutôt que de grandes quantités appliquées moins fréquemment.

La pratique des cultures associées valorise également mieux les ressources de l'environnement (eau, sel minéraux, climat). Une

Tableau 19: Bilan hydrique hebdomadaire du mil en 1991
(mm/semaine)

semaine de l'année 91	LAI (m2/m2)	Pluie (mm)	Nombre de pluies	ETR	P-ETR	P-ETR cumulées
24	1,9	15,5	3	13,9	1,6	1,6
25	2,2	4,7	3	12,4	-7,7	-6,1
26	2,6	12,5	1	9,7	2,8	-3,3
27	2,0	3,1	1	7,5	-4,4	-7,8
28		15,3	3	8,9	6,4	-1,3
29	1,6	19,7	3	10,6	9,1	7,7
30		23,5	1	11,8	11,7	19,4
31	1,5	37,3	2	11,2	26,1	45,5
32		25,4	3	16,2	9,2	54,6
33	1,3	23,5	3	13,7	9,8	64,4
34		26,9	4	14,1	12,8	77,2
35	1,1	38,0	2	16,5	21,5	98,8
Total		245,4	29	146,6	98,8	

Tableau 20: Bilan hydrique hebdomadaire du mil en 1992
(mm/semaine)

semaine de l'année 92	LAI (m2/m2)	Pluie (mm)	Nombre de pluies	ETR	P-ETR	P-ETR cumulées
30	0,0	26,7	2	13,6	13,1	13,1
31	0,0	52,5	2	15,1	37,4	50,5
32	0,1	7,5	1	10,3	-2,8	47,7
33	0,5	27,0	3	12,6	14,4	62,0
34	1,2	56,7	3	16,8	39,9	101,9
35	2,5	93,4	6	19,5	73,9	175,9
36	2,8	26,0	1	19,9	6,1	182,0
37	2,7	31,4	1	21,2	10,2	192,2
38	2,3	21,6	2	15,9	5,7	197,8
39	1,5	0,0	0			
40	1,4	0,0	0	13,7	-13,7	169,3
41	1,1	0,0	0	11,4	-11,4	157,9
Total		342,8	21	184,8	158,0	

certaine complémentarité dans l'utilisation de ces ressources est recherchée entre les cultures composantes de l'association. L'association de 2 espèces ayant des exigences bien différentes au cours de leur cycle de développement, permet de réduire notablement l'incertitude liée au climat (Baldy, 1986). Un exemple d'association couramment utilisée au Niger est le semis du niébé à l'inter-rang d'une culture de mil. Cette association a donné une production supérieure de 20 à 40 % par rapport aux cultures pures prises isolement, et une efficacité d'utilisation de l'eau meilleure en association qu'en culture pure, lors d'un essai réalisé par Nouri et al. (1989) à Tarna et Kollo.

Quant à l'agroforesterie, son intérêt réside non seulement dans la mobilisation des eaux et nutriments de profondeur souvent non accessibles à la culture, mais aussi dans la modification du microclimat dans un sens favorable à la culture et la réduction de l'érosion hydrique et éolienne.

Le sarclage permet une certaine économie d'eau et d'éléments minéraux, par l'élimination de plantes adventices qui concurrencent la culture. Cependant, en absence de mauvaises herbes, un sarclage peut favoriser une plus grande évaporation du sol. En effet, dans la première journée qui suit une averse, un sol nu sarclé perd environ 1 mm d'eau de plus qu'un sol à surface encroûté (Le Fevre et al. 1994).

4.4.3 EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU.

Le tableau 21 donne les valeurs d'efficacité d'utilisation de l'eau pour la production de la matière sèche et des graines de mil en 1991 et 1992. Les différences entre les 2 campagnes confirment une fois de plus que le mil a mieux valorisé l'eau de pluie en 1992 qu'en 1991, du fait de la bonne répartition temporelle de la pluviométrie, du semis non tardif, et la haute densité de plantation qui ont caractérisé l'année 1992. Les valeurs d'efficacité ainsi calculées sont tout à fait compatibles avec celles des autres expériences réalisées en région sahéliennes (tableau 21).

Tableau 21: Bilans hydriques et efficacités d'utilisation de l'eau d'une culture de mil suivant plusieurs expériences réalisées en zone sahélienne (Lys. = lysimètre; S.N = sonde à neutrons; Bowen = méthode du bilan d'énergie/rapport de bowen; - non mentionné)

Auteurs	lieu et conditions d'expérimentation	Pluie (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	Production matière sèche (kg/ha)	Production en grains (kg/ha)	WUE matière sèche (kg/mm/ha)	WUE grains (kg/mm/ha)	Durée du cycle considérée (jours)
Kassam et Kowal(1975)	Nord Nigéria + fertilisants	817	-	(Lys.) 330	22519	3828	68,2	11,6	85
Dancette (1971)	Sénégal + fertilisants	360	-	(S.N) 302	4884	1734	16,2	5,7	100
Charoy (1974)	Niger(IRAT) + fertilisants	536	-	(S.N) 366	6650	1900	18,2	5,2	-
Nouri et al.(1989)	Niger(INRAN) + fertilisants			(S.N)					
	Tarna (1984)	227	-	227	-	670	-	2,8	-
	Kollo (1986)	482	-	330	-	1160	-	3,5	-
Payne et al.(1990)	Niger sans fertilisants			(S.N)					
	Chickal(1985)	223	non significatif	201	-	330	-	1,6	85
	N'Dounga(1985)	344	non significatif	272	3114	1170	11,4	4,3	90
	Kala-Paté(1985)	428	significatif	-	1680	443	-	-	97
Fussel et al.(1986)	Niger(ICRISAT) + fertilisants			(S.N)					
	variété CIVT	657	37	392	6500	1696	16,6	4,3	101
	variété locale	657	23	461	9000	1682	19,5	3,6	114
Vachaud et al.(1992)	Niger (ICRISAT)			(S.N)					
	avec fertilisants	440	148	268	3850	-	18,2	-	98
	sans fertilisants	440	207	211	1140	-	4,3	-	98
Amadou et al. (1994)	Niger (INRAN) sans fertilisants			(Bowen)					
	Banizoumbou (1991)	245	-	147	5533	554	37,6	3,8	84
	Banizoumbou (1992)	343	-	185	5972	1363	32,3	7,4	84

4.5 LES MESURES COMPLEMENTAIRES REALISEES.

En plus des mesures des différents flux au dessus du couvert qui ont été effectuées en 1991 et 1992, nous avons procédé en 1992 aux mesures de l'évaporation du sol nu en début de campagne, à l'aide du "micro bowen", de résistance stomatique, de température de surface des feuilles de mil, et des profils de température dans le sol. Ces dernières mesures ont été utilisées dans la paramétrisation des divers compartiments d'un modèle simple de bilan hydrique du mil basé sur les équations de Shuttleworth et al. (1985 et 1990). Nous avons choisi quelques journées (248, 253 et 261) pour illustrer cette série de mesures.

4.5.1 EVAPORATION DU SOL NU

L'évolution des cumuls journaliers de l'évaporation du sol nu (E_{vsol}) depuis la dernière pluie, est représentée à la figure 49. L'évaporation du sol a sa valeur maximale le lendemain de la pluie si l'énergie disponible n'est pas limitante, et décroît de façon exponentielle avec le dessèchement de la surface du sol. L'estimation de cette évaporation peut être envisagée suivant la formule de Ritchie (1972), ou simplement suivant une fonction exponentielle décroissante depuis la date de la dernière pluie:

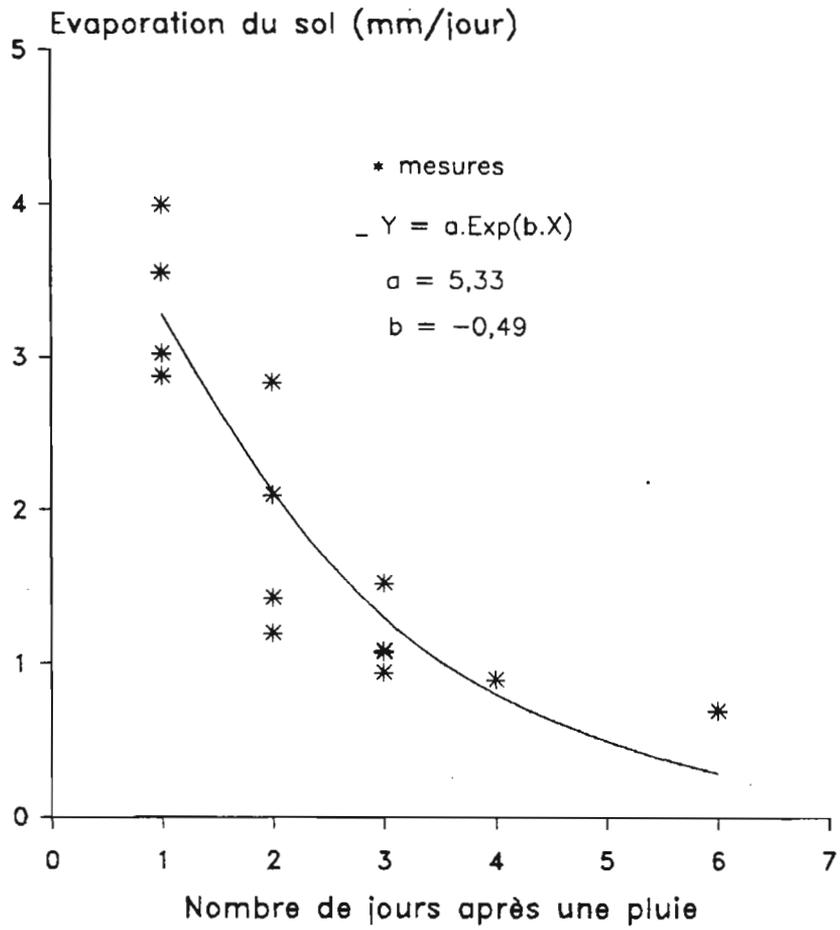
$$E_{vsol} = 5,33 \exp(-0,49JAP) \quad (41)$$

Où JAP est le nombre de jours après la dernière pluie.

4.5.2 MESURES DE RESISTANCE STOMATIQUE ET DE TEMPERATURE DE SURFACE DES FEUILLES DE MIL.

Les exemples de mesures de résistance stomatique et de température de feuille sont représentées sur les figures 50 et 51. les valeurs de résistance stomatique les plus élevées sont mesurées

Figure 49: Evolution de l'évaporation journalière d'un sol nu après une pluie
Banizoumbou, mil bas-fond 1992.



en début et fin de journée. En milieu de journée ces valeurs sont relativement peu variables (environ 200 s/m pour les journées 253 et 261). Plusieurs auteurs (Squire 1979, Henson et al. 1982, Azam-Ali 1983, Azam-Ali et al. 1984, Wallace et al. 1990) ont montré que la résistance stomatique des feuilles de mil varie selon la face de la feuille considérée, son âge et sa position sur la plante ce qui est vérifié avec nos mesures. Comme il a été observé sur d'autres cultures, l'évolution diurne de la résistance stomatique des feuilles de mil, est gouvernée par l'évolution du rayonnement global et du déficit de saturation de l'air (Squire 1979, Henson et al. 1982). Au cours du cycle cultural, les moyennes journalières de cette résistance varient en raison inverse de l'indice foliaire (Azam-Ali, 1983). Ces indications seront prospectées de façon à établir une relation entre les paramètres climatiques cités et celles des résistances stomatiques mesurées.

En ce qui concerne les températures de surface des feuilles (T_f), elles suivent l'évolution journalière de la température de l'air au niveau de référence (T_a) et sont légèrement inférieures à cette température pour la plupart des mesures réalisées (figure 51).

4.5.3 PROFILS DE TEMPERATURE DANS LE SOL

Les mesures de température de surface du sol sont utilisées dans le calcul des résistances de la surface du sol à la diffusion de la vapeur d'eau selon la formulation de Shuttleworth et Wallace, (1985). Quant aux profils de températures dans le sol, ils sont utilisés pour calculer les flux conductifs de chaleur dans le sol et ainsi corriger les mesures faites à 3 cm de profondeur à l'aide de fluxmètres. Ces mesures peuvent également être utilisées pour la détermination de certaines propriétés thermiques de ces sols. Sur la figure 52, on peut constater que l'amplitude thermique est presque nulle à environ 50 cm de profondeur dans le sol.

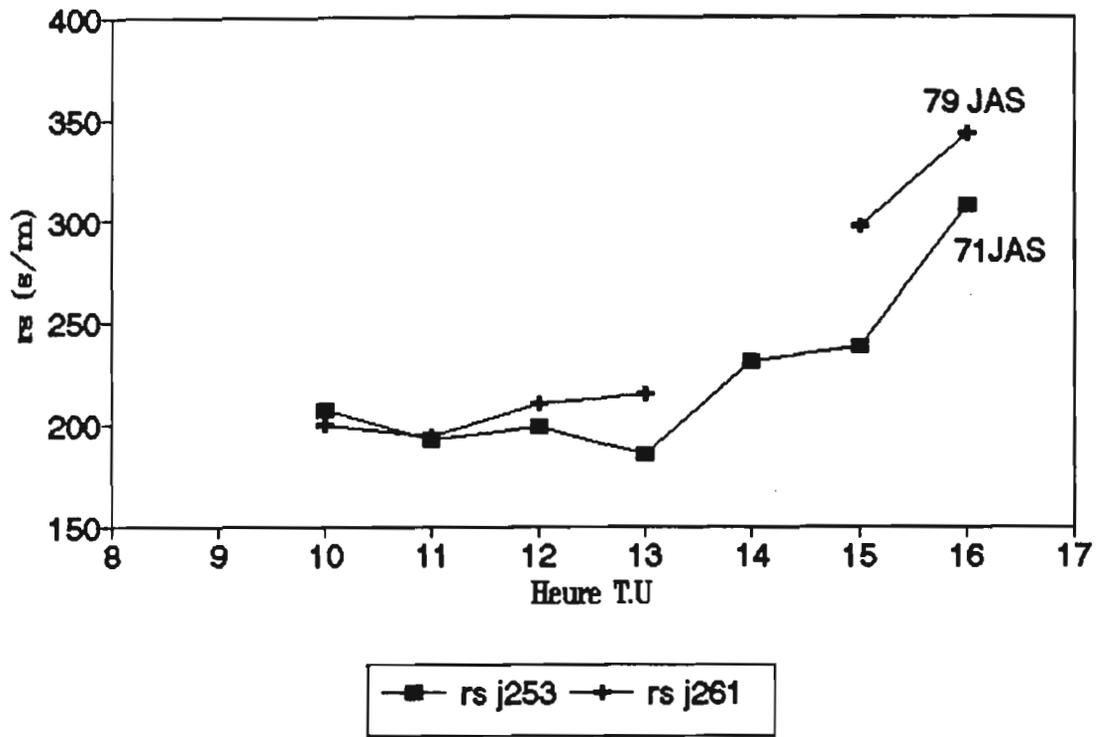


Figure 50: Exemples de mesures de résistance stomatique des feuilles de mil: jour 253 et 261, 1992.

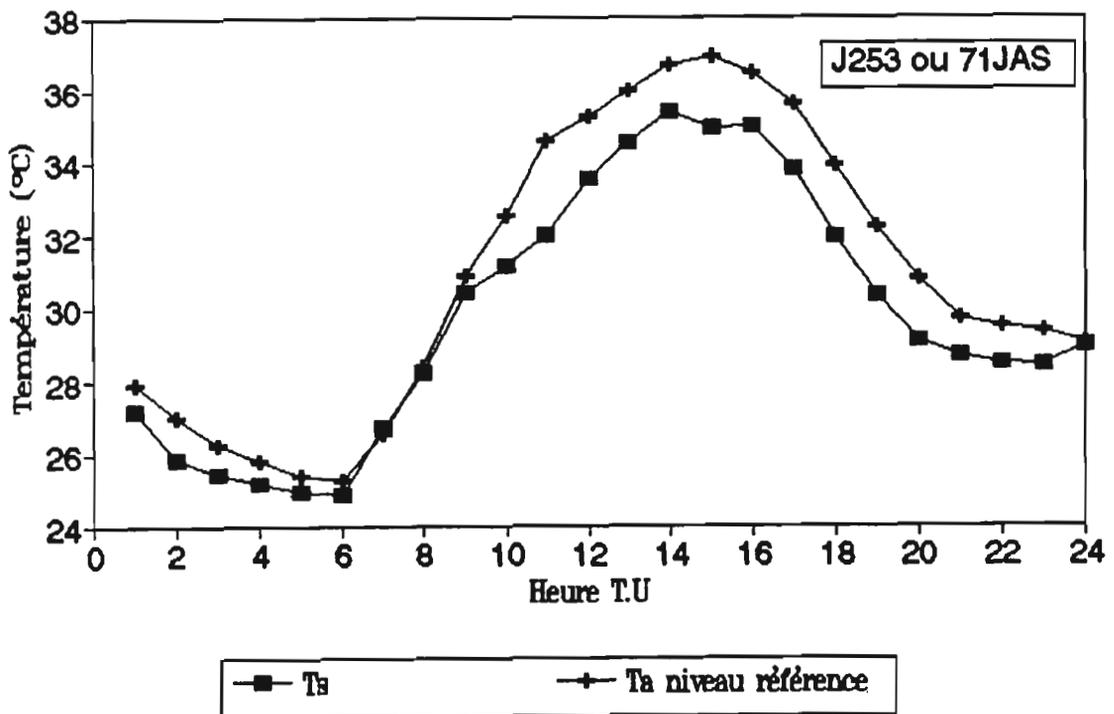
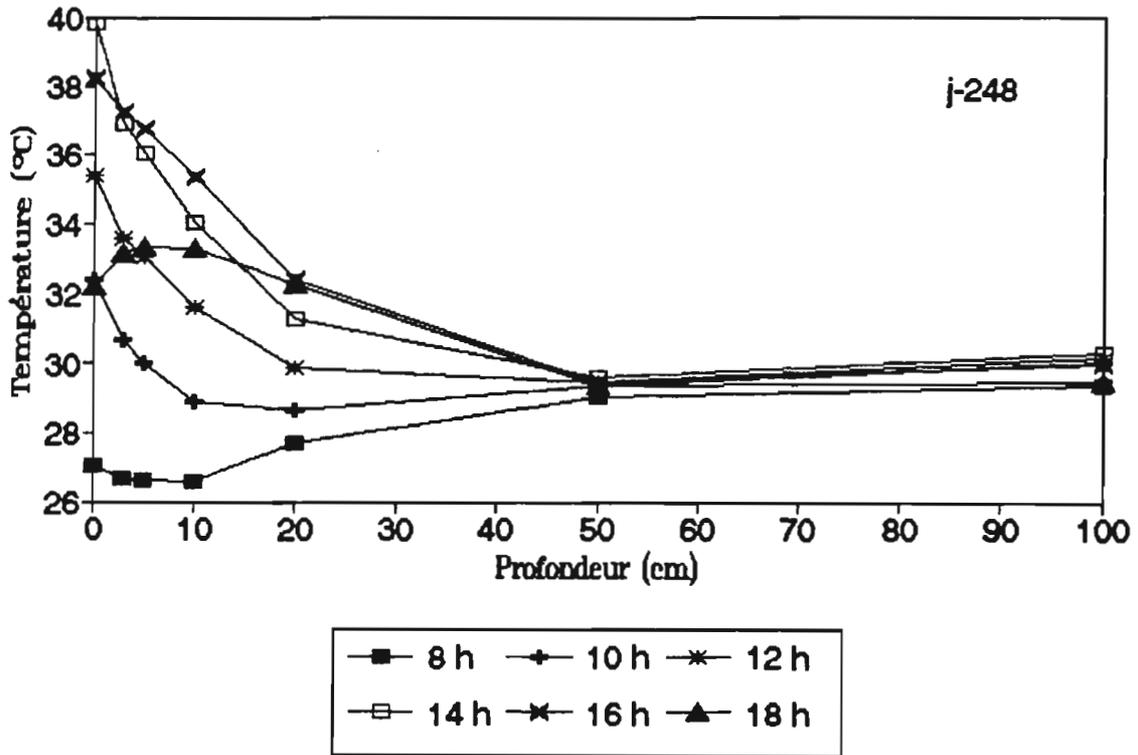
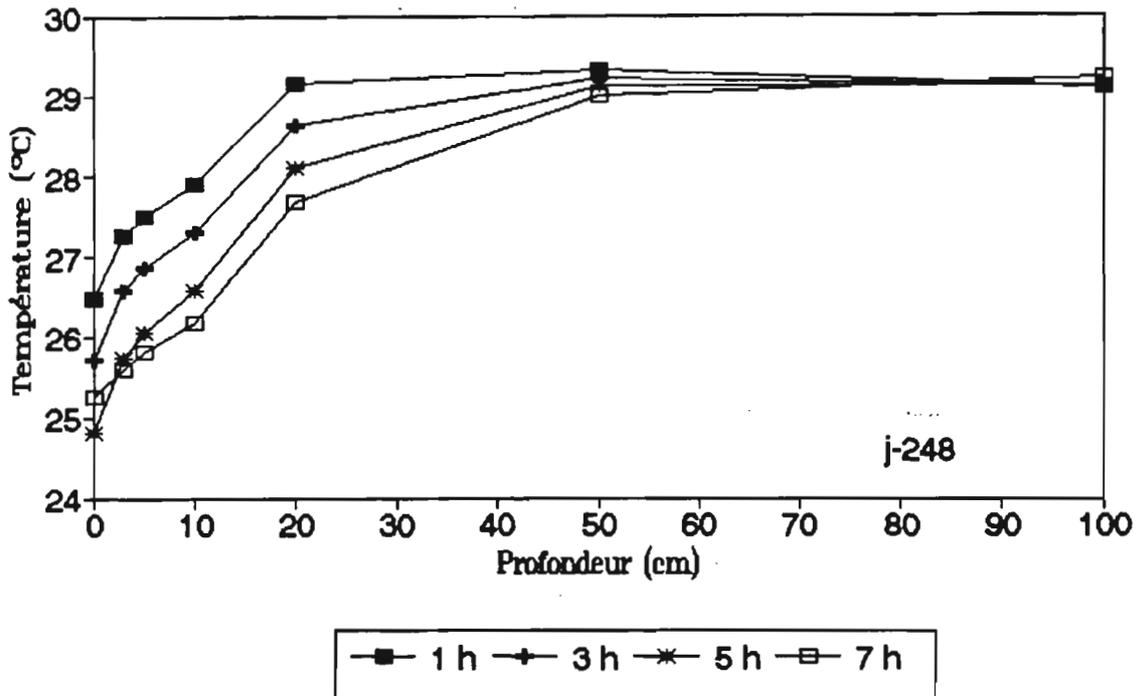


Figure 51: Température de surface des feuilles de mil, comparaison avec celle de l'air au niveau de référence.

Figure 52:



(a): Profils diurnes de température dans le sol (8-18^h): mil bas-fond, 1992.



(b): Profils nocturnes de température dans le sol (1-7^h): mil bas-fond, 1992.

4.6 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Des résultats partiels obtenus au cours de ces 2 campagnes de mesures, sur la phénologie, les transferts radiatif et énergétique d'une culture de mil en champ paysan, il ressort:

- Que les 2 campagnes ont été différentes du point de vue de leurs pluviométries (quantité et répartition). La saison des pluies 1991 a été précoce avec plusieurs périodes sèches et une pluviométrie totale de 522 mm, tandis que la saison 1992 a été tardive avec une bonne répartition temporelle de la pluviométrie et un cumul total de 420 mm. Ces 2 saisons opposées du point de vue de leurs caractéristiques pluviométriques, nous offrent 2 situations très intéressantes pour l'analyse et la modélisation de l'évapotranspiration du mil.

- La description de l'évolution temporelle des différents paramètres biologiques montre une évolution plus régulière de ces paramètres en 1992, en raison du semis non précoce et de la bonne répartition temporelle de la pluviométrie. L'ajustement de ces paramètres biologiques à des lois connues a été fait pour minimiser les fluctuations d'échantillonnage et permettre une interpolation entre dates de mesures, ce qui facilite l'utilisation conjointe de ces mesures biologiques avec les mesures climatiques pour l'élaboration du modèle. Ces paramètres sont classés en 2 catégories: ceux dont l'évolution temporelle suit une loi de GAUSS (LAI, degré de recouvrement, nombres de talles et de feuilles), et ceux dont l'évolution temporelle se fait suivant un modèle logistique (hauteur de la tige, profondeur racinaire, et les poids de la biomasse sèche aérienne et racinaire).

- De l'étude des transferts radiatif et énergétique, il a été établi des relations empiriques permettant d'estimer, d'une part le bilan de grandes longueurs d'ondes à partir du bilan des courtes longueurs d'ondes, et d'autre part, la quantité d'énergie disponible pour la plante (R_n) à partir du rayonnement global et selon le stade phénologique de la culture. Le calcul du bilan hydrique sur l'ensemble du cycle, a révélé la faible efficacité d'utilisation de l'eau de pluie par le mil en champ paysan. Environ 40 % de la pluviométrie annuelle ne sont pas utilisés par la culture. Ces

résultats viennent confirmer les idées récentes de certains auteurs qui réfutent la mise en avant systématique de l'eau comme véritable facteur limitant la production du mil au Sahel. Les voies et moyens permettant de valoriser l'eau qui échappe au système racinaire de la culture doivent être recherchées. Des solutions sont envisagées, il s'agit principalement: de l'amélioration des conditions de fertilité du sol, en particulier l'amendement organique (Forest 1991), dont il est suggéré des apports plus fréquents de petites quantités de fumure plutôt que de grandes quantités appliquées moins fréquemment (Brouwer et Powell 1994). L'association des cultures est également une autre alternative au problème de la valorisation de l'eau. Cette pratique réduit l'incertitude liée au climat (Baldy, 1986), et améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau (Nouri et al. 1989). L'agroforesterie et les sarclages sont aussi envisagés pour valoriser les quantités d'eau et d'éléments minéraux qui échappent au contrôle de la culture. Les modalités pratiques d'application de toutes ces solutions sont à définir pour chaque condition pédoclimatique donnée.

- Les mesures complémentaires réalisées en 1992 sur l'évaporation du sol nu, la résistance stomatique, les températures de surface du sol et des feuilles, seront utilisées pour paramétrer les divers compartiments d'un modèle de couvert épars, afin de proposer un modèle simple de bilan hydrique du mil à partir des paramètres climatiques classiques. Ce travail va consister à étudier les évolutions des 2 principales résistances au transfert des flux de chaleur latente provenant de la plante (résistance stomatique) et du sol (résistance de la surface du sol), afin de proposer une formulation de l'évolution de ces résistances au cours du cycle cultural. Les équations proposées prendront en compte les paramètres climatiques (rayonnement global, pluie, température, ETP, vent, etc...), les fonctions biologiques (LAI, hauteur, degré de recouvrement, etc...) et l'état d'humidité du sol. Les formules retenues seront ensuite introduites dans le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985), ce qui permettra une estimation de l'ETR du mil avec la possibilité de séparer les 2 composantes: évaporation du sol et transpiration de la plante.

Chapitre 5

MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DU MIL

Chapitre 5

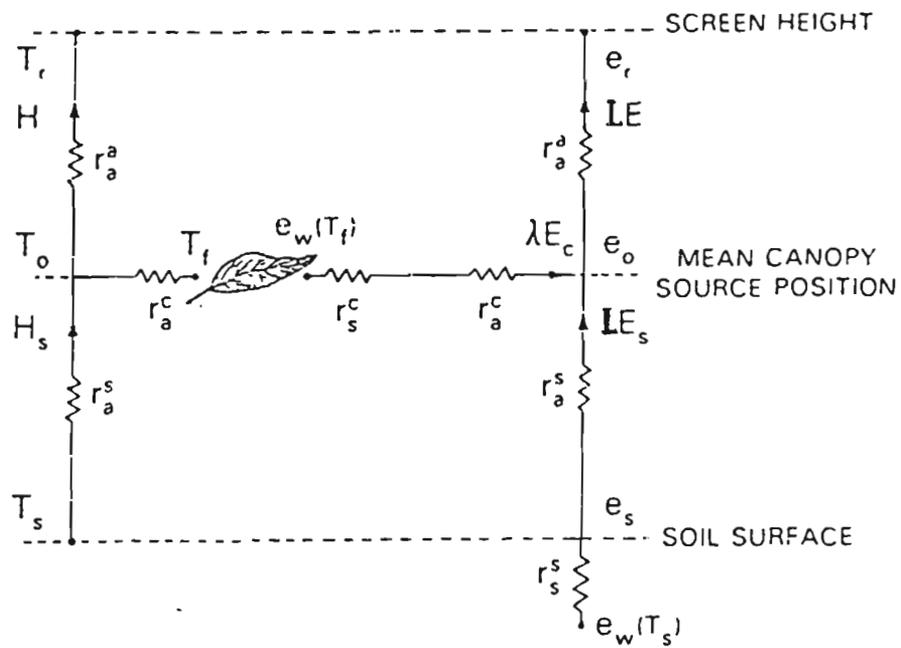
MODELISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION DU MIL

Le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985), schématisé à la figure 8, donne la meilleure expression analytique des flux d'évaporation d'un couvert épars (Saugier et Katerji, 1991), mais la méconnaissance de certaines variables d'entrée de ce modèle complique son utilisation sur le plan pratique. L'un des principaux obstacles à son utilisation est l'estimation de la résistance de la couche sèche de surface du sol à la diffusion du flux de vapeur d'eau provenant du sol. Aucune alternative de mesure directe de cette résistance n'est proposée dans la littérature. Seule une mesure de l'évaporation du sol permet de l'estimer de façon indirecte. Par ailleurs, la variation au cours d'un cycle cultural de toutes les résistances au transfert des flux, ainsi que l'effet des épisodes pluvieux sur les valeurs de r_s , rendent complexe le suivi sur l'ensemble d'un cycle cultural de l'évapotranspiration d'un couvert épars à l'aide de ce modèle. Dans le présent chapitre, nous tentons de pallier certaines de ces difficultés et ainsi rendre opérationnel ce modèle sur l'ensemble du cycle cultural du mil cultivé en milieu réel. Ce travail va consister à paramétrer les divers compartiments du modèle, en proposant une formulation de la répartition de l'énergie disponible entre le sol et la végétation, et des formulations des différentes résistances (aérodynamiques et de surface) du couvert, à partir des paramètres climatiques classiques et qui prennent en compte l'évolution phénologique de la culture.

5.1 DESCRIPTION DU MODELE.

5.1.1 LES EQUATIONS DU BILAN D'ENERGIE

Dans un couvert épars représenté par un modèle bi-couche comme celui de Shuttleworth et Wallace (1985) (figure 8), la



Schematic diagram of the one-dimensional model of crop energy partition which includes the interaction of the substrate and is the framework of the Shuttleworth and Wallace (1985) theory of sparse-crop evaporation.

Figure 8: Schéma du modèle de couvert épars de Shuttleworth Wallace (1985).

répartition de l'énergie disponible au dessus du couvert (A) entre le sol (A_s) et la végétation (R_n^c) est formulée comme suit:

- Au dessus du couvert

$$\begin{aligned} A &= R_n - G \\ &= LE + H \end{aligned} \quad (42)$$

- Au niveau du sol:

$$\begin{aligned} A_s &= R_n^s - G \\ &= LE_s + H_s \end{aligned} \quad (43)$$

- le rayonnement net absorbé par la végétation est donné par la relation:

$$\begin{aligned} R_n^c &= A - A_s \\ &= R_n - R_n^s \\ &= LE_c + H_c \end{aligned} \quad (44)$$

Où R_n , R_n^s et R_n^c ($W.m^{-2}$) représentent respectivement les rayonnements nets au dessus du couvert, à la surface du sol et absorbé par la végétation. LE , LE_s et LE_c ($W.m^{-2}$), sont les densités de flux de chaleur latente provenant respectivement de l'ensemble du couvert, de la surface du sol et de la végétation. H , H_s et H_c ($W.m^{-2}$), les densités de flux de chaleur sensible provenant respectivement de l'ensemble du couvert, du sol et de la végétation. G ($W.m^{-2}$) est le flux de chaleur conductif dans le sol.

La résolution de ces 3 équations nécessite une fonction de répartition de l'énergie disponible entre le sol et la végétation. L'approche la plus couramment utilisée sur les couverts épars est la loi de Beer qui suppose une décroissance exponentielle du rayonnement net en fonction de l'indice foliaire (LAI) et de l'indice de surface des panicules (PAI) dans le cas du mil. Ainsi R_n^s s'écrirait:

$$R_n^s = R_n \exp[-K_n(LAI + PAI)] \quad (45)$$

et pour la végétation

$$R_n^c = R_n \{1 - \exp[-K_n(LAI + PAI)]\} \quad (46)$$

Où K_n est le coefficient d'extinction du rayonnement net à l'intérieur du couvert. Wallace et al. (1990) ont proposé une valeur moyenne de $K_n = 0,41$ à partir de plusieurs mesures effectuées sur le mil à l'aide de 5 bilanmètres linéaires placés au dessus de la culture et 4 autres placés à 15 - 20 cm au dessus de la surface du sol.

5.1.2 LA FORMULATION DES FLUX DE CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE

Les flux de chaleur sensible et latente au dessus du couvert sont donnés par les équations 23 et 24 (Shuttleworth et Wallace 1985). Ceux provenant de la végétation et du sol, sont formulés par Shuttleworth et Gurney (1990) suivant les équations ci-dessous:

- D'une part les flux de chaleur sensible provenant de la végétation;

$$H_c = \frac{\rho C_p (T_f - T_o)}{r_a^c} \quad (47)$$

- provenant de la surface du sol;

$$H_s = \frac{\rho C_p (T_s - T_o)}{r_a^s} \quad (48)$$

- D'autre part les flux de chaleur latente provenant de la végétation;

$$LE_c = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_w(T_f) - e_o}{r_a^c + r_a^s} \quad (49)$$

provenant de la surface du sol;

$$LE_s = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_v(T_s) - e_o}{r_s^a + r_s^c} \quad (50)$$

5.1.3 FORMULATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DU SOL ET DE LA VEGETATION.

En combinant les équations 24, 42, 44 et 47, suivant Shuttleworth et Gurney (1990), une expression de la température de surface des feuilles de la végétation en fonction de la température de l'air au niveau de référence (T_r), de LE , LE_c , A , A_s , r_s^a , et r_s^c , est formulée:

$$T_f = T_r + (A - LE) r_s^a / \rho C_p + (A - A_s - LE_c) r_s^c / \rho C_p \quad (51)$$

La température de la surface du sol (T_s) est obtenue à partir de l'équation 48, connaissant H_s , T_o et r_s^c .

5.1.4 FORMULATION DES RESISTANCES AU TRANSFERT DES FLUX

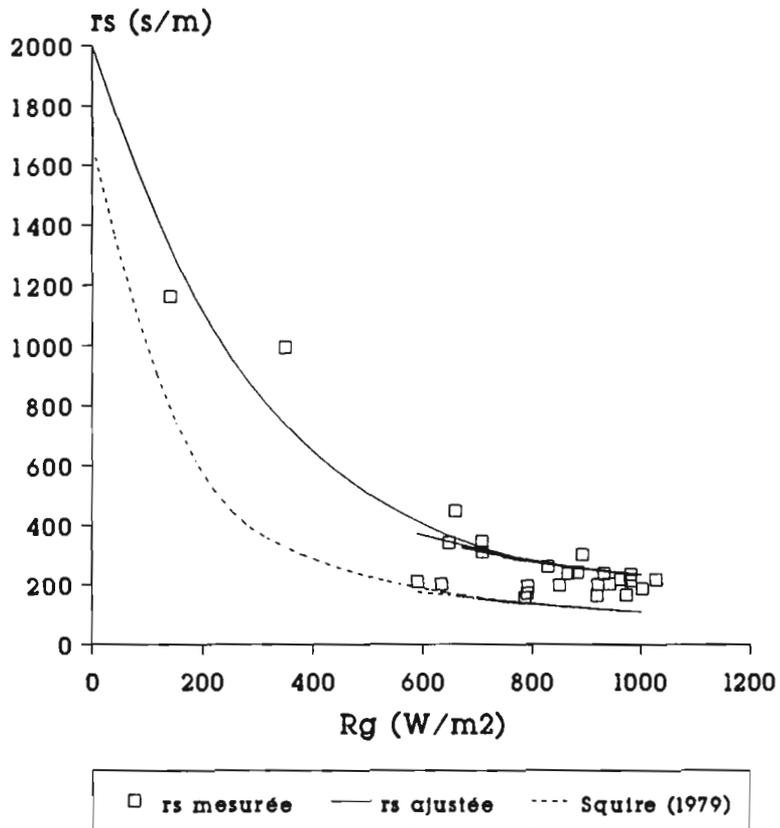
Suivant l'analogie électrique de la loi d'OHM, les diffusions de la chaleur et de la vapeur d'eau provenant d'un couvert végétal se voient freinées, en surface par la résistance de la couche limite des 2 faces de la feuille (r_b) et par la résistance des stomates dans le cas de la transpiration (r_s), et dans la direction verticale par la résistance aérodynamique (r_s^a). Quant aux flux de chaleur et de vapeur d'eau provenant du sol, ils sont freinés en surface par la résistance de la couche sèche de surface du sol (r_s^a) et dans la direction verticale par une résistance aérodynamique opposée par la structure du couvert (r_s^c).

5.1.4.1 LES RESISTANCES DE SURFACE

- Résistance stomatique

La résistance stomatique joue un rôle clé dans le contrôle de l'activité transpiratoire d'une plante. Son évolution diurne est gouvernée par plusieurs paramètres du climat dont le rayonnement solaire et le déficit de saturation de l'air (Squire 1979, Henson et al. 1982) et d'autres paramètres relatifs à l'état hydrique du sol. Ses variations temporelles systématiques, ainsi que sa grande variabilité spatiale complique sa détermination précise à l'échelle du couvert (Katerji, 1992). Plusieurs auteurs ont réalisé des mesures de résistance stomatique sur le mil (Squire 1979, Henson et al. 1982, Azam-Ali 1983, Azam-Ali et al. 1984, Wallace et al. 1990). Il ressort de ces études que la résistance stomatique des feuilles de mil varie selon la face de la feuille considérée, son âge et sa position sur la plante, ce qui est vérifié sur d'autres cultures comme la luzerne (Katerji et Perrier, 1983). Wallace et al. (1990) montrent que la face supérieure d'une feuille de mil présente une conductance stomatique inférieure (d'environ 25%) à celle de la face inférieure. Par ailleurs les auteurs précisent qu'il n'existe pas de relation clairement établie entre les conductances de ces 2 faces. En ce qui concerne la dépendance de la résistance stomatique en fonction des paramètres climatiques, Squire (1979) montre que c'est surtout le rayonnement global qui explique le mieux l'évolution diurne de la résistance stomatique des feuilles de mil lorsque celui-ci est cultivé en conditions sèches (mil non irrigué), et que par contre c'est le déficit de saturation de l'air qui gouverne cette évolution lorsque le mil est irrigué. Considérant que l'évolution nyctémérale de l'ouverture et de la fermeture des stomates impose une valeur minimale de la résistance stomatique en l'absence de stress hydrique dans le sol, et prenant en compte les observations de Squire (1979), nous avons opté pour un modèle simple de prévision de la résistance stomatique en fonction du rayonnement global. Il s'agit de l'expression

Figure 53: Résistance stomatique des feuilles de mil (r_s) en fonction du rayonnement global (R_g).



proposée par Avissar et al. (1985), utilisée par KHOUJA (1990) sur le maïs:

$$rs = rs_{\min} + (rs_{\max} - rs_{\min}) \cdot f(Rg) \quad (52)$$

où $rs = 200 + (2000 - 200) \cdot \exp(-0,004 \cdot Rg)$

avec rs : la résistance stomatique équivalente des feuilles du mil (s/m); rs_{\min} et rs_{\max} : les résistances stomatiques équivalentes minimale et maximale des feuilles. $f(Rg)$: une fonction du rayonnement global (W/m²). Les paramètres rs_{\min} , rs_{\max} et $f(Rg)$ ont été déterminés expérimentalement à partir de cinétiques journalières (5 journées) de mesures de résistances stomatiques des feuilles de mil et des mesures du rayonnement global sur le parc climatique (Figure 53). Si rst_{sup} et rst_{inf} sont respectivement, les résistances stomatiques moyennes de la face supérieure et inférieure de l'ensemble des feuilles, la résistance stomatique équivalente des 2 faces de ces feuilles (rs) est calculée comme suit:

$$rs = \left\{ \left(\frac{1}{rst_{sup}} \right) + \left(\frac{1}{rst_{inf}} \right) \right\}^{-1} \quad (53)$$

Suivant Shuttleworth et Wallace (1985), la résistance stomatique moyenne de la culture (r_s^c), est inversement proportionnelle au LAI global du couvert.

$$r_s^c = rs/LAI \quad (54)$$

Sur la figure 53, nous avons reporté également une fonction d'estimation de la résistance stomatique du mil en fonction du rayonnement global, établie par Squire (1979) en Inde Centrale. Cette fonction ne diffère pas trop de celle que nous avons obtenue, en dépit des conditions expérimentales différentes (climat, variétés, etc...).

- Résistance de la couche limite du couvert (r_a^c)

La résistance de la couche limite du couvert (r_a^c) est inversement proportionnelle au LAI. Son expression prend en compte les résistances de couche limite de chaque face de la feuille de mil (r_b):

$$r_a^c = r_b / 2LAI \quad (55)$$

Shuttleworth et Gurney (1990) ont utilisé la formulation de Choudhury et Monteith (1988) en rajoutant une hypothèse supplémentaire sur la similarité de la décroissance exponentielle de la diffusité turbulente et celle de la vitesse du vent à l'intérieur du couvert. Ils calculent la résistance de la couche limite des feuilles (r_b) en considérant que l'écoulement de l'air au dessus d'une couche laminaire de feuille est analogue au phénomène de diffusion moléculaire.

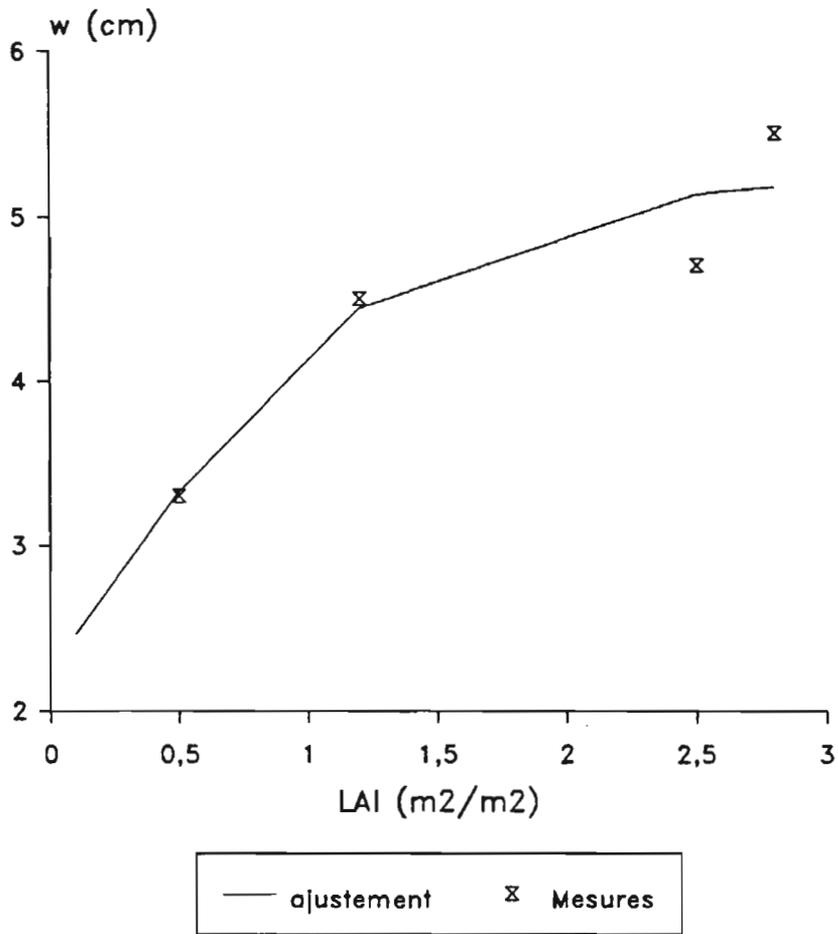
$$r_b = \frac{(100/n') \cdot (w/u_b)^{1/2}}{1 - \exp(-n'/2)} \quad (56)$$

Où u_b est la vitesse du vent au sommet du couvert, elle est calculée à partir de la vitesse du vent au niveau de référence, en considérant un profil logarithmique de cette vitesse au dessus du couvert. w , est la largeur moyenne des feuilles et n' le coefficient d'atténuation de la vitesse du vent dans le couvert. Nous reviendrons plus tard sur la valeur de ce coefficient. La largeur moyenne des feuilles évoluant au cours du cycle cultural (figure 54), une fonction logistique a été utilisée pour simuler sa variation en fonction du LAI.

$$w = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(-c \cdot LAI)} \quad \text{en cm} \quad (57)$$

avec $a = 5,24$ $b = 1,33$ $c = 1,6$

Figure 54: Evolution de la largeur moyenne des feuilles du mil (w) en fonction du LAI.



Les valeurs des coefficients a, b et c ont été déterminés statistiquement à l'aide des mesures de w réalisées sur tout le cycle.

- La résistance de la couche sèche de surface du sol au flux de vapeur d'eau

La résistance de la surface du sol est calculée suivant l'équation 58 (Shuttleworth et Wallace 1985) en utilisant les mesures simultanées en début de cycle de l'évaporation du sol nu (LE_s), de la pression de vapeur d'eau de l'air à la surface du sol (e_s), et de la température de surface du sol (T_s). LE_s et e_s sont mesurés à l'aide du "micro-bowen". e_s est considérée comme étant égale à la pression de vapeur d'eau de l'air du premier niveau du "micro-bowen". (25 cm au dessus de la surface du sol). T_s est mesurée à l'aide d'un radiothermomètre infra-rouge.

$$r_s^* = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{\{e_v(T_s) - e_s\}}{LE_s} \quad (58)$$

Le meilleur paramètre expliquant l'évolution de r_s^* , est l'humidité de surface du sol, mais sa mesure à l'échelle de temps horaire est assez rare. Par ailleurs pour limiter le nombre de paramètres d'entrée du modèle et être le moins dépendant possible des paramètres du sol, nous avons choisi d'exprimer les valeurs horaires de r_s^* , en fonction de l'évapotranspiration potentielle (Penman 1948) cumulée depuis la dernière pluie, (ETP_{cum}). Les figures 55, 56 et 57, montrent les évolutions des valeurs horaires de cette résistance en fonction de l'ETP cumulée pour 3 épisodes pluvieux de hauteurs différentes (26 mm, 12mm et 40 mm). On peut constater que l'on retrouve le même type d'évolution lorsque les 3 séries sont juxtaposées (figure 58), avec une valeur de départ de r_s^* , de l'ordre de 80 s.m^{-1} et une valeur finale dépendant de la durée du temps entre 2 pluies. Par ailleurs des réhumectations nocturnes (remontées capillaires et rosée) provoquent une diminution de la valeur de r_s^* , en début de journée (figure 55 et 56). En milieu de

Figure 55:

Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée après une pluie: J205, 206 et 207.

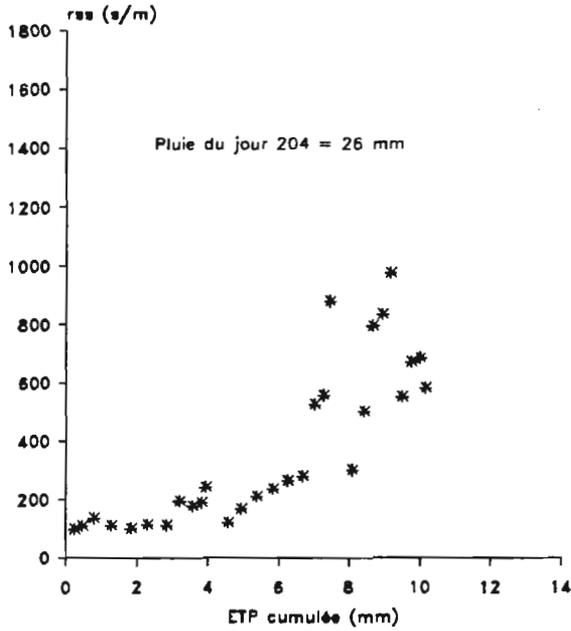


Figure 56:

Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée après une pluie: J210, 211, et 212.

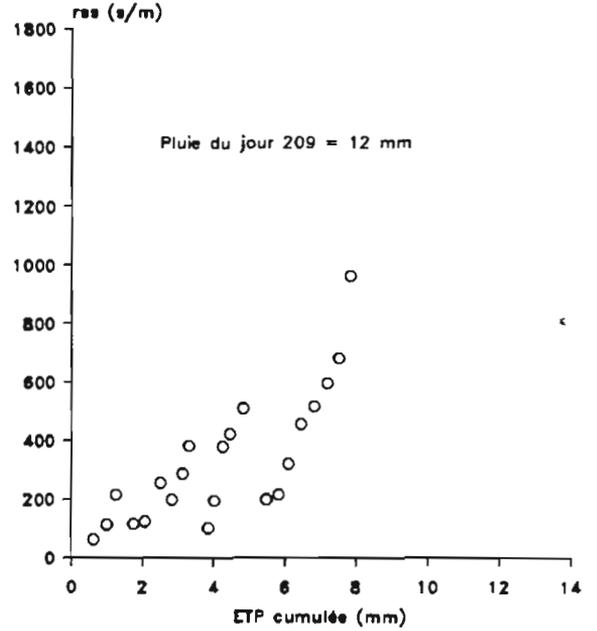


Figure 57:

Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée après une pluie: J214, 215, 216, 217

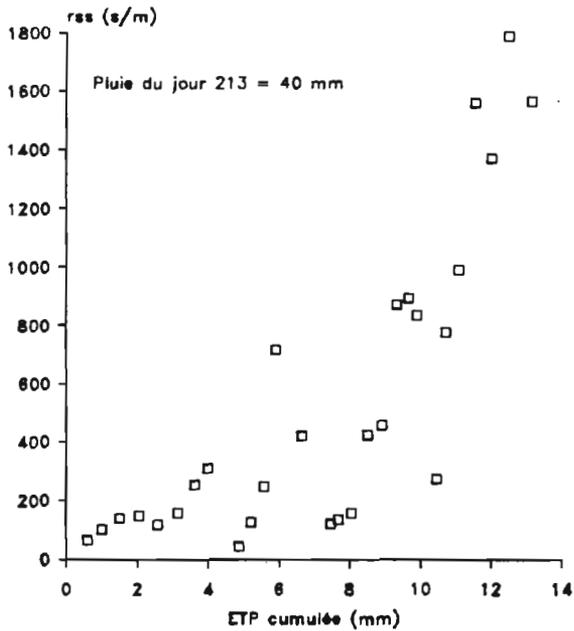
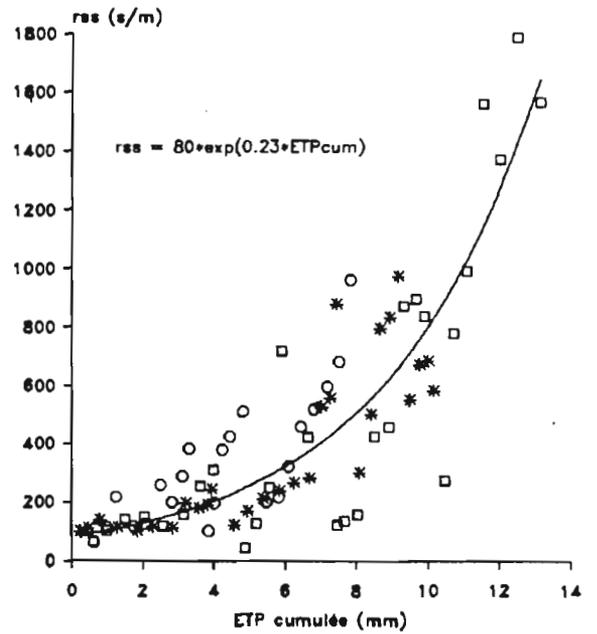


Figure 58:

Evolution de rss en fonction de l'ETP cumulée après la pluie: série J205 (*), série J210 (o) et série 214 (□).



journée la résistance reste proportionnelle à l'ETP cumulée depuis la pluie. Si nous considérons les valeurs de r_s^a , entre 9^h00 et 16^h00 T.U, évitant ainsi l'effet des réhumectations, l'évolution diurne de r_s^a , peut être représentée selon une fonction exponentielle de l'ETP cumulée au dessus du couvert (équation 59). Ainsi, en début de cycle avec un LAI = 0, on aura:

$$r_s^a = 80 \cdot \exp(0,23 \cdot ETP_{cum}) \quad (59)$$

Avec ETP_{cum} exprimé en mm et r_s^a , en $s \cdot m^{-1}$. La résistance de la couche sèche du sol est une résistance de surface qui évolue au cours du cycle en raison inverse de la fraction de sol nu ($1-Dr$), Dr , étant la fraction de sol effectivement recouverte par la végétation. Les valeurs de la résistance de surface du sol au cours du cycle ($r_s^{a'}$) sont obtenues en divisant r_s^a , par la fraction de sol nu ($1-Dr$).

$$r_s^{a'} = r_s^a / (1-Dr) \quad (60)$$

5.1.4.2 LES RESISTANCES AERODYNAMIQUES

Les résistances d'origines aérodynamiques, au dessus du couvert entre le niveau $d+z_0$, et le niveau de référence (r_s^a), et à l'intérieur du couvert entre le sol et le niveau $d+z_0$ ($r_s^{a'}$), ont été calculées suivant les formulations de Shuttleworth et Gurney (1990), à partir des mesures de la vitesse du vent au niveau de référence et du suivi au cours du cycle cultural des caractéristiques phénologiques de la culture (densité, hauteur moyenne, LAI). d , étant la hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique et z_0 , la longueur de rugosité du couvert.

Shuttleworth et Wallace (1985), considèrent un régime de neutralité thermique, et calculent r_s^a , par intégration de l'équation inverse de la diffusivité turbulente, d'une part, entre le niveau $d+z_0$, et le sommet du couvert (niveau h) en considérant un profil

exponentiel de cette diffusivité turbulente, et d'autre part, entre le sommet du couvert et le niveau de référence en considérant un profil logarithmique de la vitesse du vent (équation 61). r_a^s , est quant à elle calculée par intégration de l'équation inverse de la diffusivité turbulente entre la surface du sol et le niveau $d+z_0$, en prenant un profil exponentiel de cette diffusivité (équation 62).

$$r_a^s = \frac{1}{k \cdot u^*} \ln \left[\frac{z_r - d}{h - d} \right] + \frac{h}{n \cdot K_b} \{ \exp [n(1 - Z/h)] - 1 \} \quad (61)$$

$$r_a^s = \frac{h \cdot \exp(n)}{n \cdot K_b} [\exp(-n \cdot z_0'/h) - \exp(-n \cdot Z/h)] \quad (62)$$

avec

$$K_b = k \cdot u^* \cdot (h - d) \quad (63)$$

$$u^* = k \cdot u / \ln \{ (z_r - d) / z_0 \} \quad (64)$$

$$Z = z_0 + d \quad (65)$$

où, K_b est la diffusivité turbulente, u^* la vitesse de frottement, u la vitesse du vent au niveau de référence (z_r), $k=0,4$ la constante de Von Karman, h la hauteur du couvert, $z_0'=0,01$ la longueur de rugosité du sol, n est le coefficient d'atténuation de la diffusivité turbulente à l'intérieur du couvert.

Considérant que la résistance aérodynamique au dessus du couvert varie en fonction de la vitesse du vent, de la hauteur de la culture et de la stabilité des basses couches atmosphériques (Itier et Katerji, 1983), nous avons utilisé l'expression de Choudhury et al. (1986), appliquée par Lhomme et al. (1994) sur le mil, pour corriger les valeurs de r_a^s des effets d'instabilité. La nouvelle résistance aérodynamique corrigée ($r_a^{s'}$) est exprimée comme suit:

$$r_a^{s'} = r_a^s / (1 + \eta)^p \quad (66)$$

avec $p = 3/4$ en conditions d'instabilité et $p = 2$ en conditions de stabilité. η étant défini par:

$$\eta = 5(z_r - d)g(T_s - T_a)/(T_a u^2)$$

Où g est l'accélération de la pesanteur, T_a la température de l'air au niveau de référence, et T_s la température de surface du couvert, considérée ici comme égale à T_o

Par ailleurs, alors que Shuttleworth et Wallace (1985) ont considéré une fraction constante de la hauteur du couvert pour les valeurs de z_o et d ($z_o = 0,13h$ et $d = 0,63h$), comme il a été suggéré par Monteith (1973), Shuttleworth et Gurney (1990) ont rectifié cette approximation en proposant une nouvelle formulation de z_o et d pour les couverts épars qui prend en compte le LAI.

$$d = 1,1.h.\ln[1 + (0,07.LAI)^{1/4}] \quad (67)$$

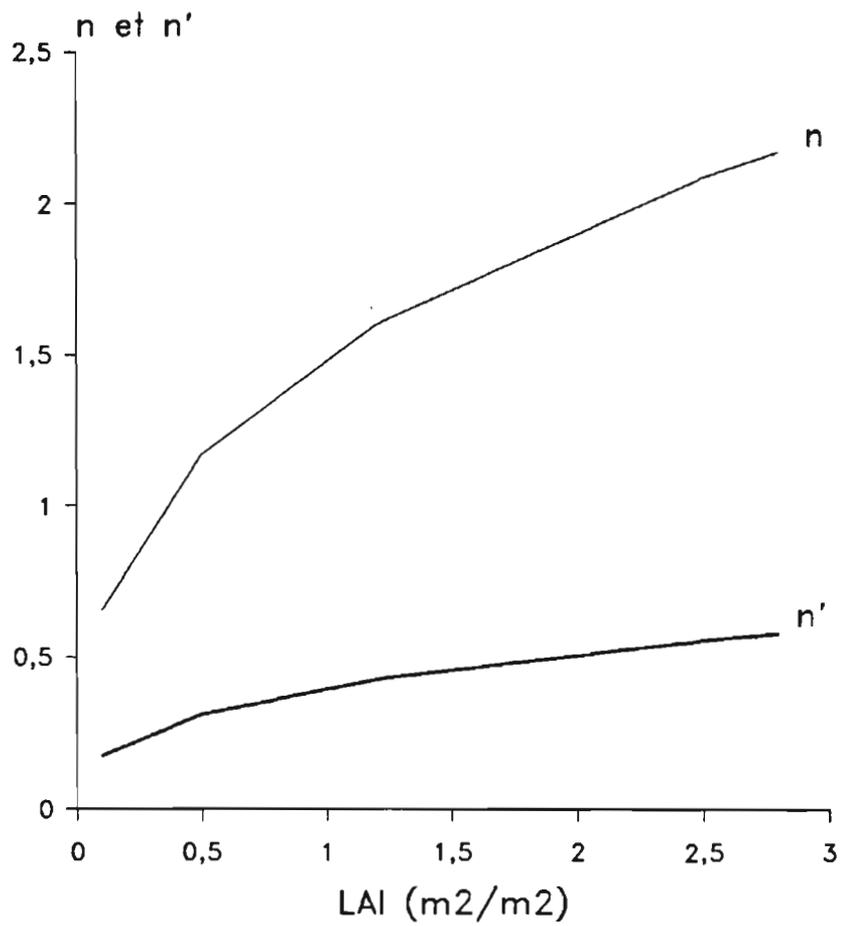
$$z_o = z_o' + 0,3.h(0,07.LAI)^{1/2} \quad \text{pour } LAI < 2,85 \quad (68)$$

$$z_o = 0,3.h.(1 - d/h) \quad \text{pour } LAI > 2,85 \quad (68)$$

En effet, l'ancienne formulation plus commode dans le cas des couverts continus, donne des valeurs irréalistes dans le cas des couverts épars (Matthias et al., 1990).

En ce qui concerne les coefficients d'atténuation de la diffusivité turbulente et de la vitesse du vent à l'intérieur du couvert, Shuttleworth et Wallace (1985), ainsi que Shuttleworth et Gurney (1990), ont utilisé un coefficient d'atténuation de la vitesse du vent (n') et de la diffusivité turbulente (n) constant: $n = n' = 2,5$. Mais Lafleur et Rouse (1990), critiquant leur approche, affirment que du moment où ces coefficients dépendent de l'architecture du couvert, qui évolue en fonction du LAI et de la hauteur du couvert, n et n' ne doivent pas être constants au cours du cycle cultural. Ces auteurs montrent qu'en prenant une valeur constante sur tout le cycle de ces 2 coefficients, on

Figure 59: Ajustement des coefficients d'atténuation de la vitesse du vent (n') et de la diffusivité turbulente (n) en fonction du LAI



aboutit à une sous-estimation des flux d'évaporation d'un couvert épars pour les faibles LAI ($LAI \leq 1$), et que c'est seulement dans la zone des LAI maxima que les flux mesurés correspondent à ceux estimés par la formulation de Shuttleworth et Gurney (1990). Ils formulent: $n = n' = y \cdot (LAI)^x$, où y et x sont deux coefficients dépendants de la nature du couvert.

Suivant Nichols (1992) qui suggère une atténuation de la vitesse du vent différente de celle de la diffusivité turbulente ($n \neq n'$) sur les couverts épars, et tenant compte des remarques formulées par Lafleur et Rouse (1990) sur les mêmes types de couverts, nous avons utilisé dans le cadre de cette étude un coefficient d'atténuation de la diffusivité turbulente (n) différent du coefficient d'atténuation de la vitesse de vent (n') dans le couvert, ces 2 coefficients évoluant en fonction du LAI.

$$n = y \cdot (LAI)^x \quad \text{avec } y = 1,5 ; x = 0,36 \quad (69)$$

$$n' = y' \cdot (LAI)^{x'} \quad \text{avec } y' = 0,4 ; x' = 0,36 \quad (70)$$

Les valeurs maximales de n et n' proposées dans la littérature pour les couverts épars ($n_{\max} = 2,5$ et $n'_{\max} = 0,6$) et les mesures de LAI ont permis de déterminer par ajustement les valeurs des coefficients y et y' ; les valeurs de x et x' sont celles qui ont été proposées par Lafleur et Rouse (1990) (figure 59).

5.1.5 LES FONCTIONS BIOLOGIQUES UTILISEES

Il s'agit des variables relatives à la phénologie de la culture: LAI, hauteur et pourcentage de recouvrement principalement. A défaut de valeurs réellement mesurées, ces paramètres peuvent être estimés pour une saison pluvieuse sans stress hydrique majeur comme c'est le cas de l'année 1992, connaissant la date des semis. Les fonctions utilisées sont celles du tableau 9 (chapitre 4.1.3): une fonction logistique a été retenue pour la croissance en hauteur (figure 30a), une loi de Gauss pour le LAI (figure 31a)

et le degré de recouvrement (figure 31b). Ces fonctions sont valables pour des densités de plantation de l'ordre de 5000 à 7000 poquets/ha, habituellement rencontrées sur les champs de mil paysans.

5.1.6 LA METHODE DE CALCUL UTILISEE

Le modèle utilise l'énergie disponible au dessus du couvert, les données pluviométriques, les mesures de température de l'air et de pression de vapeur d'eau au dessus du couvert, le calcul des différentes résistances au transfert des flux, ainsi que les fonctions biologiques, pour calculer l'évapotranspiration totale de la culture, la transpiration de la plante, l'évaporation du sol et les températures de surface des feuilles de mil et du sol (figure 60).

La méthode de calcul utilisée consiste à calculer la température de l'air à l'intérieur du couvert (T_o) en faisant converger sa valeur vers la valeur de T_r (figure 60). Connaissant T_o , nous calculons ensuite Δ selon l'équation 25 et le déficit de saturation de l'air au niveau de référence selon l'équation: $D = e_w(T_r) - e_r$, où T_r et e_r sont respectivement la température et la pression de vapeur d'eau de l'air au niveau de référence. Le flux global d'évaporation (LE) est ensuite calculé suivant l'équation 15. La valeur de LE permet d'obtenir D_o suivant l'équation 27. Connaissant D_o , Δ , A , A_s et les valeurs des différentes résistances au transfert des flux, les équations 28 et 29 permettent de calculer respectivement l'évaporation du sol (LE_s) et la transpiration de la plante (LE_c). Les flux de chaleur sensible provenant du sol (H_s) et de la végétation (H_c) sont obtenus respectivement selon les équations du bilan d'énergie à la surface du sol (équation 43) et au dessus du couvert (équation 42). Le flux global de chaleur sensible (H) est quant à lui calculé suivant l'équation de conservation de la chaleur ($H = H_s + H_c$). Enfin, La température des feuilles est obtenue à partir de l'équation 51 et celle de la surface du sol selon l'équation 48.

Les résistances de surface du couvert, d'origine stomatique ($r_{s,c}$), de couche limite ($r_{c,c}$), de la surface du sol ($r_{s,s}$) et les résistances aérodynamiques à l'intérieur ($r_{i,c}$) et au dessus ($r_{a,c}$) du couvert, sont calculées respectivement selon les équations 54, 55, 60, 62 et 66.

L'énergie disponible au dessus du couvert (A), à la surface du sol (A_s) et absorbée par la végétation ($R_{n,c}$), sont calculées respectivement suivant les équations 42, 43 et 44 par l'intermédiaire de l'équation 45.

La demande climatique au dessus du couvert (ETP) est calculée suivant la formulation de Penman (1948).

Figure 60: Organigramme du modèle

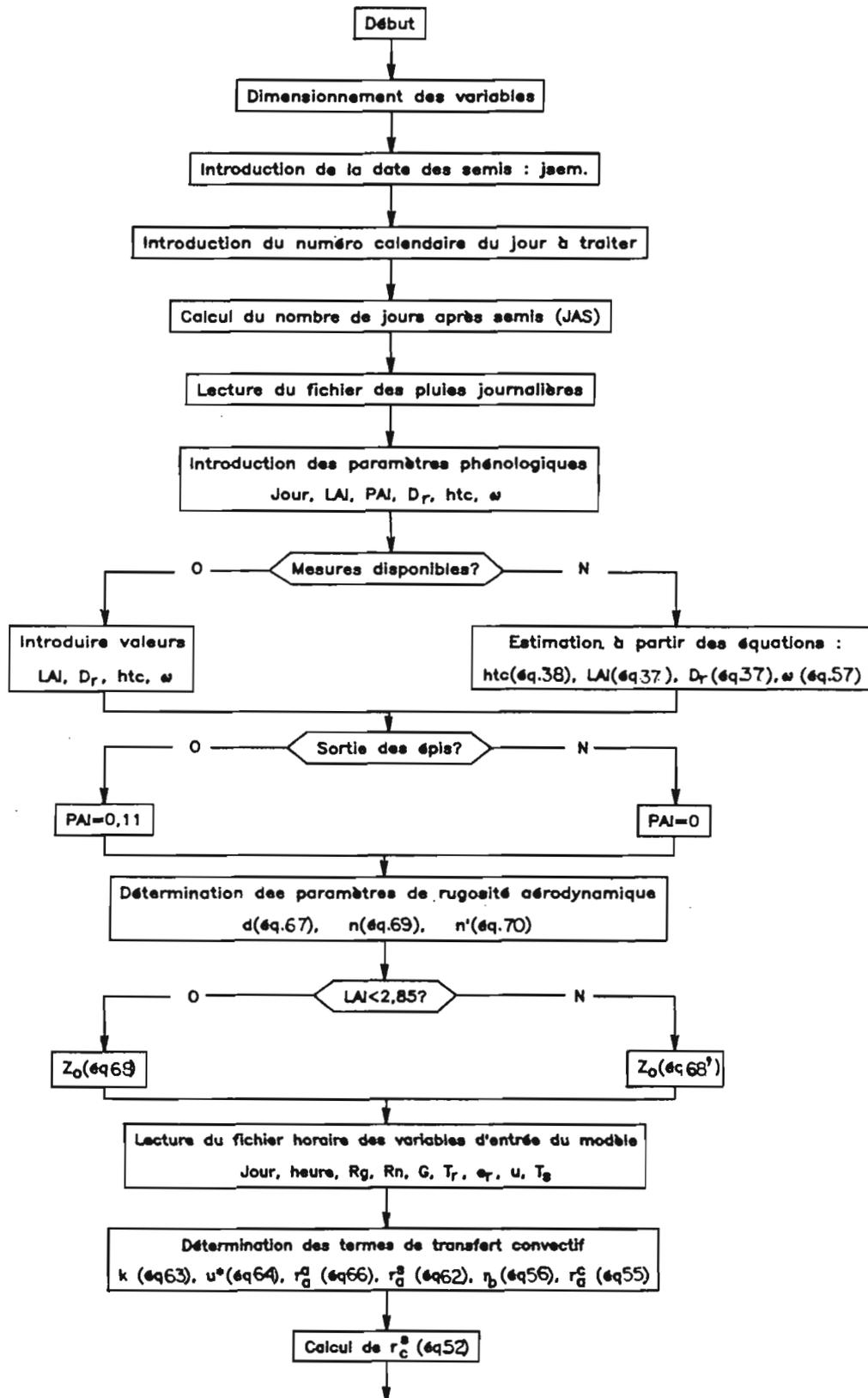
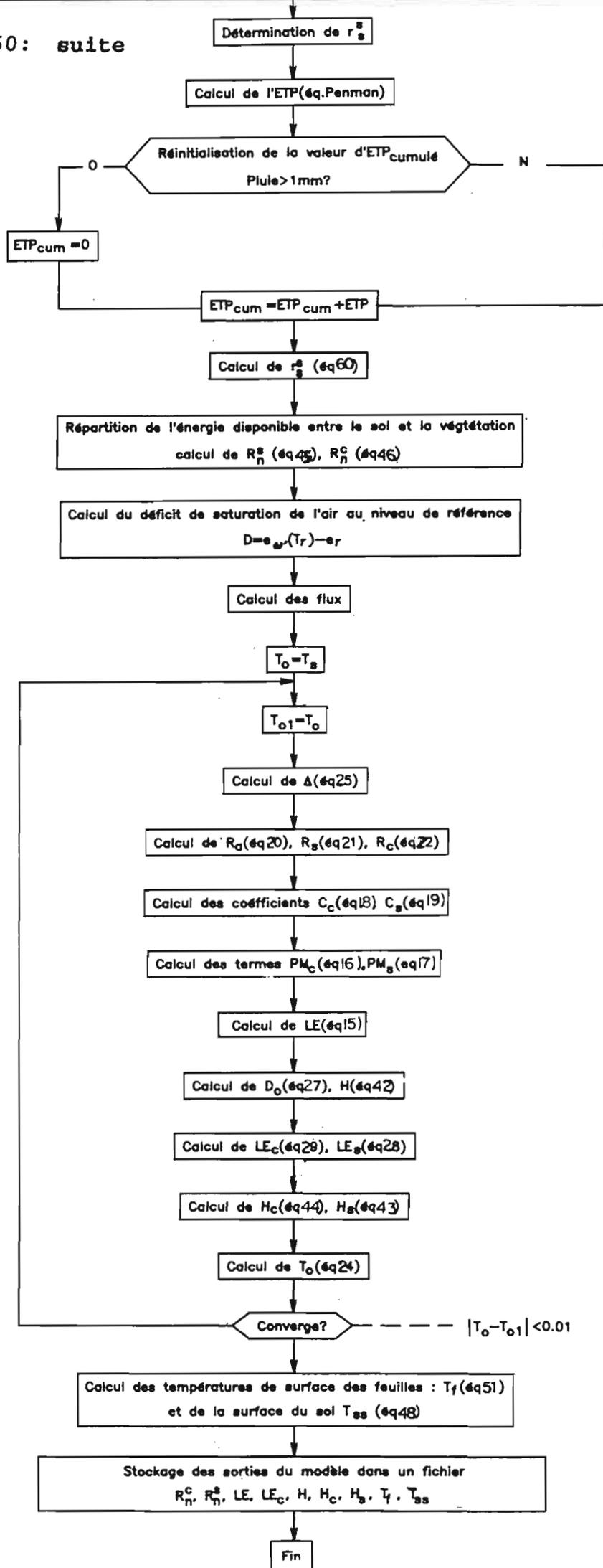


Figure 60: suite



5.2 ANALYSE ET VALIDATION

5.2.1 ETUDE DE LA SENSIBILITE DU MODELE

La sensibilité du modèle à la variation, du coefficient d'extinction du rayonnement net à l'intérieur du couvert (K_n), des coefficients d'atténuation de la diffusivité turbulente (n) et de la vitesse du vent (n') à l'intérieur du couvert, de la résistance stomatique moyenne du couvert (r^c) et de surface du sol (r^s), a été testée en considérant les variations de l'évapotranspiration totale du couvert (LE), de la transpiration de la plante (LE_c) et de l'évaporation du sol (LE_s), pour différentes valeurs de LAI du mil. Dans chaque cas, le modèle a été testé en utilisant les données expérimentales, et en faisant varier un seul paramètre à la fois. Cette variation consiste à diviser par 2 ou à multiplier par 2 les valeurs des paramètres K_n , n , n' , r^c , et r^s , retenus dans le modèle. Le test a porté séparément sur des journées humides (première journée qui suit une averse: tableau 22) et sur des journées sèches (plus de 3 jours après une averse: tableau 23). Les données de ces 2 tableaux sont les valeurs de LE , LE_c et LE_s , cumulées entre 7^h00 et 18^h00 T.U, accompagnées de leurs pourcentages de variation respectifs selon que l'on divise par 2 ou que l'on multiplie par 2 les valeurs des paramètres, K_n , n , n' , r^c , et r^s , du modèle.

- Sensibilité du modèle pendant les journées humides

Comme l'ont montré Shuttleworth et Wallace (1985), le flux d'évapotranspiration totale n'est évidemment pas sensible à la variation de K_n qui est un coefficient contrôlant la répartition de l'énergie entre le sol et la végétation. La variation de LE selon que l'on divise ou que l'on multiplie K_n par 2 ne dépasse guère 3% quelle que soit la valeur du LAI considéré (tableau 22), celle de LE_c ou de LE_s est par contre très importante dès les plus faibles valeurs de LAI. Ceci ressort clairement l'importance du choix de ce coefficient pour la séparation de l'évapotranspiration totale en ses 2 composantes: l'évaporation du sol et la transpiration de

la plante. Par ailleurs, le coefficient K_n généralement considéré comme constant pour un stade de développement donné d'un couvert, ne l'est pas forcément sur tout un cycle cultural. La constance de ce coefficient à l'échelle saisonnière n'a pas été encore prouvée (Lafleur et Rouse, 1990).

Le modèle n'est également pas sensible à la variation des coefficients n et n' , à l'exception d'une légère variation de l'évaporation du sol pour les plus fortes valeurs de LAI. La multiplication par 2 de la valeur de n , entraîne une réduction de l'évaporation du sol d'environ 7 à 20 % de sa valeur pour les fortes valeurs de LAI, cette réduction se traduit par une légère diminution de l'évapotranspiration totale (environ 3 % de sa valeur). Inversement la réduction de n de la moitié de sa valeur entraîne une augmentation d'environ 7 % de l'évaporation du sol qui se répercute par une faible diminution de l'évapotranspiration totale (3 %). Cet effet de la variation de n sur LE_c , est perceptible seulement dans la zone des LAI maxima, où n , atteint sa valeur maximale donnant ainsi les plus fortes valeurs de r_s , (n étant proportionnel au LAI). Quant au coefficient n' qui intervient dans l'expression de la résistance de couche limite des feuilles (r_b), Shuttleworth et Wallace (1985) avaient montré que le modèle n'est pas sensible à la variation de r_b . Globalement, on peut retenir que le modèle n'est pas sensible à la variation des coefficients n et n' pendant les journées humides.

En ce qui concerne la résistance stomatique moyenne du couvert, les effets de sa réduction ou de son augmentation sur les flux, sont croissants avec le LAI. On observe une augmentation des valeurs de la transpiration de 14 à 24 % pour les forts LAI, lorsque l'on diminue de moitié la valeur initiale de cette résistance. Cet accroissement des valeurs de LE_c se traduit par une augmentation de 7 à 13 % respectivement des valeurs de l'évapotranspiration totale. Ceci s'explique aisément par le rôle dominant de la transpiration lorsque le LAI s'accroît.

La résistance de la surface du sol par contre, présente un effet sur LE plus significatif en début de cycle, à cause de la domination du flux d'évaporation du sol pendant cette période. Ce

dernier flux demeure sensible à la variation de r^s , sur tout le cycle.

Par les contrôles respectifs qu'elles effectuent sur la transpiration et sur l'évaporation du sol, la résistance stomatique moyenne du couvert et celle de la surface du sol, représentent les principaux freins au flux d'évapotranspiration totale.

- Sensibilité du modèle pendant les journées sèches

Contrairement aux journées humides, le modèle demeure sensible à la variation du coefficient d'atténuation de la vitesse du vent (n') pendant les journées sèches (tableau 23). Cette sensibilité du modèle à n' , traduit en fait l'effet de la résistance de couche limite des feuilles (r_b) sur la transpiration, effet d'autant plus perceptible que l'air est sec, c'est à dire, que le déficit de saturation de l'air à l'intérieur du couvert (D_0) est grand (équation 29). L'insensibilité du modèle à la variation de r_b qu'évoquaient Shuttleworth et Wallace (1985), ne se vérifie en fait qu'en condition humide. En ce qui concerne les autres paramètres, r^c , et r^s , présentent une influence sur la valeur des flux plus importante que celle observée pendant les journées humides, les variations de n sont par contre sans effet sur tous les flux.

Tableau 22 et 23: Sensibilité du modèle à la variation du coefficient d'extinction du rayonnement net à l'intérieur du couvert (k_n), des coefficients d'atténuation de la vitesse du vent (n') et de la diffusivité turbulente (n) à l'intérieur du couvert, de la résistance stomatique moyenne du couvert (r_{sc}), et de la résistance de la couche sèche du sol (r_{ss}). Les données des 2 tableaux sont les valeurs du flux d'évapotranspiration totale (LE), de la transpiration (LEc), et de l'évaporation du sol (LEs), cumulées entre 7^h00 et 18^h00 T.U, accompagnées de leurs pourcentages de variation respectifs, selon que l'on divise par 2 ou que l'on multiplie par 2 les valeurs des paramètres k_n , n , n' , r_{sc} et r_{ss} , retenus dans le modèle. Ce calcul a été réalisé pour plusieurs valeurs différentes de LAI et de degré de recouvrement du sol par la végétation (D_r). Les valeurs du rayonnement net au dessus du couvert cumulé entre 7^h00 et 18^h00 (R_n) pour les journées de calcul utilisées, sont également mentionnées.

Tableau 22: sensibilité du modèle pendant les journées humides

LAI (m ² feuilles/m ² sol)		0,0	0,6	1,0	1,9	2,3	2,8
Dr (%)		0	12	19	34	41	55
Rn (M.J/m ² /j)		12,9	12,8	14,6	10,8	14,1	12,9
LE (mm/j)	Kn x 0,5	0 %	-3 %	-2 %	-3 %	0 %	0 %
	Kn modèle	3,4	3,7	4,2	3,4	4,3	3,9
	Kn x 2	0 %	+3 %	+2 %	+3 %	+2 %	+3 %
	n x 0,5	0 %	0 %	0 %	+3 %	+2 %	+3 %
	n modèle	3,4	3,7	4,2	3,4	4,3	3,9
	n x 2	0 %	-3 %	0 %	-3 %	-2 %	-3 %
	n' x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	n' modèle	3,4	3,7	4,2	3,4	4,3	3,9
	n' x 2	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	rsc x 0,5	0 %	0 %	+3 %	+9 %	+7 %	+13 %
	rsc modèle	3,4	3,7	4,2	3,4	4,3	3,9
	rsc x 2	0 %	-3 %	-3 %	-9 %	-7 %	-13 %
	rss x 0,5	+15 %	+11 %	+7 %	+12 %	+5 %	+8 %
	rss modèle	3,4	3,7	4,2	3,4	4,3	3,9
	rss x 2	-18 %	-16 %	-10 %	-12 %	-5 %	-5 %

LEc (mm/j)	Kn x 0,5	0 %	-44 %	-35 %	-26 %	-24 %	-17 %
	Kn modèle	0,0	0,9	1,7	1,9	2,9	2,9
	Kn x 2	0 %	+67 %	+53 %	+26 %	+28 %	+21 %
	n x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	n modèle	0,0	0,9	1,7	1,9	2,9	2,9
	n x 2	0 %	0 %	0 %	0 %	+3 %	+3 %
	n' x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	n' modèle	0,0	0,9	1,7	1,9	2,9	2,9
	n' x 2	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Tableau 22, suite

LEc, suite	rsc x 0,5	0 %	+11 %	+6 %	+21 %	+14 %	+24 %
	rsc modèle	0,0	0,9	1,7	1,9	2,9	2,9
	rsc x 2	0 %	-11 %	-12 %	-26 %	-17 %	-21 %
	rsc x 0,5	0 %	0 %	-6 %	-5 %	-3 %	0 %
	rsc modèle	0,0	0,9	1,7	1,9	2,9	2,9
	rsc x 2	0 %	0 %	+6 %	+5 %	+3 %	+7 %

LEs (mm/j)	Kn x 0,5	0 %	+7 %	+20 %	+27 %	+50 %	+50 %
	Kn modèle	3,4	2,8	2,5	1,5	1,4	1,0
	Kn x 2	0 %	-18 %	-32 %	-27 %	-50 %	-50 %
	n x 0,5	0 %	0 %	0 %	+7 %	+7 %	0 %
	n modèle	3,4	2,8	2,5	1,5	1,4	1,0
	n x 2	0 %	-4 %	0 %	-7 %	-14 %	-20 %
	n' x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	n' modèle	3,4	2,8	2,5	1,5	1,4	1,0
	n' x 2	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	rsc x 0,5	0 %	-4 %	-4 %	-7 %	-7 %	-10 %
	rsc modèle	3,4	2,8	2,5	1,5	1,4	1,0
	rsc x 2	0 %	0 %	+4 %	+7 %	+7 %	+10 %
rsc x 0,5	+15 %	+14 %	+16 %	+33 %	+21 %	+30 %	
rsc modèle	3,4	2,8	2,5	1,5	1,4	1,0	
rsc x 2	-18 %	-25 %	-20 %	-33 %	-40 %	-40 %	

Tableau 23: Sensibilité du modèle pendant les journées sèches

LAI (m2 feuilles/m2 sol)	0,0	0,8	2,3	2,8	
Dr (%)	0	15	41	55	
Rn (M.J/m2/j)	9,0	11,5	8,7	11,7	
LE (mm/j)	Kn x 0,5	0 %	-9 %	-8 %	-11 %
	Kn modèle	1,1	2,2	2,6	3,6
	Kn x 2	0 %	+18 %	+8 %	+8 %
	n x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %
	n modèle	1,1	2,2	2,6	3,6
	n x 2	0 %	+4 %	0 %	0 %
	n' x 0,5	0 %	-4 %	-8 %	-11 %
	n' modèle	1,1	2,2	2,6	3,6
	n' x 2	0 %	+4 %	+8 %	+8 %
	rsc x 0,5	0 %	+5 %	+20 %	+22 %
	rsc modèle	1,1	2,2	2,6	3,6
	rsc x 2	0 %	-5 %	-23 %	-25 %
rsc x 0,5	+54 %	+23 %	+4 %	+3 %	
rsc modèle	1,1	2,2	2,6	3,6	
rsc x 2	-36 %	-18 %	0 %	-3 %	

Tableau 23, suite

LEc (mm/j)	Kn x 0,5	0 %	-33 %	-12 %	-14 %
	Kn modèle	0,0	1,2	2,5	3,5
	Kn x 2	0 %	+50 %	+8 %	+9 %
	n x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %
	n modèle	0,0	1,2	2,5	3,5
LEs (mm/j)	n x 2	0 %	0 %	0 %	0 %
	n' x 0,5	0 %	-8 %	-10 %	-13 %
	n' modèle	0,0	1,2	2,5	3,5
	n' x 2	0 %	+8 %	+8 %	+9 %
	rsc x 0,5	0 %	+8 %	+24 %	+22 %
LEs (mm/j)	rsc modèle	0,0	1,2	2,5	3,5
	rsc x 2	0 %	-17 %	-28 %	-29 %
	rss x 0,5	0 %	-8 %	0 %	-3 %
	rss modèle	0,0	1,2	2,5	3,5
	rss x 2	0 %	0 %	0 %	0 %

LEs (mm/j)	Kn x 0,5	0 %	+20 %	0 %	0 %
	Kn modèle	1,1	1,0	0,1	0,1
	Kn x 2	0 %	-20 %	0 %	0 %
	n x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %
	n modèle	1,1	1,0	0,1	0,1
LEs (mm/j)	n x 2	0 %	+10 %	0 %	0 %
	n' x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %
	n' modèle	1,1	1,0	0,1	0,1
	n' x 2	0 %	0 %	0 %	0 %
	rsc x 0,5	0 %	0 %	0 %	0 %
LEs (mm/j)	rsc modèle	1,1	1,0	0,1	0,1
	rsc x 2	0 %	+10 %	0 %	0 %
	rss x 0,5	+54 %	+60 %	0 %	0 %
	rss modèle	1,1	1,0	0,1	0,1
	rss x 2	-36 %	-40 %	0 %	0 %

5.2.2 EVOLUTION TEMPORELLE DES DIFFERENTES RESISTANCES AU TRANSFERT DES FLUX.

5.2.2.1 VARIATIONS DIURNES

Des exemples de variation diurne des résistances r^c , r_a^c , r_a^s , $r_{a,s}'$, et $r_{a,s}'$, sont représentés sur les figures 61 et 63 pour les journées humides (première journée après une averse) et sur les figures 62 et 64 pour les journées sèches (plus de 3 jours après une averse) en milieu de cycle (LAI = 2,7). Les valeurs de r^c , dont l'évolution diurne est gouvernée par le rayonnement global, varient peu en milieu de journée et sont de l'ordre de 100 à 150 s.m⁻¹ tant qu'il n'y a pas de manque d'eau persistant au niveau du système racinaire (Figures 61 et 62). L'évolution diurne des résistances r_a^c , r_a^s et $r_{a,s}'$ est gouvernée par la vitesse du vent au niveau de référence et se fait en raison inverse de celle-ci. Les valeurs de r_a^c , varient entre 30 et 40 s.m⁻¹, celles de r_a^s entre 35 et 60 s.m⁻¹, et celles de $r_{a,s}'$ autour de 10 s.m⁻¹, dans les 2 conditions d'humidité de la surface du sol. En ce qui concerne la résistance de la surface du sol ($r_{a,s}'$), sa variation diurne est donnée par une fonction exponentielle de la demande climatique cumulée depuis la dernière pluie (figure 63 et 64). Sa valeur dépend de l'humidité de la surface du sol et donc de la pluviométrie. Pour un sol nu, le lendemain d'une pluie au matin, $r_{a,s}'$ est de l'ordre de 80 s.m⁻¹. Cette valeur initiale atteint environ 160 s.m⁻¹ pour un pourcentage de recouvrement du sol de l'ordre de 50 %.

5.2.2.2 VARIATIONS AU COURS DU CYCLE CULTURAL.

Le calcul de la moyenne journalière des différentes résistances a porté sur les valeurs horaires comprises entre 10^h00 à 16^h00 T.U, correspondant à la zone de faible variation de la plupart des résistances.

Figure 61:

Exemples d'évolution diurne des résistances aérodynamiques et de surface du couvert pendant une journée humide.

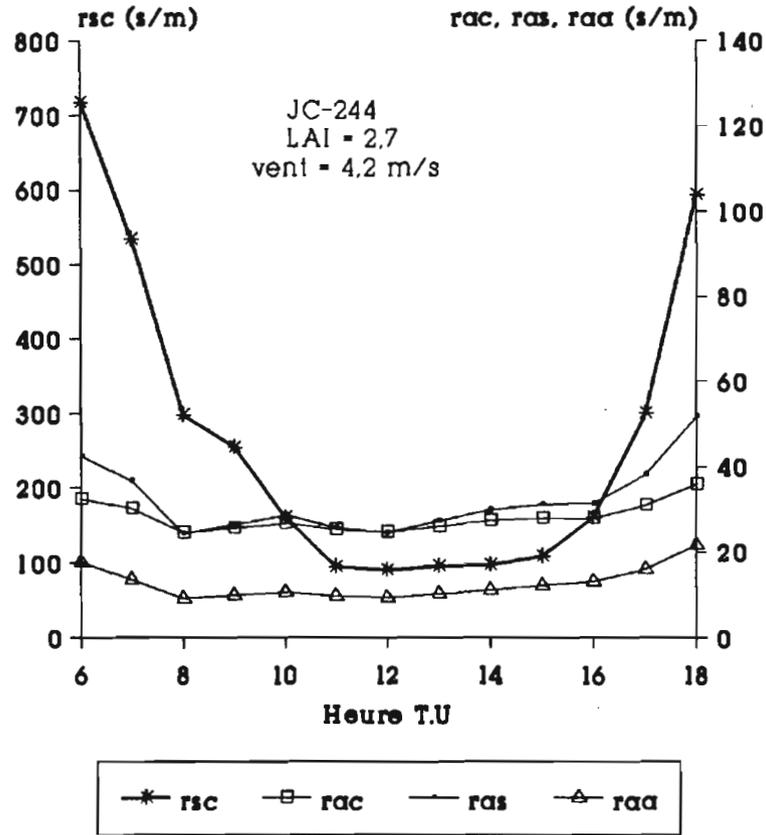


Figure 62:

Exemples d'évolution diurne des résistances aérodynamiques et de surface du couvert pendant une journée sèche.

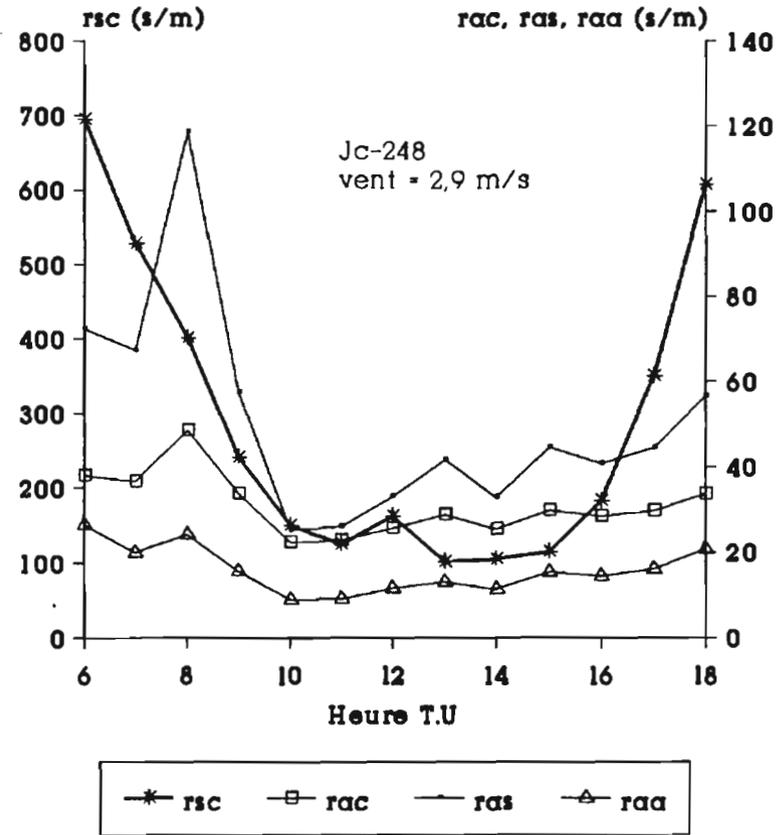


Figure 63: Exemple d'évolution diurne de la résistance de la surface du sol pendant une journée humide.

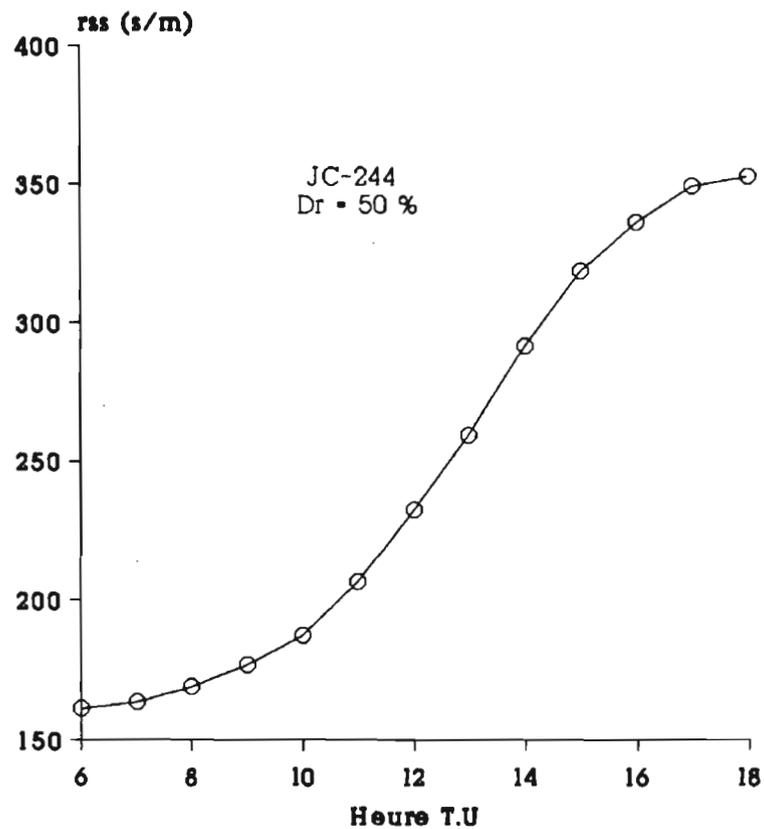


Figure 64: Exemple d'évolution diurne de la résistance de la surface du sol pendant une journée sèche.

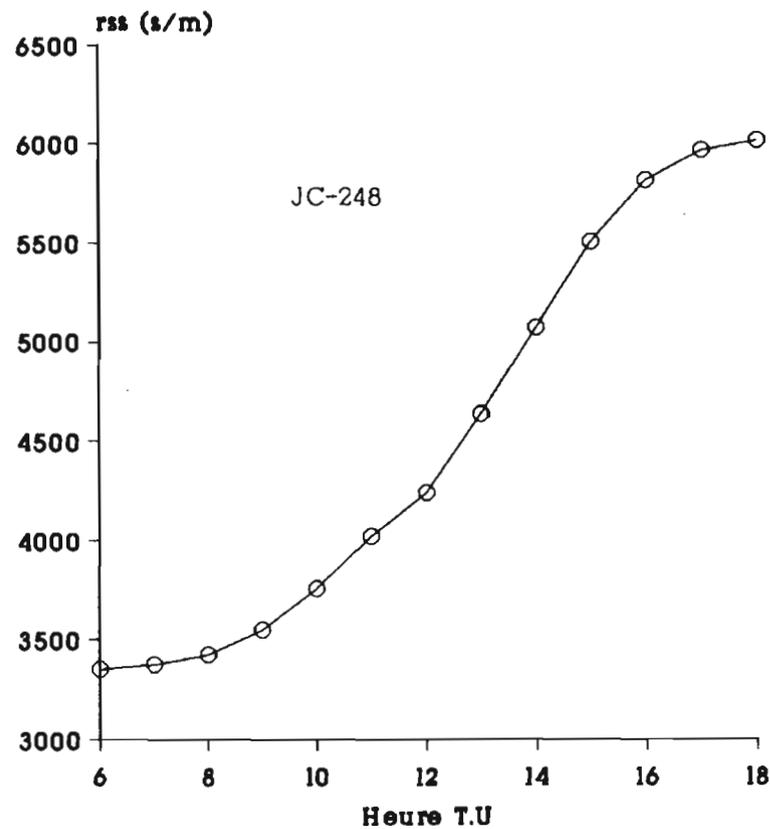


Figure 65:
 Evolution au cours du cycle cultural des résistances de surface du couvert: stomatique (r_{sc}) et de couche limite (r_{ac})

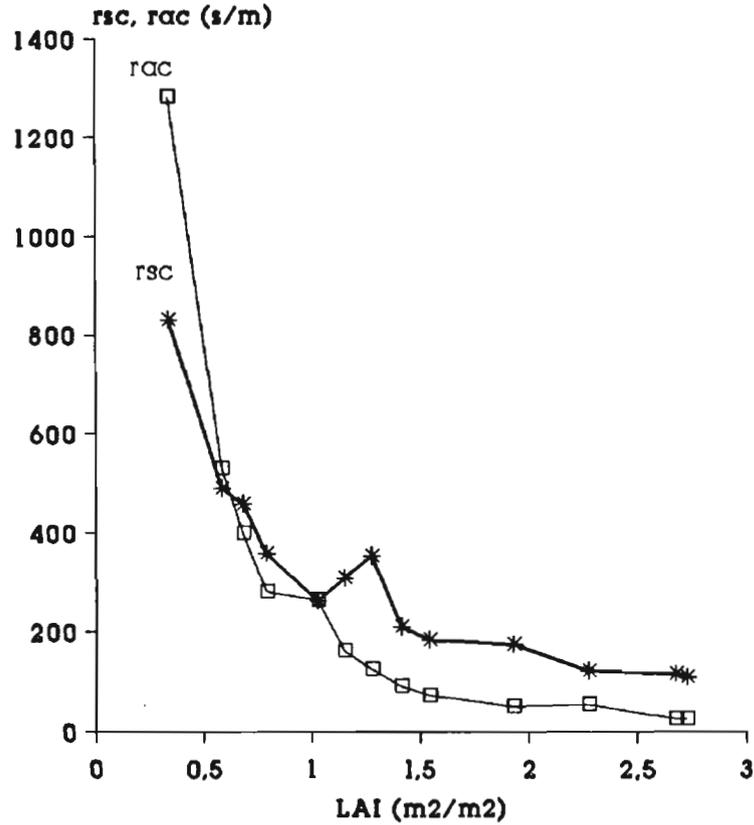
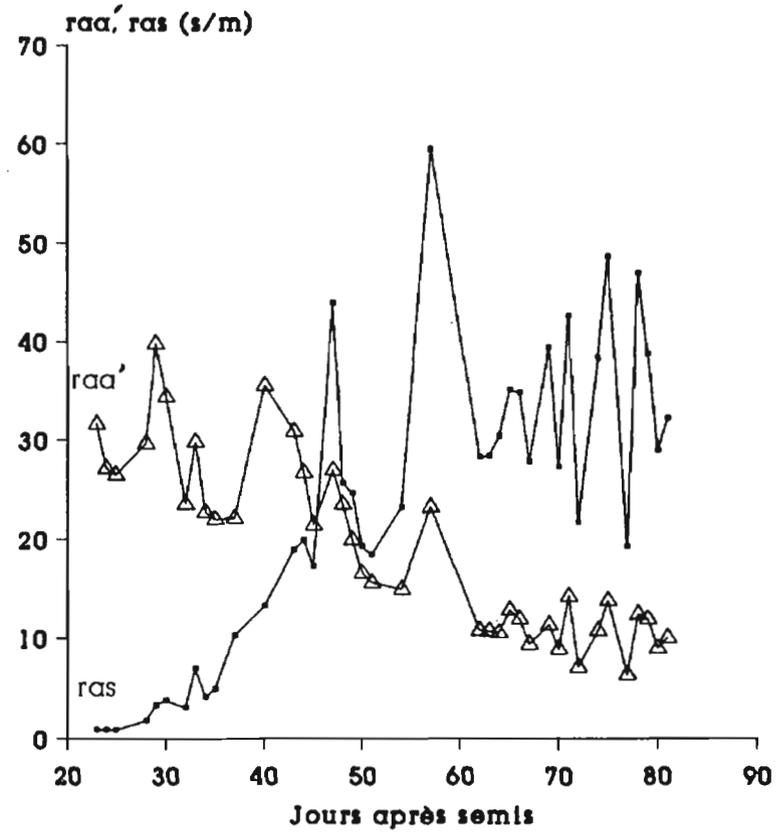


Figure 66:
 Evolution au cours du cycle cultural des résistances aérodynamiques au dessus (r_{aa}) et à l'intérieur du couvert (r_{as})



- Variation de r^c_s et r^c_a en fonction de l'indice foliaire

Comme il a été suggéré par Shuttleworth et Wallace (1985) et vérifié expérimentalement par plusieurs auteurs (Monteith 1965, Katerji et Perrier 1985), les valeurs de la résistance stomatique moyenne du couvert (r^c_s), évoluent au cours du cycle cultural en raison inverse de l'indice foliaire (figure 65). Il en est de même pour les valeurs de r^c_a . Les valeurs de ces 2 résistances, très élevées pour des faibles LAI ($r^c_s \approx 900 \text{ s.m}^{-1}$ et $r^c_a \approx 1300 \text{ s.m}^{-1}$ pour un LAI $\approx 0,3$), se stabilisent autour de 130 s.m^{-1} pour r^c_s et 35 s.m^{-1} pour r^c_a , en milieu de cycle.

- Variation de r^a_s et r^a_a au cours du cycle

r^a_s , qui a une valeur presque nulle en début de cycle (LAI = 0), culmine autour de 40 s.m^{-1} en milieu de cycle (LAI=1,5), avant de se stabiliser autour de cette valeur sur toute la seconde moitié de ce cycle (figure 66). Comme l'ont montré Katerji et Perrier (1985) sur la luzerne, cette résistance évolue de façon proportionnelle au LAI, au cours du cycle cultural du mil.

r^a_a , est par contre inversement proportionnelle au LAI. Sa valeur en début de cycle fluctue autour de 30 s.m^{-1} pour un LAI nul, et se stabilise autour de 10 s.m^{-1} en milieu de cycle.

- Variation de r^s_a au cours du cycle.

L'évolution de r^s_a au cours du cycle dépend non seulement de l'humidité du sol, mais aussi de la proportion de sol nu qui fournit l'essentiel du flux d'évaporation provenant du sol. Sa valeur croît au fur et à mesure que la proportion de sol nu se réduit (figure 67), et tend vers l'infini lorsque le sol devient de plus en plus sec. A titre de comparaison, Ham et Heilman (1991) ont trouvé des valeurs de r^s_a variant entre 278 et 1592 s.m^{-1} sur une culture de coton. Nichols (1992) utilisant le modèle de Shuttleworth et al. (1985) sur un couvert d'arbustes phreatophytes

Figure 67: Evolution de la résistance de la surface du sol selon les épisodes pluvioux.

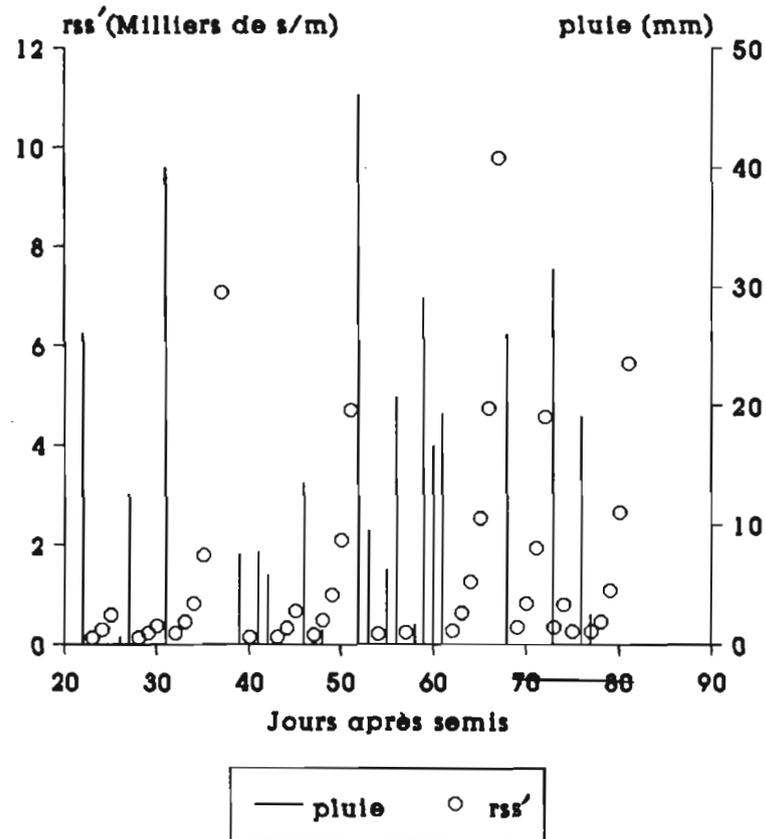
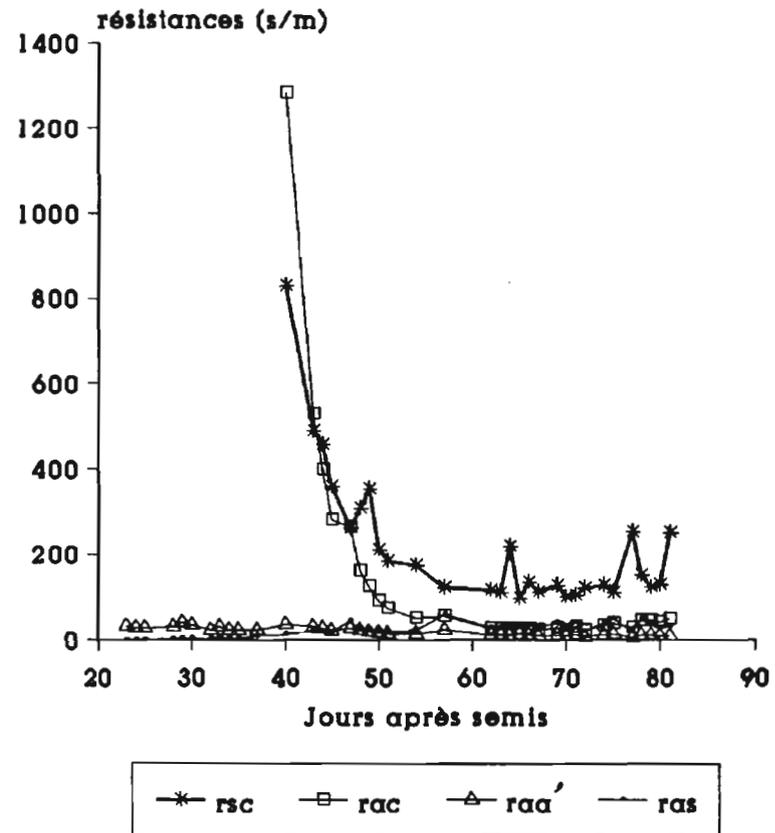


Figure 68: Comparaison des résistances rsc , rac , raa' et ras au cours du cycle du mil.



a trouvé des valeurs allant de 0 à 30.000 s.m^{-1} et même plus. Berbigier (1972), cité par Katerji et Perrier (1985), a mesuré des valeurs de r^s , variant entre 0 et 325 s.m^{-1} sur un sol nu.

- **Importance relative des différentes résistances.**

En début de cycle, pour des valeurs de $\text{LAI} < 0,5$, r^s , représente le principal frein à l'évapotranspiration totale, composée en majeure partie d'évaporation du sol, r^s étant presque nulle, r^a , insignifiante devant les valeurs infinies de r^c , et r^c (figure 68). Durant la période de LAI intermédiaire ($0,5 < \text{LAI} < 1,5$), 3 résistances interagissent de façon importante sur l'évapotranspiration totale: r^c , et r^c , sur la transpiration, r^s , sur l'évaporation du sol; r^s , et r^a , étant une fois de plus faibles devant ces 3 résistances. Au delà de la période de LAI intermédiaire, la transpiration devenant dominante dans la composition du flux d'évapotranspiration, r^c , (r^c , variant entre 100 et 150 s.m^{-1}), prend le relais de r^s , en tant que frein principal au flux d'évapotranspiration totale, mais r^c , r^a , et r^s , qui prennent des valeurs variant entre 10 et 60 s.m^{-1} , ne sont pas négligeables dans ce cas. En cas d'une longue période sèche, r^s , prend une valeur infinie correspondant à une évaporation nulle du sol. Dans ce dernier cas (sol sec), l'équation de Penman sous-estime la transpiration et la surestime lorsque le sol est humide sur une culture de mil (Wallace et al., 1990), d'où l'intérêt d'un modèle de couvert épars comme celui de Shuttleworth et Wallace (1985).

On peut retenir à la suite de cette comparaison:

- Le rôle dominant de la résistance stomatique du couvert (r^c ,) depuis la période de $\text{LAI} = 0,5$ jusqu'à la fin du cycle (r^c , $\approx 130 \text{ s.m}^{-1}$);
- L'importance relative de la résistance de la couche limite du couvert (r^c ,) dont la valeur ne peut pas être négligée, quelle que soit la période du cycle: (r^c , $\approx 35 \text{ s.m}^{-1}$ en milieu de cycle);
- r^a , et r^s , sont faibles devant r^c , et r^c , du début du cycle jusqu'aux environs du 50^{ème} jour après semis ($\text{LAI} \approx 1,5$). Au delà de cette période, les 2 résistances qui ont des ordres de grandeurs

respectives de 10 s.m^{-1} et 40 s.m^{-1} , reprennent leurs importances vis à vis de r^c , et r^a .

- Quant à r^s , sa valeur dominante pour les LAI nuls, dépend de l'humidité de la surface du sol.

5.2.3 VALIDATION

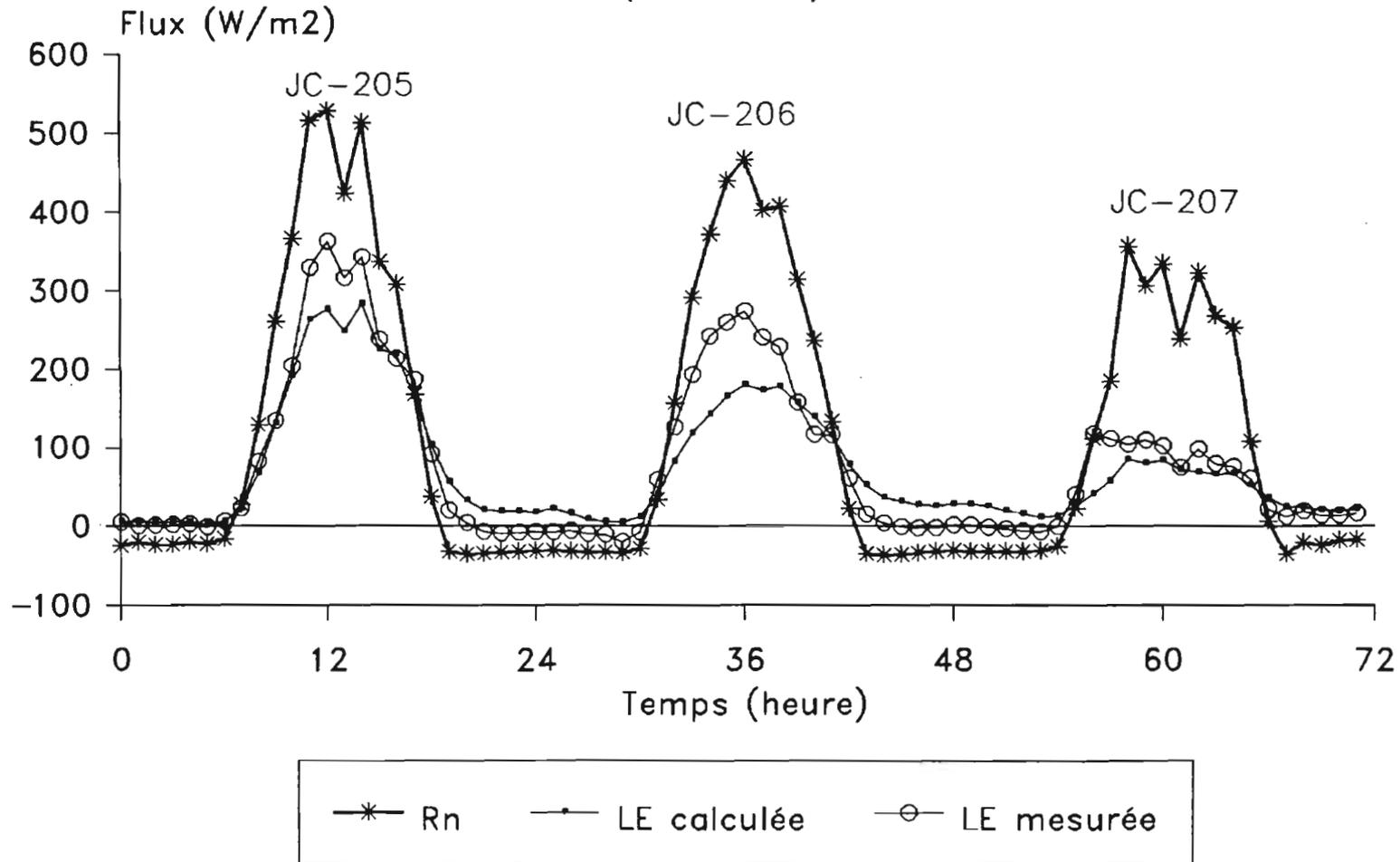
5.2.3.1 COMPARAISON DES VALEURS HORAIRES DES FLUX DE CHALEUR LATENTE (LE) CALCULEES A L'AIDE DU MODELE A CELLES MESUREES PAR LA METHODE DU BILAN D'ENERGIE/RAPPORT DE BOWEN EN 1992.

La comparaison des valeurs horaires de LE calculées et mesurées, est représentée sur les figures 69, 70, 71 et 72, pour 4 différentes périodes du cycle du mil. Pour chaque période, nous avons choisi à titre d'exemples plusieurs journées représentant une séquence de dessèchement après une pluie.

Pendant la première période (LAI=0,0), le modèle sous-estime légèrement les valeurs de LE en milieu de journée (jour calendaire 205 de la figure 69) et c'est seulement en début et en fin de journée qu'on observe une certaine concordance entre valeurs calculées et mesurées de LE. Cette observation concerne aussi bien les journées humides que les journées sèches (JC-206 et JC-207). Une régression linéaire établie à partir de l'ensemble des données horaires correspondant à la période de LAI nul (figure 73), ressort mieux encore cette bonne concordance pour les faibles valeurs de LE et la sous-estimation pour les valeurs supérieures. La sous-estimation peut s'expliquer par la fonction d'estimation de la résistance de la surface du sol, qui est une fonction moyenne, donc ne donnant pas nécessairement la vraie valeur de r_s pour les fortes valeurs de l'évaporation du sol. Pour les faibles valeurs de LE_s , r_s est relativement peu variable en début et fin de journée, et donc son influence sur LE_s est moindre. L'estimation de LE à l'aide du modèle est globalement satisfaisante pour cette période du cycle, elle pourra se faire avec une incertitude de $\pm 11 \text{ W.m}^{-2}$ (tableau 24), correspondant pratiquement à l'incertitude sur la mesure de LE par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen (Sinclair et al. 1975, Heilman et al. 1989, Dugas et al. 1991, Cellier et Olioso 1993).

La concordance entre valeurs mesurées et calculées de LE, est encore meilleure lorsque le couvert est développé, comme le montre la figure 70 pour les LAI compris entre 0,3 et 1,5 et la figure 71 pour les LAI compris entre 1,5 et 2,8. Les régressions linéaires

Figure 69: Comparaison entre LE mesurée et LE calculée à l'aide du modèle; Rn est le rayonnement net correspondant.
(LAI=0,0)



établies pour ces 2 périodes du cycle, sont relativement meilleures (figures 74, 75 et tableau 24).

L'estimation de LE à l'aide du modèle est relativement moins bonne au cours de la période de sénescence du mil (figure 72 et 76). En effet, on note une surestimation systématique des valeurs d'évapotranspiration provenant de la fonction d'estimation de la résistance stomatique qui ne prend pas en compte la baisse de l'activité transpiratoire des feuilles due au vieillissement. La comparaison des évolutions diurnes des valeurs calculées de LE à celles mesurées pour les journées 260, 261, 262 et 263 (Figure 72), montre une bonne concordance pour les faibles valeurs de LE (inférieures à 200 W.m^{-2} environ) et une surestimation pour les valeurs supérieures (figure 76). Le résultat d'ensemble est cependant bon, car la corrélation sur l'ensemble des journées de cette période (Figure 76) conduit à un coefficient r^2 de l'ordre de 0,76 ; l'intervalle de confiance à 95 % étant de $\pm 8 \text{ W.m}^{-2}$ (tableau 24).

Les résultats de ce tableau montrent également que le modèle surestime de façon systématique les valeurs de LE pour la période de LAI non nul, la moyenne des écarts ($LE_{est} - LE_{mes}$) demeurant toujours positive. Les meilleures corrélations sont obtenues pour la période de LAI compris entre 0,3 et 2,8 correspondant à l'essentiel du cycle du mil.

Figure 70: Comparaison entre LE mesurée et LE calculée à l'aide du modèle; Rn est le rayonnement net correspondant.
(LAI=1,2)

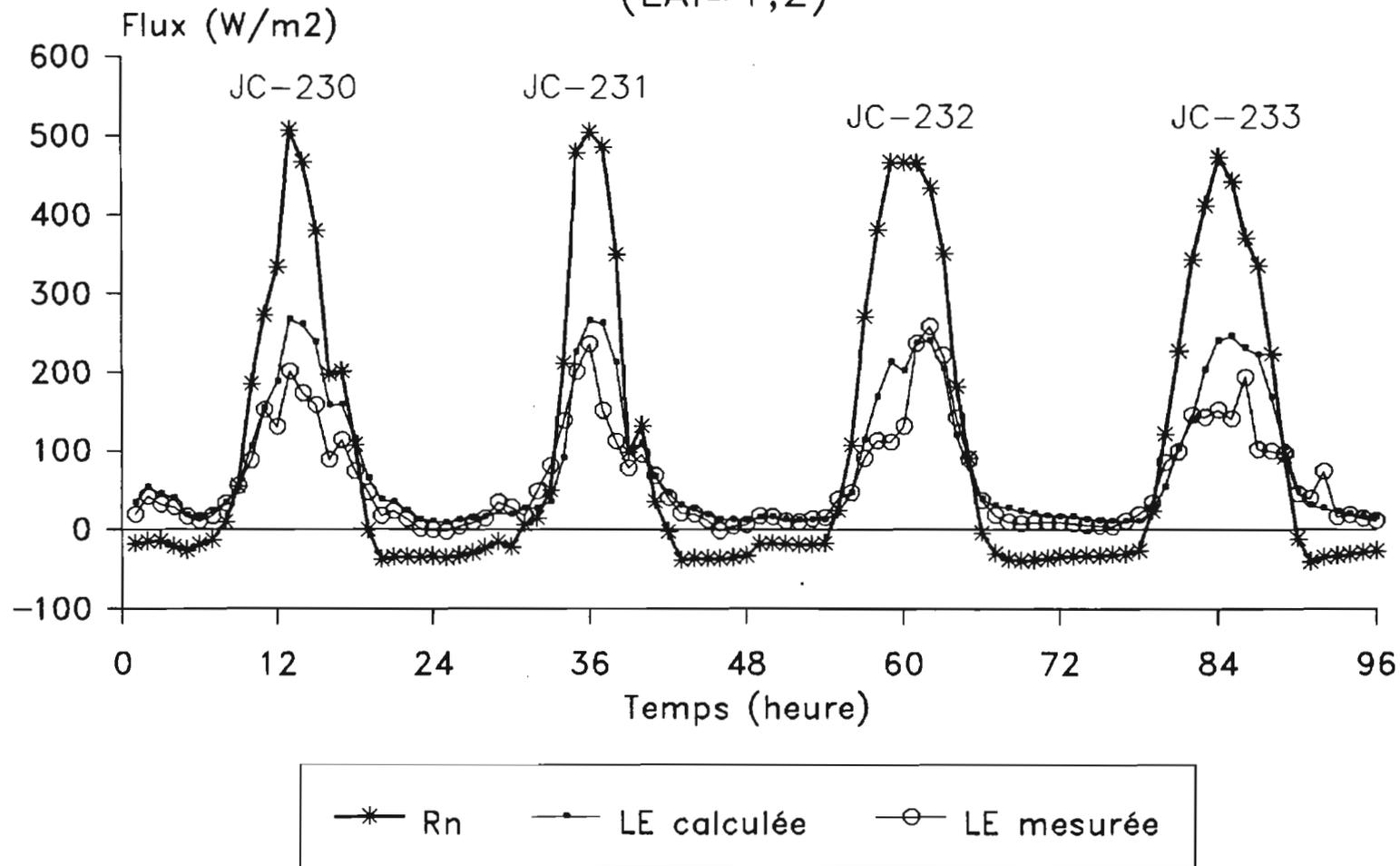


Figure 71: Comparaison entre LE mesurée et LE calculée à l'aide du modèle; Rn est le rayonnement net correspondant.

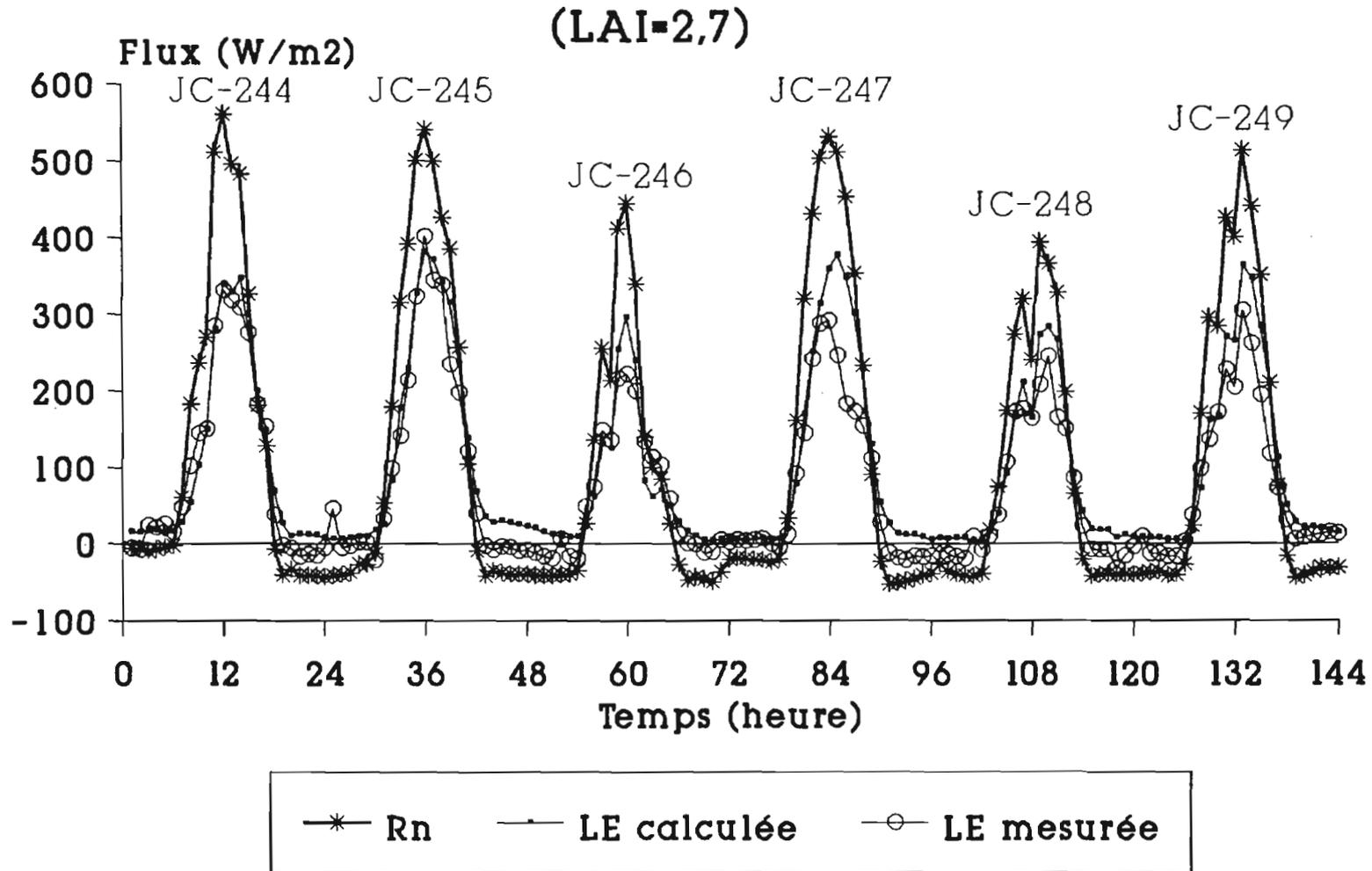


Figure 72: Comparaison entre LE mesurée et LE calculée à l'aide du modèle;
(période de sénescence foliaire du mil)

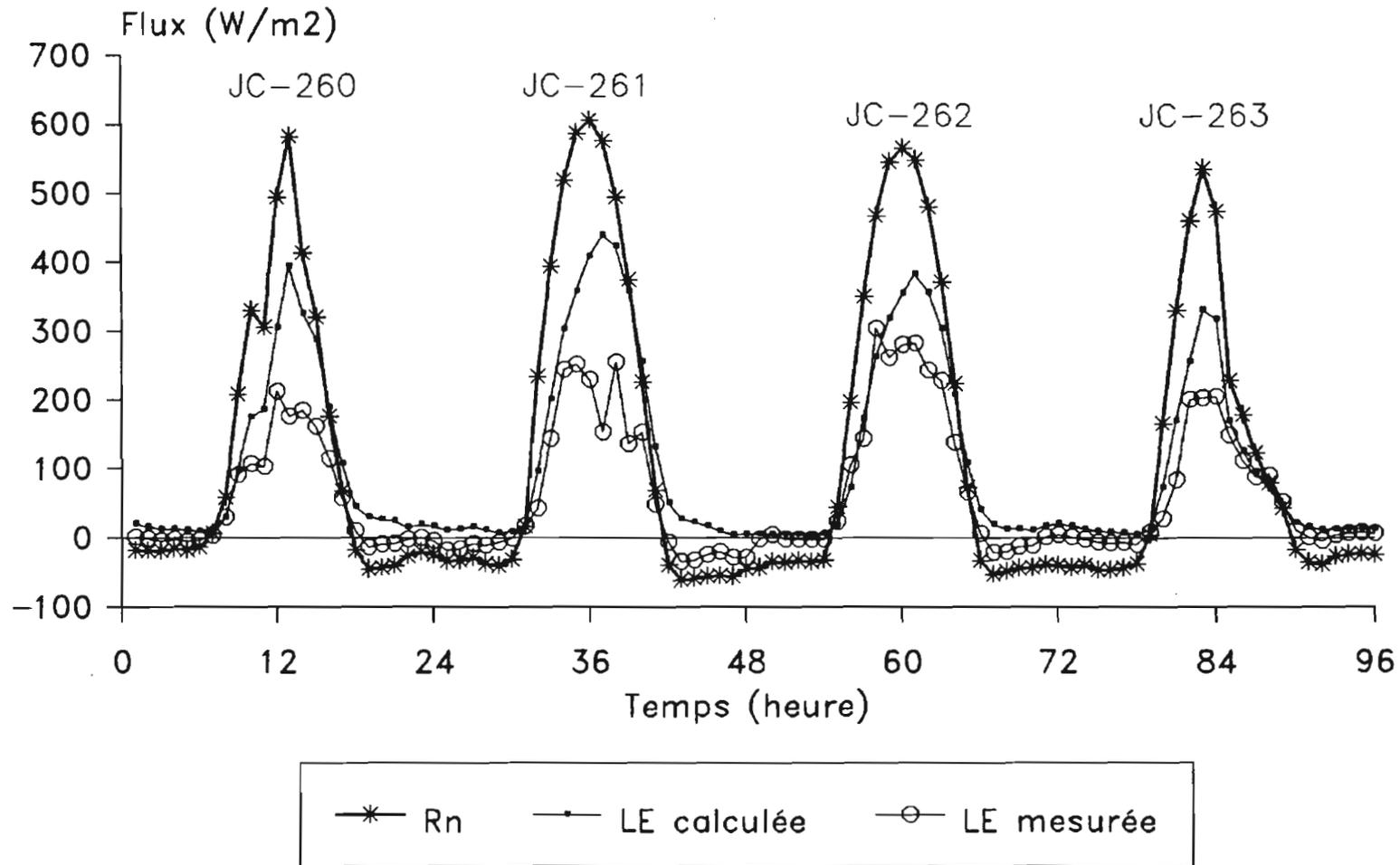


Figure 73: Comparaison des valeurs diurnes de LE mesurées à celles calculées par le modèle pour la période de LAI=0,0

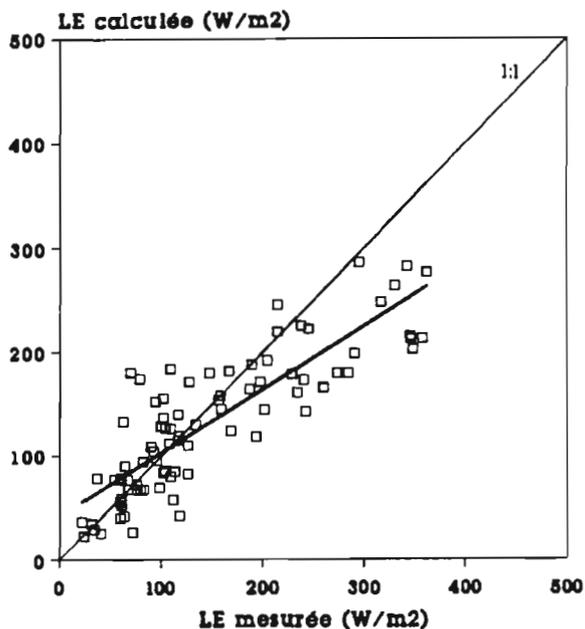


Figure 74: Comparaison des valeurs diurnes de LE mesurées à celles calculées par le modèle: $0,3 < LAI < 1,5$

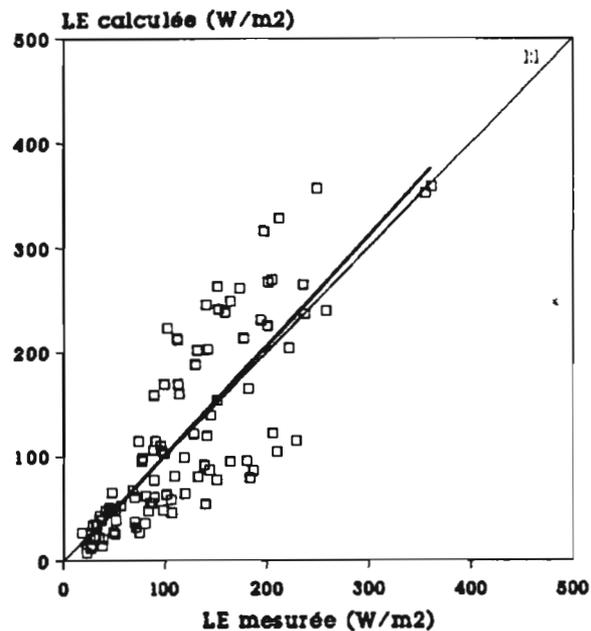


Figure 75: Comparaison des valeurs diurnes de LE mesurées à celles calculées par le modèle: $1,5 < LAI < 2,8$

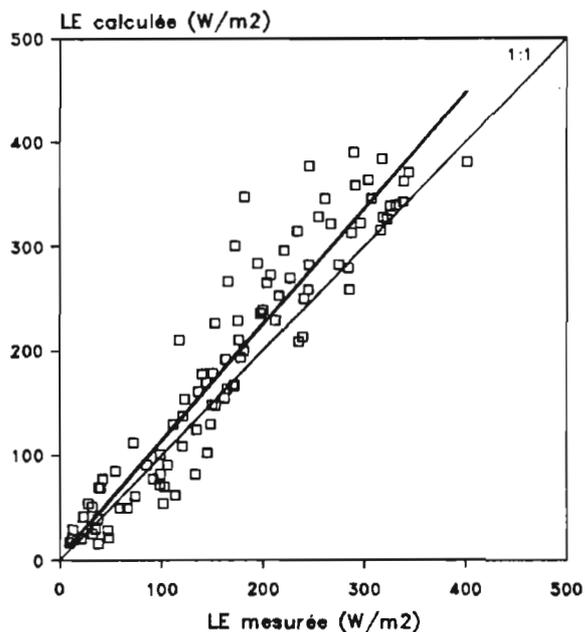


Figure 76: Comparaison des valeurs diurnes de LE mesurées à celles calculées par le modèle: période de sénescence

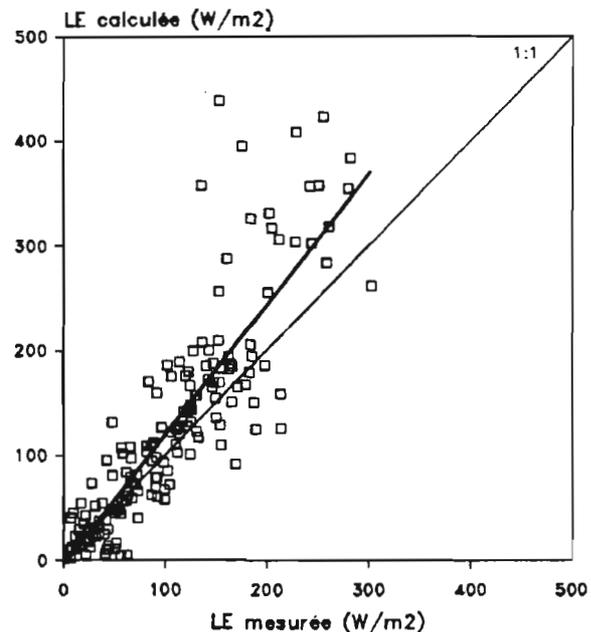


Tableau 24. Résultats d'analyses statistiques sur la comparaison entre valeurs mesurées de l'évapotranspiration totale ($W.m^{-2}$) et celles estimées à l'aide du modèle, pour 4 différentes périodes du cycle cultural du mil: n , est le nombre d'observations horaires; LE_{mes} , la moyenne des valeurs mesurées de LE; $(LE_{est}-LE_{mes})$, l'écart moyen entre valeurs estimées et mesurées de LE; RMSE est la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts $(LE_{est}-LE_{mes})$; IC, l'intervalle de confiance à 95 %; a et b , respectivement le coefficient de régression et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression entre LE_{est} et LE_{mes} ; S_y , et S_a respectivement les erreurs standards sur LE_{est} et sur a .

Période du cycle	LAI=0,0	0,3<LAI<1,5	1,5<LAI<2,8	sénescence
n	84	96	96	168
LE_{mes}	147	119	169	103
$(LE_{est}-LE_{mes})$	-16	+3	+21	+20
RMSE	53	54	45	56
IC	11	11	9	8
$LE_{est} = aLE_{mes}+b$	a=0,61 b = 42	a = 1,05 b = -4	a = 1,11 b = -5	a = 1,24 b = -5
r^2	0,72	0,65	0,88	0,76
S_y	36	55	39	50
S_a	0,04	0,08	0,04	0,06

$$RMSE = [n^{-1} \cdot \Sigma (LE_{est} - LE_{mes})^2]^{1/2}$$

Willmot, (1982)

$$IC = 1,96 \cdot RMSE / n^{1/2}$$

Lhomme et al., (1994)

5.2.3.2 COMPARAISON DES CUMULS JOURNALIERS D'ETR MESURES ET CALCULES PENDANT LES CAMPAGNES 1991 ET 1992.

Les cumuls journaliers (de 7^h00 à 18^h00 T.U) des valeurs d'ETR calculées, s'accordent également bien aux valeurs mesurées à l'exception des zones de discordance du début de cycle (sous-estimation) et de fin de cycle (surestimation) précédemment signalée pour la campagne 1992. On observe une bonne corrélation linéaire positive (figure 77) avec un r^2 de 0,60 et un "RMSE" de 0,8 mm/j pour une valeur moyenne mesurée de 2,4 mm/j (tableau 25).

Les cumuls journaliers d'ETR mesurés (ETR_{mes}) et calculés d'une part à l'aide du modèle (ETR_{est}), et d'autre part en utilisant le coefficient cultural de Doorenbos et Pruitt (1977) (figure 6), sont également mentionnés sur le tableau 26 pour les campagnes 1991 et 1992, suivant des séquences de dessèchement après une pluie. Les mesures de LAI, du degré de recouvrement du sol (Dr), de la hauteur pluviométrique, du rayonnement net de la culture (Rn) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP-Penman 1948) correspondant à ces journées sont mentionnés sur ce tableau. Les résultats de simulation de l'année 1991 ont été obtenus par introduction des valeurs réellement mesurées de paramètres biologiques, au lieu des fonctions biologiques établies qui ne prennent pas en compte les effets d'un manque d'eau. Il ressort de cette comparaison, qu'en moyenne sur les 7 journées de chaque campagne, le modèle estime de façon satisfaisante l'ETR de la culture: l'écart absolu moyen ($ETR_{est} - ETR_{mes}$) sur les 7 journées, est de 0,4 mm/jour en 1991 et de 0,3 mm/jour en 1992. La méthode du coefficient cultural ($ETR = C.ETP$) surestime de façon systématique l'ETR pour tous les stades de LAI non nul de la culture. Les écarts ($C.ETP - ETR_{mes}$) les plus faibles sont observés en début de cycle ($LAI=0.0$) en raison de l'homogénéité de la surface. Cette dernière comparaison confirme une fois de plus les difficultés liées à l'utilisation d'un coefficient cultural pour le calcul de l'ETR des couverts épars.

A la lumière de ces résultats, on peut affirmer que le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985), ainsi appliqué à l'ensemble d'un

Figure 77: Régression linéaire entre valeurs journalières de l'ETR mesurées et calculée sur l'ensemble du cycle cultural du mil-92

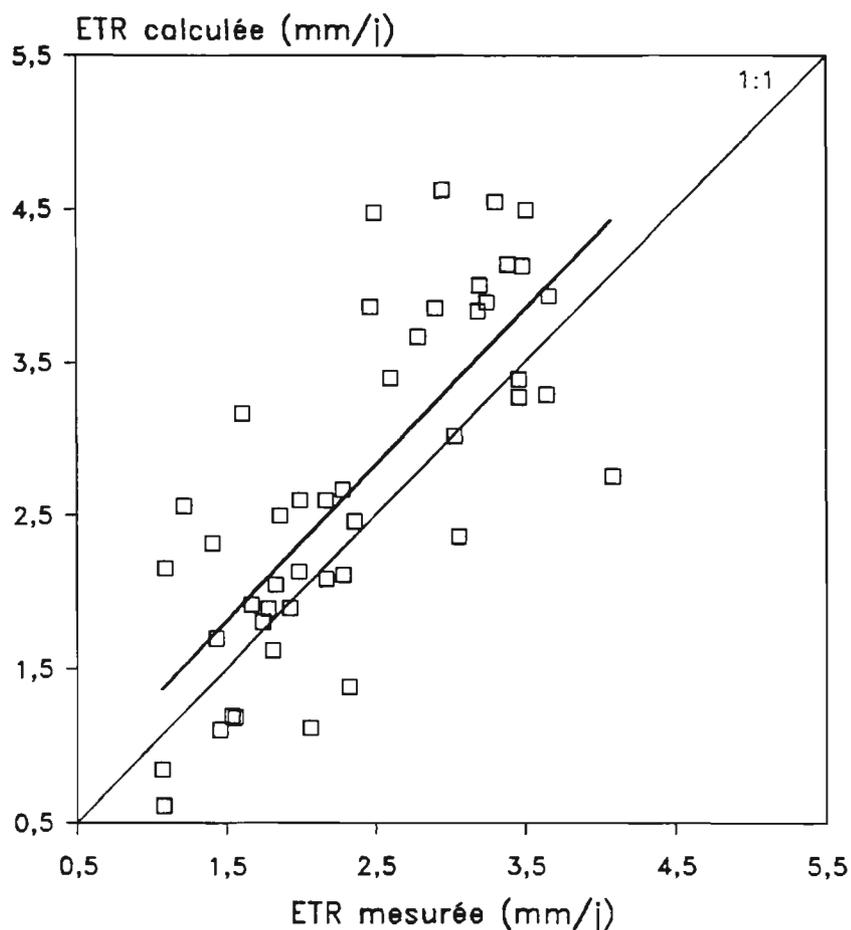


tableau 25: Résultats d'analyse statistique sur la comparaison des cumuls journaliers mesurés de LE (mm/j) avec ceux estimés à partir du modèle.

n	LEmes	LEmes-LEest	RMSE	IC	LEest=a.LEmes+b	r2	Sy	Sa
46	2,4	0,3	0,8	0,23	a = 1,02 b = 0,3	0,60	0,7	0,1

cycle cultural du mil, donne des résultats assez satisfaisants pour l'analyse et l'estimation de l'ETR de cette culture.

Tableau 26: Comparaison des valeurs journalières d'ETR mesurées (ETRmes) à celles calculées, d'une part à l'aide du modèle (ETRest), et d'autre part en utilisant le coefficient cultural (C) proposé par Doorenbos et Pruitt (1977): $ETR = C.ETP$.
 (C=1,1 pour LAI=0,9 LAI=1,5 LAI=2,7 et C=0,4 pour LAI=0,0)

Campagne 1992										
Jour cal.	LAI	DR (%)	Pluie (mm)	Rn (MJ/m2)	ETP (mm)	ETRmes. (mm)	ETRest. (mm)	Tr (mm)	Evsol (mm)	C.ETP (mm)
204			26,0							
205	0,0	0,0	0,0	12,8	5,5	3,6	3,3	0,0	3,3	2,2
206			0,0	11,7	5,9	3,0	2,4	0,0	2,4	2,4
207			0,0	9,0	4,8	1,5	1,1	0,0	1,1	1,9

243			19,3							
244	2,7	49	0,0	12,3	3,4	3,5	3,4	2,4	0,9	3,7
245			0,0	13,1	5,4	3,7	3,9	3,2	0,7	5,9
246			0,0	7,8	4,2	2,2	2,1	1,8	0,3	4,6
247			0,0	13,0	5,1	2,9	3,4	3,1	0,2	5,6
Campagne 1991										
Jour cal.	LAI	DR (%)	Pluie (mm)	Rn (MJ/m2)	ETP (mm)	ETRmes. (mm)	ETRest. (mm)	Tr (mm)	Evsol (mm)	C.ETP (mm)
162			13,0							
163	0,9	12	0,0	15,6	5,8	3,3	3,9	1,5	2,4	6,4
164			0,0	12,1	5,4	2,0	2,4	1,2	1,2	5,9
165			0,0	10,4	5,1	1,7	1,8	1,1	0,7	5,6

206			36,0							
207	1,5	28	0,0	12,8	4,2	2,6	3,0	1,6	1,4	4,6
208			0,0	9,4	3,8	1,6	2,1	1,4	0,8	4,2
209			0,0	8,8	3,5	1,4	1,9	1,4	0,6	3,9
210			0,0	13,6	5,4	1,7	2,1	1,6	0,5	5,9

5.3 EXPLOITATION DES SORTIES DU MODELE

5.3.1 EVOLUTION AU COURS DU CYCLE CULTURAL DE LA TRANSPIRATION ET DE L'EVAPORATION DU SOL CALCULEES A L'AIDE DU MODELE.

Une des nombreuses possibilités qu'offre le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985), est la séparation de l'évapotranspiration totale d'un couvert épars en ses 2 composantes: l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. L'évolution au cours du cycle cultural du mil de ces 2 termes rapportés à l'évapotranspiration totale (ETR) est représentée sur la figure 78. L'évaporation du sol varie au cours du cycle selon les épisodes pluvieux et la proportion de sol non couvert par la végétation à travers l'expression de la résistance de la surface de sol. Elle représente le terme dominant de l'ETR jusqu'aux environs du 47^{ème} JAS (LAI ≈ 1,5) où elle passe en dessous du seuil de 50 % ETR. La transpiration prend ensuite le relais en tant que composante principale de l'ETR et croît jusqu'à une valeur maximale fluctuant autour de 85 % ETR. Lafleur et Rouse (1990) utilisant le modèle de Shuttleworth et al. (1985), trouvent un seuil de stabilisation du rapport Tr/ETR de l'ordre de 80 % sur une culture de coton. Sur l'ensemble du cycle du mil en 1992, la répartition de l'évapotranspiration totale est de 40 % pour l'évaporation du sol et 60 % pour la transpiration. En assimilant ces 2 évolutions à des fonctions logistiques du nombre de jours après semis, on peut déterminer les paramètres correspondants par ajustement et ainsi avoir la répartition entre transpiration et évaporation selon la période du cycle du cycle du mil:

$$\frac{Tr}{ETR} = \frac{84,5}{1 + 3268 \cdot \exp(-0,234 \cdot JAS)} \quad (71)$$

$$\frac{Ev_{sol}}{ETR} = \frac{145,7}{1 + 0,06 \cdot \exp(0,074 \cdot JAS)} \quad (72)$$

Sur un couvert épars comme le mil, l'utilisation de l'approche du coefficient cultural serait encore plus commode avec les

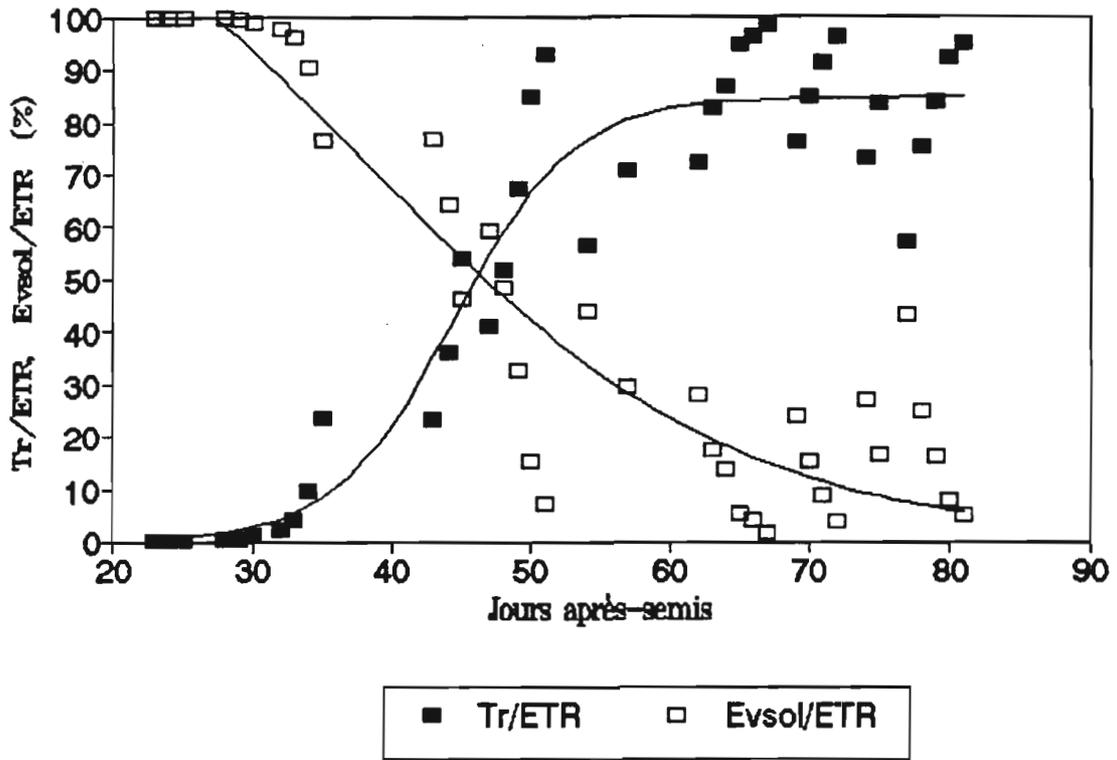


Figure 78: Evolution au cours du cycle cultural du mil-1992 des rapports Tr/ETR (transpiration journalière sur évapotranspiration réelle journalière) et $Evsol/ETR$ (évaporation journalière du sol sur évapotranspiration réelle journalière).

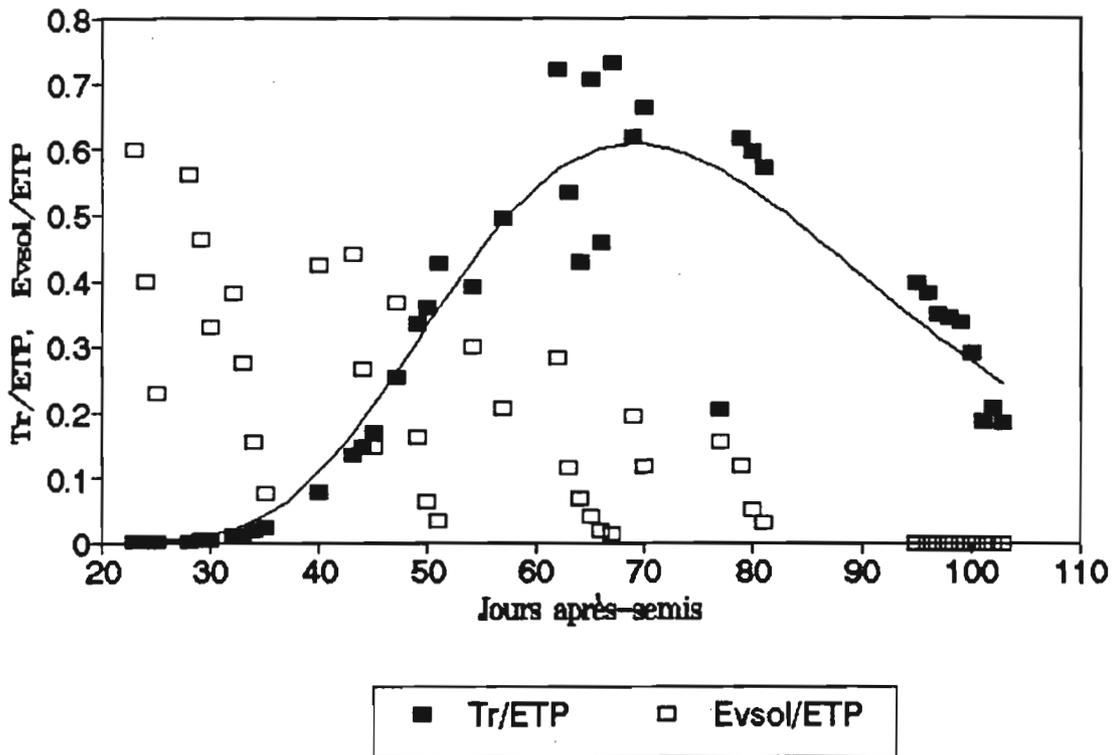


Figure 79: Evolution au cours du cycle cultural du mil-1992 des rapports Tr/ETP (transpiration journalière sur évapotranspiration potentielle journalière) et $Evsol/ETP$ (évaporation journalière du sol sur évapotranspiration potentielle journalière).

données de transpiration et non celles de l'évapotranspiration totale, en raison de la forte fluctuation de l'évaporation du sol due aux épisodes pluvieux. La transpiration rapportée à l'évapotranspiration potentielle (Penman 1948), évolue au cours du cycle selon une fonction du type Gaussienne, dont les paramètres sont déterminés par ajustement (figure 79).

$$\frac{\pi_r}{E_{TP}} = \frac{a}{b \cdot (2\pi)^{1/2}} \exp\{-0,5 \cdot [(\text{Log}JAS - c)/b]^2\} \quad (73)$$

$$\text{avec } a = 0,20 \quad b = 0,13 \quad c = 1,84$$

Une telle approche ne donne qu'une valeur approximative de la transpiration du mil qui dépend dans ce cas que de l'énergie disponible pour la culture, excluant la prise en compte de l'impact du stock d'eau du sol, ainsi que celui de l'interaction entre le sol et la végétation. Ceci n'est évidemment pas vérifié dans le cas des couverts épars, comme nous allons le voir sur des exemples concrets dans le chapitre qui suit.

5.3.2 EXEMPLES DE BILANS D'ENERGIE JOURNALIERS CALCULES A PARTIR DU MODELE.

Plusieurs exemples de bilans d'énergie journaliers correspondant à des journées humides (1^{ère} journée après une pluie) et sèches (plus de 3 jours après une pluie) pour 4 différentes périodes du cycle cultural du mil sont mentionnés sur le tableau 27. Les conditions climatiques, ainsi que certaines caractéristiques phénologiques de la culture correspondant à ces journées sont indiquées sur le tableau 28. L'évapotranspiration totale (LE), représente le terme dominant de dissipation de l'énergie pour la plupart des journées étudiées, ensuite vient le flux de chaleur sensible (H). Cependant pour certaines journées sèches, avec de forts rayonnements, cette tendance peut être inversée: $H > LE$, c'est le cas de la journée 207 (LAI = 0) et de la journée 279 en fin de cycle (tableau 27). L'absence de ce phénomène au cours des autres phases du cycle du mil, malgré des rayonnements forts (Rn

> 10 M.J.m⁻²), montre bien que la culture n'a pas subi de stress hydrique en 1992. Le tableau 27 montre également des valeurs de transpiration (LE_c) qui dépassent la quantité de l'énergie disponible pour la plante (R_n^c) sur l'ensemble des journées sèches (233, 249, 277 et 279). Ce phénomène est le résultat d'un dessèchement rapide de la surface du sol, qui devient la source majeure de la chaleur sensible ($H_s > H_c$). La plante quant à elle puise l'eau dans les horizons profonds ce qui lui permet de maintenir une température de surface inférieure à celle de l'air dans le couvert, entraînant des valeurs négatives de flux de chaleur sensible provenant de la végétation (Kustas et al., 1989). Il s'agit d'un phénomène caractéristique des couverts épars en condition sèche et mis en évidence par plusieurs auteurs dont Ham et Heilman (1991) sur le coton, Nichols (1992) sur des arbustes phreatophytes. Walker (1984) a mis en évidence un processus similaire sur un couvert de maïs, mais cette fois ci, avec un flux de chaleur sensible allant de la végétation vers la surface du sol. Cet auteur montre que lorsque le sol est suffisamment humide, l'évaporation du sol dépasse la quantité d'énergie disponible, indiquant l'existence d'un transfert de chaleur sensible de la végétation vers le sol. Ces 2 résultats, le premier en condition de sol sec, entraînant des valeurs de transpiration supérieures à l'énergie disponible pour la plante et le second en condition de sol humide, donnant des valeurs d'évaporation du sol plus grandes que la quantité d'énergie disponible au niveau du sol, montrent les limites des modèles d'estimation de l'ETR des couverts épars, à partir de l'énergie disponible, du type équation de Priestley et Taylor (1972) qui excluent toute interaction entre les 2 composantes de la culture.

Tableau 27: Exemples de bilans d'énergie journaliers (7^h00-18^h00 T.U) pour 4 différentes périodes du cycle cultural du mil, exprimés en M.J.m⁻².j⁻¹. JC est le jour calendaire de l'année 1992; Rn, Rnc et Rns, respectivement, le rayonnement net au dessus de la culture, au niveau de la végétation et à la surface du sol; LE, LEc et LEs, respectivement l'évapotranspiration totale de la culture, la transpiration de la plante et l'évaporation du sol; H, Hc et Hs, respectivement, le flux de chaleur sensible au dessus de la culture, provenant de la végétation, et celui du sol. Pour les 3 premières phases, le 1^{er} JC, correspond à une journée humide (le lendemain d'une pluie), et celui de dessous à une journée sèche. Pour la phase de sénescence, JC 277 correspond au 18^{ème} jour depuis la dernière pluie de l'année 1992. Pour toute information complémentaire sur les conditions climatiques et les caractéristiques phénologiques correspondantes à ces journées, se reporter au tableau 6.

JC	Plante			Sol				Champ		
	Rnc	LEc	Hc	Rns	LEs	Hs	G	Rn	LE	H
début du cycle										
205	0,0	0,0	0,0	12,9	7,9	2,9	2,2	12,9	7,9	2,9
207	0,0	0,0	0,0	9,0	2,6	4,2	2,2	9,0	2,6	4,2
phase végétative										
229	5,0	4,1	1,0	9,6	5,9	0,7	3,1	14,6	9,9	1,6
233	5,2	5,8	-0,6	5,8	0,5	2,1	3,2	11,0	6,2	1,5
phase reproductrice										
244	8,2	5,8	2,4	4,1	2,3	-0,5	2,3	12,4	8,1	1,9
249	7,8	8,0	-0,2	3,6	0,1	1,2	2,3	11,5	8,1	1,0
sénescence										
277	4,6	5,1	-0,5	7,3	0,0	5,2	2,1	11,8	5,1	4,7
279	3,9	4,3	-0,5	7,0	0,0	5,7	1,3	10,9	4,3	5,2

Tableau 28: Conditions climatiques et caractéristiques phénologiques correspondantes aux journées du tableau 5. JAS est le nombre de jours après semis; Rg le rayonnement global; Ta, la température de l'air sous abri; Hr, l'humidité relative de l'air; U, la vitesse moyenne du vent au dessus de la culture; LAI, l'indice foliaire, Ht, la hauteur moyenne de la plante; et Dr le degré de recouvrement du sol par la végétation.

JC	JAS	Pluie (mm)	Rg (M.J/m ² /j)	Ta (°C)		Hr (%)		U (m/s)	LAI	Ht (m)	Dr (%)
				max	min	max	min				
début de cycle											
204		26,0									
205	23	0,0	23,5	32	23	100	58	3,2	0,0	0,0	0
207	25	0,0	19,6	32	26	86	59	5,3			
Phase végétative											
228		13,5									
229	47	0,0	26,9	33	21	100	50	2,1	1,0	0,5	19
233	51	0,0	25,4	36	26	82	42	5,5			
Phase reproductrice											
241		29,0									
242		16,6									
243		19,3									
244	62	0,0	23,1	29	22	102	69	4,3	2,7	1,4	49
249	67	0,0	23,5	33	25	95	59	4,0			
Sénescence											
277	95	0,0	23,7	37	24	85	34	2,5	1,1	2,2	35
279	97	0,0	23,0	38	24	87	29	2,0			

5.4 UTILISATION SIMPLIFIEE DU MODELE A L'AIDE DES DONNEES-1991

Le modèle ci-dessus présenté nécessitera en plus des paramètres climatiques classiques, la connaissance du rayonnement net et du flux conductif dans le sol. Or ces derniers paramètres ne sont pas faciles d'accès en région sahélienne pour des raisons de prix et de la technicité qu'exige leur mise en place. Il est dès lors nécessaire d'envisager leur estimation à partir des paramètres mesurés habituellement. Le rayonnement net est une fonction complexe du rayonnement solaire global, des conditions atmosphériques et des caractéristiques biologiques de la surface. Quant au flux conductif, son évolution est affecté par le bilan d'énergie et les caractéristiques physiques du sol. Donc à défaut d'un véritable modèle de bilan radiatif qui prendrait en compte tous ces facteurs, la simplification du modèle a été envisagée par l'utilisation de relations empiriques du type $R_n = f(R_g, LAI)$ et $G = f(R_n)$, habituellement utilisées dans la littérature et dont nous avons établi à l'aide des "mesures mil-1992" au chapitre 4. Ainsi, nous avons utilisé les relations:

$$R_n = 0,60 * R_g - 32 \quad \text{pour} \quad 0,1 < LAI < 2,8 \quad (\text{Tableau 13}) \quad \text{et}$$

$$G = 0,21 * R_n \quad (\text{Tableau 18})$$

Les simulations ont porté sur 6 journées des "mesures mil-1991", 163, 164 et 165 correspondant à un LAI de 0,9, et les journées 207, 208 et 209 correspondant à un LAI de 1,5. Les confrontations entre valeurs d'évapotranspiration totale mesurées et calculées sont présentées sur les figures 80, 81 et 82. Malgré une légère surestimation, le résultat d'ensemble est cependant acceptable compte tenu des simplifications opérées. Le modèle perd peut être en précision, mais gagne en légèreté par la réduction du nombre de variables d'entrée qui se limitent au rayonnement global, la vitesse du vent, la température et l'humidité de l'air pour les variables climatiques; le LAI, la hauteur, et le recouvrement du sol pour les caractéristiques biologiques.

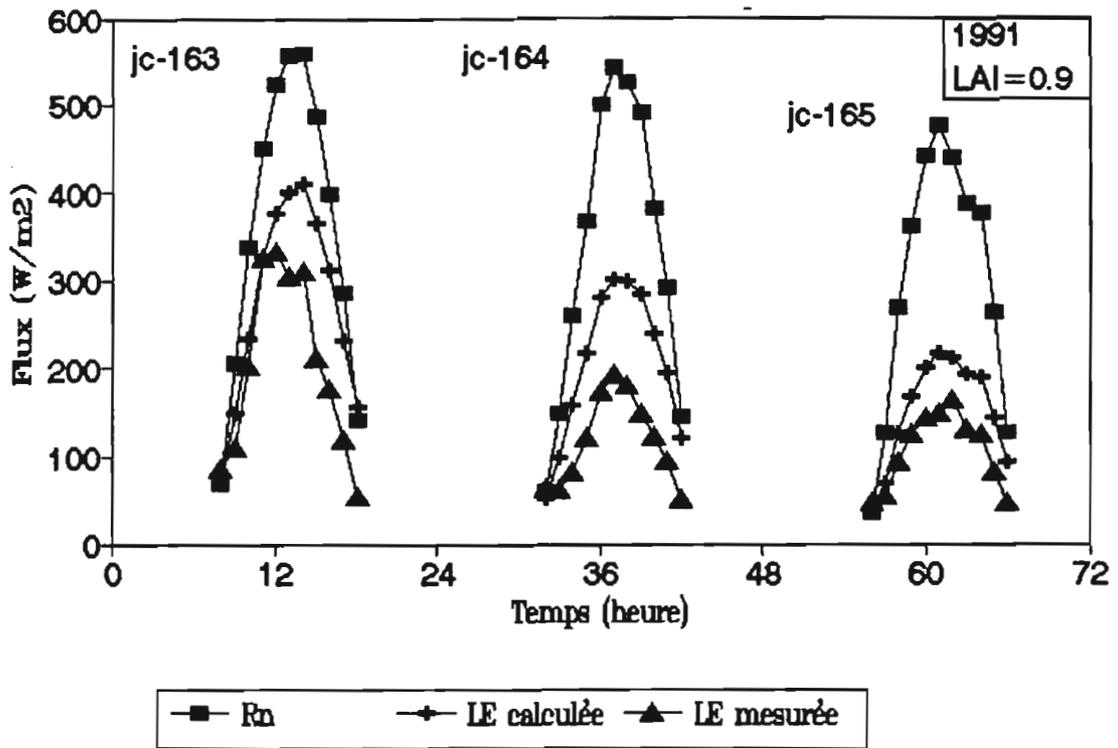


Figure 80: Comparaison entre LE mesurée en 1991 et LE calculée à l'aide du modèle simplifié (LAI=0,9).

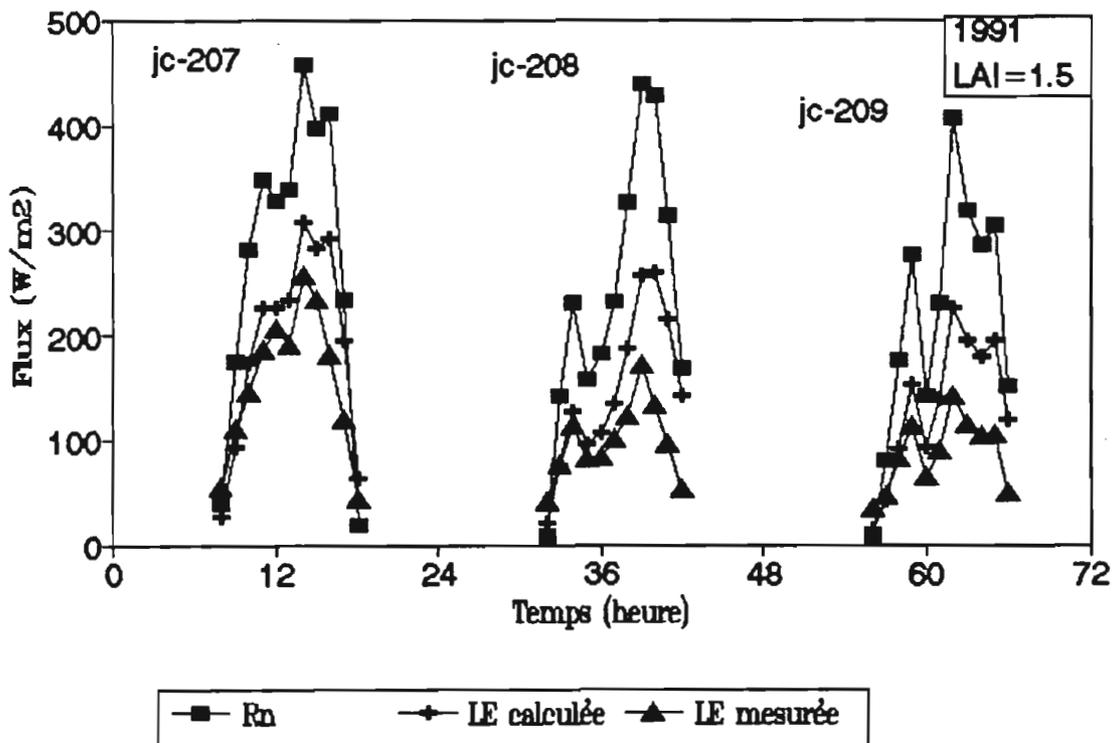


Figure 81: Comparaison entre LE mesurée en 1991 et LE calculée à l'aide du modèle simplifié (LAI=1,5).

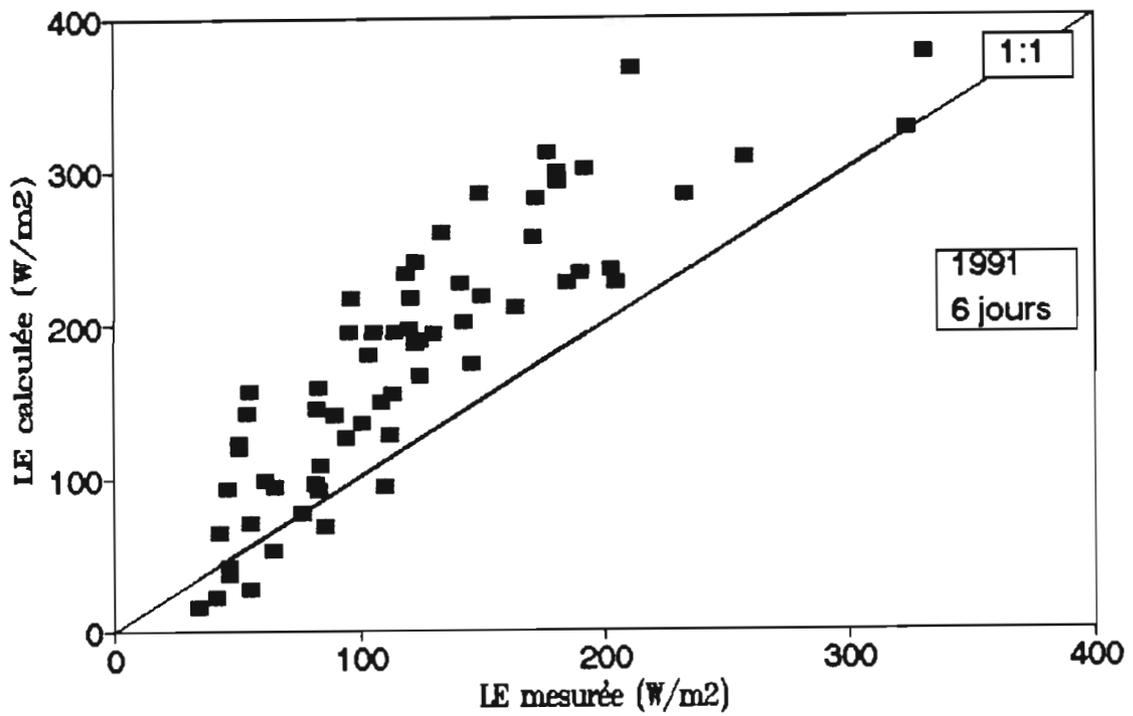


Figure 82: Régression linéaire entre **LE** mesurée et **LE** calculée à l'aide du modèle simplifié pour 6 journées de l'année 1991.

5.5 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Le modèle de Shuttleworth et al. (1985) ainsi appliqué à une culture de mil, permet une bonne estimation horaire et journalière de l'ETR, avec la possibilité de calculer séparément la transpiration de la plante et l'évaporation du sol intercalaire sur l'ensemble du cycle cultural.

L'étude de la sensibilité du modèle, confirme l'influence peu importante de la forme du profil de vent à l'intérieur du couvert (n') et du mode d'atténuation de la diffusivité turbulente (n), sur les valeurs des flux calculés pendant les journées humides. En revanche pendant les journées sèches, la transpiration demeure sensible à la variation du coefficient d'atténuation de la vitesse du vent à l'intérieur du couvert (n'). La multiplication par 2 de la valeur de n' , entraîne une augmentation de la transpiration de l'ordre de 8 à 9 % de sa valeur journalière, et inversement lorsque l'on réduit n' de 50 %, la valeur de la transpiration journalière baisse de l'ordre de 8 à 13 % (tableau 22). Cette situation traduit l'effet de la résistance de couche limite des feuilles (r_b) sur la transpiration, effet d'autant plus perceptible que le déficit de saturation de l'air dans le couvert (D_o) est grand.

La comparaison de l'évolution des différentes résistances au transfert des flux, montre que la résistance de couche limite du couvert (r_{c_s}) ne peut pas être négligée par rapport à la résistance stomatique moyenne (r_{c_s}), quelle que soit la période du cycle considérée. La fonction d'estimation de la résistance stomatique moyenne de la culture (r_{c_s}) que nous avons utilisée dans le modèle, ne prend pas explicitement en compte l'évolution du stock hydrique du sol, mais elle l'intègre de façon implicite à travers sa pondération par le LAI dont les valeurs sont étroitement liées à l'évolution du stock d'eau dans le sol (Figure 83). Le LAI intervient dans toutes les principales paramétrisations du modèle de Shuttleworth et Wallace (1985): répartition du rayonnement net entre la surface du sol et la végétation; fonctions des résistances stomatique (r_{c_s}) et de couche limite (r_{c_s}) moyennes de la culture; paramètres de rugosité aérodynamique. Sa moindre variation ou celle du degré de recouvrement, peut entraîner une modification signifi-

Figure 83: Evolution du stock d'eau dans les 50 premiers centimètres du sol en relation avec le LAI du mil-1992.

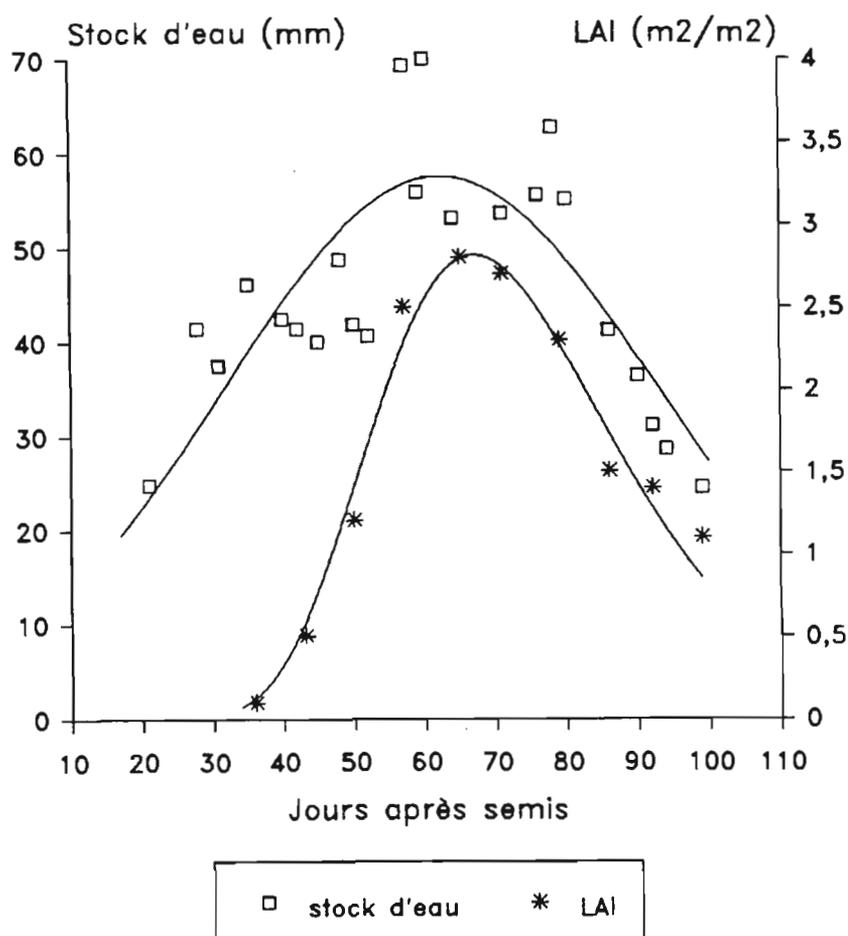


Tableau 29: Poids des paramètres biologiques sur la détermination de l'évapotranspiration totale (ETR), la transpiration de la plante (Tr) et l'évaporation du sol (Evsol).
(JC-245; LAI = 2,7; Dr = 50%; htc = 1,2m ; Rn = 12 MJ/m2)

	ETR (mm)	Tr (mm)	Evsol (mm)
LAI x 5/4	+15%	+22%	-14%
LAI x 1	3,9	3,2	0,7
LAI x 3/4	-8%	-16%	+29%
Dr x 5/4	0%	+3%	-14%
Dr x 1	3,9	3,2	0,7
Dr x 3/4	+8%	+3%	+29%
htc x 5/4	+5%	+3%	0%
htc x 1	3,9	3,2	0,7
htc x 3/4	+3%	+3%	0%

cative des flux calculés (tableau 29). L'évolution de la hauteur de la culture par contre, se traduit par une faible variation des flux calculés. Il faudra donc accorder une grande importance à la détermination du LAI et du degré de recouvrement pour l'estimation de l'ETR du mil à l'aide de ce modèle.

Le modèle permet de mettre en évidence l'interaction des flux provenant des 2 composantes de la culture (sol + végétation), et de distinguer les rôles de chacune de ces 2 composantes. En effet, le dessèchement rapide de la surface d'un sol sableux après une pluie entraîne un transfert de chaleur sensible du sol vers la végétation, ce qui accroît la transpiration de la plante qui puise l'eau dans les horizons profonds. On obtient ainsi des valeurs de transpiration qui dépassent la quantité d'énergie disponible (tableau 27). Ce qui montre les limites des méthodes d'estimation de l'ETR des couverts épars basées sur l'utilisation de l'énergie disponible. Comme l'ont montré Wallace et al. (1993), l'évaporation du sol intercalaire du mil, représente une composante importante de l'ETR totale de la culture, sa valeur dépasse le seuil de 50 % ETR du début du cycle jusqu'au stade de LAI $\approx 1,5$. Sur l'ensemble du cycle elle représente 40 % de l'ETR totale en 1992. Une telle répartition de l'ETR du mil en ses 2 composantes mérite d'être vérifiée grâce à des mesures indépendantes de transpiration et d'évaporation du sol, tout comme la constance sur l'ensemble du cycle cultural du coefficient d'extinction du rayonnement net à l'intérieur du couvert (K_n). Une meilleure estimation de la résistance de la couche sèche du sol qui inclut le compartiment sol est également nécessaire, pour prendre en compte l'effet des réhumectations nocturnes.

Par ailleurs, une simplification de ce modèle a été envisagée, en introduisant 2 relations empiriques pour l'estimation du rayonnement net et du flux conductif dans le sol, de manière à limiter les entrées du modèle aux seules variables météorologiques habituellement mesurées et les caractéristiques biologiques de la culture.

Chapitre 6

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Chapitre 6

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce travail était de mettre au point un modèle simple d'estimation de l'évapotranspiration, et d'apporter notre contribution pour une meilleure connaissance du fonctionnement énergétique et hydrique du mil. Les principaux résultats auxquels nous avons aboutis, portent sur la description des caractéristiques biologiques, l'évaluation du bilan énergétique et hydrique et la modélisation de l'évapotranspiration du mil.

Concernant la phénologie du mil, l'évolution au cours du cycle des différents paramètres biologiques (LAI, hauteur, recouvrement, etc...) a été ajustée à des lois de croissance connues, de façon à pouvoir estimer ces paramètres à défaut d'une mesure directe en condition d'alimentation hydrique non limitante.

De l'évaluation des caractéristiques radiatives et énergétiques de la culture, il a été établi des relations permettant d'estimer d'une part l'albédo du mil en fonction du LAI et d'autre part, le bilan de grandes longueurs d'ondes en fonction du bilan de courtes longueurs d'ondes. Cette dernière relation est indépendante du stade de développement du mil, et présente l'intérêt de permettre une estimation du rayonnement net connaissant le rayonnement global et l'albédo de la culture. La validation de la relation effectuée sur les données mil-91 a donné des résultats satisfaisants. Des relations linéaires entre le rayonnement global et le rayonnement net suivant les stades de développement du mil, ont également été proposées. La proportion du flux conductif dans le sol, par rapport au rayonnement net (G/R_n) est en moyenne de 21% pour les 2 campagnes.

Le calcul du bilan hydrique sur l'ensemble du cycle du mil, a montré que 40% du cumul pluviométrique en 1991 et 46% de ce cumul en 1992, n'ont pas été utilisés par la culture, ce qui confirme la faible efficacité d'utilisation de l'eau de pluie par le mil cultivé en champ paysan des régions sahéliennes. Les solutions qui sont proposées dans la littérature pour limiter cette perte et

perte et ainsi valoriser le maximum d'eau que reçoit la culture, vont de l'apport de fumure organique en petites quantités mais de façon plus fréquente, à la pratique des cultures associées, la multiplication des sarclages et l'agroforesterie. Les modalités pratiques d'application de chaque solution dépendront des conditions pédoclimatiques du milieu. Un accent doit être mis sur la recherche de ces modalités.

Concernant la modélisation de l'évapotranspiration du mil, le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985) a été paramétré et rendu opérationnel pour l'estimation de l'ETR totale de la culture, la transpiration de la plante et l'évaporation du sol nu sur l'ensemble du cycle du mil. Les entrées du modèle sont les données météorologiques classiques et les caractéristiques biologiques de la culture. La paramétrisation a porté d'une part, sur la répartition de l'énergie disponible entre le sol et la végétation, et d'autre part, sur les principales résistances aux échanges. Par ailleurs, de l'étude des différents paramètres du modèle et des flux calculés, il est ressorti :

- qu'en plus des 2 principales résistances aux transferts des flux (résistance stomatique et de la surface du sol), la résistance de la couche limite du couvert a un rôle non négligeable quelle que soit la période du cycle du mil.
- Compte tenu du poids des paramètres biologiques (LAI et D_r principalement) sur la détermination de l'ETR du mil à l'aide de ce modèle, une grande importance doit être accordée à leur évaluation.
- enfin, l'évaporation du sol représente une fraction importante de l'ETR totale: de l'ordre de 40 % ETR sur l'ensemble du cycle du mil.

PERSPECTIVES

La précision des prédictions du modèle peut être améliorée par une meilleure estimation de certains paramètres. Les estimations de la résistance stomatique du couvert et de la résistance de la surface du sol, peuvent être améliorée par le couplage d'un compartiment sol pour tenir compte du stress hydrique pour la résistance stomatique et des réhumectations nocturnes pour la résistance de la surface du sol. Le couplage d'un modèle de bilan radiatif serait également nécessaire pour améliorer l'estimation de la quantité d'énergie disponible.

Comme l'ont suggéré Lafleur et Rouse (1990), le mode de répartition de cette énergie disponible entre le sol et la végétation doit être vérifié sur l'ensemble du cycle, à partir de mesures indépendantes de rayonnement net au dessus et à l'intérieur de la culture.

Le couplage de ces sous-modèles permettra d'améliorer la précision des prédictions du modèle, mais l'alourdirait en terme de variables de forçage et de temps de calcul.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AZAM-ALI, S.N.**, 1983: Seasonal estimates of transpiration from a millet crop using a porometer; *Agricultural Meteorology*, 30 (1983) 13-24.
- AZAM-ALI, S.N., GREGORY, P.J., MONTEITH, J.L.**, 1984: Effects of planting density on water use and productivity of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) grown on stored water; I - Growth of roots and shoots; *Expl. Agric.* (1984) vol. 20, pp 203-214.
- AMBOUTA, K.**, 1984: Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'ouest nigérien, Thèse Doctorat-Ingénieur, Université Nancy I.
- AGNEW, C.T.**, 1991: Evaluation of soil water balance model for the analysis of agricultural drought in the sahel. In: Sivakumar M.V.K, Wallace C., Renard C. et Giroux C.,: *Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*, Proc. Niamey Workshop, February 1991, IA HS Publ., - no.199, pp. 583-592.
- AVISSAR, R., AVISSAR, P., MAHRER, Y. and BRAVDO, B. A.**, 1985: A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agric. Forest Meteorol.* 34, 21-29.
- AASE, J.K.**, 1978: Relationship Between Leaf Area and Dry Matter in Winter Wheat; *Agronomy Journal*, vol. 70, July-August, P 563-565.
- AMADOU, M. et FUSSEL, L.K.** 1987: Croissance et Développement d'une gamme de variétés de mil; Mémoire de Maîtrise ès Sciences Agronomiques: ICRISAT-Faculté d'Agronomie de Niamey. 44 p.
- AMADOU, M. et BERBIGIER, P.**, 1989: Estimation de l'évapotranspiration d'un couvert de pin maritime (*Pinus pinaster*) par la méthode du bilan d'énergie-fluctuation de température et de vitesse verticale du vent. Mémoire de D.A.A de l'E.N.S.A de Rennes. 48 p.
- AFFHOLDER, F.**, 1991: Influence de la gestion de la fertilité et du contrôle de l'enherbement sur l'efficacité de l'eau et la production du mil pluvial; Séminaire International sur la "Gestion Agroclimatique des Précipitations", Bamako, 9-13 décembre, 1991.
- BALDY, C.**, 1986: Agrométéorologie et développement des régions arides et semiarides. INRA, ISBN:2-85340-792-6, 113 p.

- BONHOMME, R. and VARLET-GRANCHER, 1978: Estimation of the Gramineous Crop Geometry by Plant Profiles Including Leaf Width Variations; *Photosynthetica* 12(2): 193-196.
- BRUTSAERT, W., 1982: *Evaporation into the Atmosphere, Theory, History, and Applications*, Reidel, Boston, pp 151.
- BLACKMAN, G.E., 1956: Influence of light and temperature on leaf growth. In MILTHORPE F.L. ed., *The Growth of Leaves*, Butterworths Scientific Publications, London. pp. 151-169.
- BOWEN, I.S., 1926: the ratio of heat losses by conduction and by evaporation for any water surface. *Physiol. Rev.*, 27:779-787.
- BEGUE, A., 1991: Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques: Cas d'un couvert discontinu: Le mil; Thèse de Doctorat, Université de Paris 7, 139p.
- BENIGA, M.B., 1992: Bilan des travaux d'amélioration variétale en Côte d'Ivoire. Note de la réunion thématique sur le mil (*Pennisetum glaucum* L.), Montpellier du 24 au 26 nov. 1992.
- BROUWER, J. and POWELL J.M., 1994: Soil aspects of nutrient cycling in a manure application experiment in Niger. Publication du Centre Sahélien de l'ICRISAT.
- CAMILLO, P.J. and GURNEY, R.B., 1986: A resistance parameter for bare-soil evaporation models. *Soil Science*, vol. 141, N°2.
- CELLIER, P., BRUNET, Y., 1992: Flux-gradient relationships above tall plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58 (1992) 93-117.
- CELLIER, P., OLIOSO, A., 1993: A simple system for automated long-term Bowen ratio measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* (0168-1923/93/\$06.00 c 1993).
- CELLIER, P., RICHARD, G., and ROBIN, P., 1993: Influence of soil characteristics on the energy exchanges between a bare soil and the atmosphere. Soumis à *Agricultural and Forest Meteorology*.
- CHOUDHURY, B.J., REGINATO, R.J., and IDSO, S.B., 1986: An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agric. For. Meteorol.*, 37:75-88.
- CHOUDHURY, B.J. and MONTEITH, J.L., 1988: A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 114, pp. 373-398.

- CHANDA, S.V., JOSHI, A.K., VAISHNAV, P.P., and SINGH, Y.D., 1985: Leaf Area Determination in Pear Millet Using Linear Measurements-Area and Matter-Area Relationships; *Photosynthetica* 19 (3): 424-427.
- CHOPART, J.L., 1980: Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide-mil-Sorgho-Riz pluvial); Thèse de Doctorat, INP Toulouse, 162 p.
- CHOPART, J.L., 1983: Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum Typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal; *Agronomie Tropicale* XXXVIII-1, P 37-36.
- CHOPART, J.L., 1989: Scruter les racines à travers des grilles: Une méthode fort utile; La lettre du R3S: Réseau de la CORAF et du CILSS. Num.2, Nov.89, p 5.
- CHAROY, J., 1974. Dynamique de l'eau dans les sols ferrugineux tropicaux d'origine dunaire de Tarna et application au mil, à l'arachide, et au sol nu. *Agrn. Trop.* 29:821-872.
- DAUDET, F.A. et PERRIER, A., 1968: Etude de l'évaporation ou de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan d'énergie. *Rev. gén. Therm.*, 76, 353-364.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W.O., 1977: Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage, P. 24, FAO, Rome.
- DOLMAN, A.J. and WALLACE, J.S., 1991: Lagrangien and K-theory approaches in modelling evaporation from sparse canopies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 117, pp 1325-1340.
- DOLMAN, A.J., 1993: A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models. *Agric. Forest Meteorol.*, 65, 21-45.
- DUGAS, W.A., FRITSCHEN, L.J., GAY, L.W., HELD, A.A., MATTHIAS, A.D., REICOSKY, D.C., STEDUTO, P. and STEINER, J.L., 1991: Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat; *Agric. Forest Meteorol.*, 56, 1-20.
- DANCETTE, C., 1983: Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi-aride tropicale. *Agronomie Tropicale*, 38-4.
- DANCETTE, C., 1971. Contrôle avec l'humidimètre à neutrons de l'alimentation hydrique d'une culture de mil "Souna" pendant deux hivernages très différents. *Agron. Trop.* 26:721-735.

- DIRECTION DE L'AGRICULTURE, Niamey Niger: Rapport de campagne 1992.**
- FOREST, F., 1991:** Intérêts et limites de l'apport de matière organique en zone soudano-sahélienne: effet sur l'alimentation hydrique et sur le rendement des cultures d'arachide et de mil; In: Influence du climat sur la production des cultures tropicales; Compte rendu du séminaire organisé par la Fondation Internationale pour la Science du 23 au 28 septembre 1991 au Burkina Faso, pp 94-104.
- FRIEND, D.J.C., 1966:** The effects of light and temperature on the growth of cereals; In: The Growth of cereals and grasses; MILTHORPE and IVINS ed., Butterworth, London, pp. 181-199.
- GOUTORBE, J-P., LEBEL, T., TINGA, A., BESSEMOULIN, P., BROUWER, J., DOLMAN, A.J., ENGMAN, E.T., GASH, J.H., HOEPFFNER, M., KABAT, P., KERR, Y.H., MONTENY, B.A., PRINCE, S., SAID, F., SELLERS, P., WALLACE, J.S., 1994:** Hapex-Sahel: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophysicae* 12, 53-64.
- GAVAUD, M., 1975:** Etude pédologiques du Niger Occidental; ORSTOM-Rép. du Niger, Service du Génie Rural, Dakar-Hann, 2 tomes, 513 p.
- HEILMAN, J.L. and BRITTIN, C.L., 1989:** Fetch requirement for bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agri. Forest Meteorol.*, 44, 261-273.
- HAM, J.M. and HEILMAN, J.L., 1991:** Aerodynamic and surface resistances affecting energy transport in a sparse crop. *Agri. Forest Meteorol.*, 53, 267-284.
- HENSON, I.E., ALAGARSWAMY, G., BIDINGER, F.R., and MAHALAHSHMI, V., 1982:** Stomatal responses of pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke) to leaf water status and environmental factors in the field. *Plant, Cell and Environment* (1982) 5, 65-74.
- ITIER, B., et KATERJI, N., 1983:** Une expression simplifiée de la résistance aérodynamique d'un couvert végétal (Application à la mesure des flux de masse et d'énergie). *Acta Ecologica*, vol.4 p. 215-227.
- JEWIS, O.R., 1966:** Morphological and physiological aspects of growth of grasses during the vegetative phase; In: The growth of cereals and grasses; MILTHORPE and IVINS ed., Butterworth, london, pp 39-56.

- KUSTA, W.P., CHOUDHURY, B.J., GAY, L.W., and WEAVER H.L., 1989: Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agric. For. Meteorol.* 44: 197-216.
- KLAIJ, M.C., and VACHAUD, G., 1992: Seasonal water balance of sandy soil in Niger, cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agri. Mater Management*, 21:313-330.
- KHOUJA, N., 1990: Contribution à l'étude de la mise en place foliaire du Maïs en relation avec la température. Thèse de Docteur en Science de l'Université de Paris-Sud. 66 P.
- KATERJI, N., 1992: Les grandeurs de référence utilisables pour caractériser l'état hydrique chez les plantes cultivées.
- KATERJI, N. et PERRIER A., 1985: Détermination de la résistance globale d'un couvert végétal à la diffusion de la vapeur d'eau et des différentes composantes. Approche théorique et vérification expérimentale sur une culture de luzerne. *Agric. Forest Meteorol.* 34, 105-120.
- KATERJI, N. et PERRIER, A. 1983: Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie*, 1983, 3 (6), 513-521.
- KASSAM, A.H. and KOWAL, J.M., 1975: Water use, energy balance and growth of Gero millet at Samaru, Northern Nigeria. *Agric. Forest Meteorol.*, 15 (1975) 333-342.
- KALMS, J.M. et VALET, S., 1975: Besoins en eau de différentes cultures vicrières et industrielles dans les conditions pédo-climatiques des terrasses du Fleuve Niger à Tillabéry (hivernage 1972), IRAT Ronéo 24p. juillet 1975.
- LAFLEUR, P.M and ROUSE, W.R., 1990: Application of an energy combination model for evaporation from sparse canopies. *Agric. Forest Meteorol.* 49, 135-153.
- LHOMME, J.P., 1988: A generalized combination equation derived from a multi-layer micrometeorological model; *Boundary-Layer Meteorology* 45 (1988) 103-115.
- LHOMME, J.P., MONTENY, B. A., AMADOU, M., 1994: Estimating sensible heat flux from radiometric temperature over sparse millet using a two layer model. *Agri. For. meteorol.* 68:93-105.
- LE FEVRE J., LAMOTTE M., PEUGEOT C., 1994: L'évaporation pendant la saison humide au sein d'un sol sableux de la région de Niamey

(Niger). X^{ème} journées d'hydrologie de l'ORSTOM, Montpellier 13 et 14 septembre 1994.

LAMBERT, C., 1983: Influence de la précocité sur le développement du mil (*Pennisetum Typhoides*: Stapf et Hubbard) en conditions naturelles. *Agronomie Tropicale* XXXVIII-1.

MONTEITH, J.L. and SZEICZ, G. 1961: The radiation balance of bare soil and vegetation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 87, 159-170

MONTEITH, J.L., 1965: Evaporation and environment, *Symp. Soc. Exp. Biol.* XIX, 205-234.

MONTEITH, J.L., 1973: *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold ed., London, 241 p.

MONTEITH, J.L., 1981: Evaporation and surface temperature, *Quart. J. Roy. Soc.*, 107, 1-27.

MATTHIAS, A.D., KUSTAS, W.P., GAY, L.W., COOPER, D.I., ALVES, L.M. and PINTER, P.J., 1990: Aerodynamic parameters for a sparsely roughened surface composed of small cotton plants and ridged soil. *Remote Sens. Environ.* 32: 143-153.

MONTENY, B., et GOSSE, G., 1976: Analyse et estimation du rayonnement net d'une culture de *Panicum maximum* en zone tropicale humide. *Oecol. Plant.*, 11 (2), 173-191.

MONTENY, B.A. et LHOMME, J.P., 1980: *Eléments de bioclimatologie*. ORSTOM, éd. P 1-48.

MONTENY, B.A., ZELLER, B. et HAINNAUX G., 1985: Estimation des besoins en eau de la canne à sucre en région soudano-sahélienne pour la conduite de l'irrigation; in: les besoins en eau des cultures, Conférence internationale, Paris, 11-14 sept. 1984, INRA Paris-1985.

MONTENY, B.A., 1987: Contribution à l'étude des interactions végétation-atmosphère en milieu tropical humide. Importance du rôle du système forestier dans le recyclage des eaux de pluies. Thèse de Doctorat d'Etat és Sciences Naturelles, Université de Paris-Sud. 170p.

MONTENY, B.A. et LEROUX, X., 1991: Paramétrisation de l'évapotranspiration d'une jachère à *Guiera Senegalensis*; Document présenté à l'atelier international sur le "Bilan hydrique en région sahélienne".

- MOREL, R., 1988:** Remarques à propos de l'effet des facteurs locaux sur la baisse de pluviométrie observée en Afrique de l'Ouest sur le Sahel. Veille Climatique Satellitaire. ORSTOM. Bull. n°23, pp 29-36.
- MARINI, P., DAOUDA, S., et DO, F., 1988:** Etude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse (cas d'un stress hydrique terminal); publication interne de l'Institut des Radio-isotopes de l'Université de Niamey.
- MAMADOU K.A. et FUSSEL L.K., 1987:** Différences variétales dans la croissance racinaire (profondeur d'enracinement), et l'extraction de l'eau chez le mil sur les 190 premiers centimètres de profondeur. Mémoire de Maîtrise Es - Sciences Agronomiques de la Faculté d'Agronomie: Université de Niamey, 55 p.
- Nie, D., FLITCROFT, I.D. and KANEMASU, E.T., 1992:** Performance of Bowen ratio systems on a slope. Agric. and Forest Meteo., 59(1992) 165-181.
- NICHOLS, W.D., 1992:** Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland. Agri. and Forest Meteo. 60, 221-247.
- NOURI, M., REDDY, K.C. et GANDAH, M., 1989:** Utilisation de l'eau par le mil et niébé en culture pure et associée; In: Berrada A., Mahaman I. et Gandah M.: Les actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau, et la fertilisation; Tahoua 20-24 février 1989. p.97-102.
- N'GUESSAN, A.E. et OSSENI, B., 1989:** Relation entre le rayonnement net et le rayonnement global en basse Côte d'Ivoire, cas de cultures homogènes ou associées d'ananas et de piment. Fruits-vol. 44, n°6.
- PERRIER, 1975:** Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. Ann. Agron., 26: 229-243.
- PERRIER, A., ITIER, B., BERTOINI, J-M. and BLANCO de PABLOS, A., 1975:** Mesures automatiques du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. Ann. Agron., 26:19-40.
- PERRIER, A., 1976:** Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux: Profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette. Thèse

de Doctorat d'Etat es Sciences Physiques de l'Université de Paris VI, 234 p.

PRIESTLEY, C.H., and TAYLOR, R.J., 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Month. Weather Rev.*, 100, 81-92.

PENMAN, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A 193, 120-145.

PAYNE, W.A., WENDT, C.W., and LASCANO, R.J., 1990: Root zone water balances of three low-input millet fields in Niger, West Africa. *Agron. J.* 82:813-819.

PREVOT, L., 1985: Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux. Application à la télédétection. Validation sur un couvert de maïs. Thèse de Doctorat, Université de Paris 6, 178p.

RIOU, C., 1984: Le bilan énergétique. in: *Les bases de la bioclimatologie: 1 Bases physiques*, INRA Ed., Versailles, p 73-83.

RITCHIE, J.T., 1972: Model for predicting Evaporation a Row Crop with Incomplete Cover. *Water Ressources Research*, vol. 8, No. 5.

SAUGIER, B., and KATERJI, N., 1991: Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54 (1991) 263-277.

SIVAKUMAR, M.V.K., 1989: Considérations agro-climatiques pour la gestion des sols et de l'eau dans la zone Soudano-Sahélienne; In: Berrada A., Mahaman I. et Gandah M.: *Les actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau, et la fertilisation; Tahoua 20-24 février 1989.* p 85-96.

SIVAKUMAR, M.V.K., 1990: Exploiting rainy season potentiel from the onset of rains in the Sahelian zone of West Africa; *Agric. Forest meteorol.*, 51 (1990) 321-332.

SIVAKUMAR, M.V.K., MAIDOUKIA, A., STERN, R.D., 1993: Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest: Le Niger. Deuxième édition. *Bulletin d'information N°5.* Patancheru, A.P.502 324, Inde.

SHUTTLEWORTH, J.W. and WALLACE, J.S., 1985: Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quart. J. R. Met. Soc.* (1985), 111, pp. 839-855.

SHUTTLEWORTH, J.W. and GURNEY, R.J., 1990: The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*(1990), 116, pp. 497-519.

- SHUTTLEWORTH, J. W., 1976: A One-Dimensional Theoretical Description of the Vegetation-Atmosphere interaction. *Boundary-Layer Meteo.* 10, 273-302.
- STANTON, E.T. and THOMAS, V.H., 1972: The relation of net and solar radiation over bare sand surfaces. *arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B.* 20, 179-190.
- SQUIRE, G.R., 1979: The response of Stomata of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.) to Atmospheric Humidity. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 30, No 118, pp. 925-933.
- SIBAND, P., 1981: Croissance, nutrition et production du mil (*Pennisetum typhoides*, Hubbart et Stapf). Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. Thèse Université des Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 302 P.
- SIBAND, P., 1983: Essai d'analyse du fonctionnement du mil (*Pennisetum Typhoides*) en zone sahélienne. *Agronomie Tropicale XXXVIII-1.*
- SANTENS, P., 1982: Agriculture spéciale, fascicule 1 - Le mil, 45 P.
- SINCLAIR, T.R., ALLEN, Jr., L.H. and LEMON, E.R., 1975: An analysis of errors in the calculation of energy flux densities above vegetation by a bowen ratio profile method. *Boundary-Layer Meteorol.*, 8:129-139.
- TAJCHMAN, S.J., 1981: Comments on measuring turbulent exchange within and above forest canopy. *Bull. Ann. Meteorol. Soc.*, vol 62, No. 11, p 1550-1559.
- THOM, A.S., 1972: Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 98: 124-134.
- TROUFLEAU, D., 1991: Construction d'un modèle de fonctionnement du blé adapté à l'intégration de données de télédétection. Cas du couplage à un modèle de bilan d'énergie pour l'obtention d'une température de surface du couvert instantanée. Mémoire de D.A.A de l'INA de Paris-Grignon.
- VALET, S. et ALBERT, C., 1976: Etudes des relations eau-sol-plantes dans les conditions pedo-climatiques de Tillabery. saison sèche et saison des pluies 1974-75, 79 p.
- WALKER, G.K., 1983: Evaporation from wet soil surfaces beneath plant canopies. *J. Soil Sci.*, 63: 137-141.

WALLACE, J.S., ROBERTS, J.M., and SIVAKUMAR, M.V.K., 1990: The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices. *Agric. Forest Meteorol.*, 51 (1990) 35-49.

WALLACE, J.S., 1991: The measurement and modelling of evaporation from semiarid land Soil Water Balance in the Sahelian Zone; In: Sivakumar M.V.K, Wallace C., Renard C. et Giroux C., : Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone, Proc. Niamey Workshop, February 1991, IA HS Publ., no.199, pp. 131-147.

WALLACE, J.S., LLOYD, C.R. and SIVAKUMAR, M.V.K., 1993: Measurement of soil, plant and total evaporation from millet in Niger; *Agric. Forest meteorol.*, 63 (1993) 149-169.

WILLMOT, C.J., 1982: Some comments on the evaluation of model performance, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 63, 1309-1313.

Annexe 1

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1: Bilan radiatif au dessus d'une surface végétale (Monteny et Lhomme, 1980).

Figure 2: Relation entre la transpiration relative du mil (E_t/E_p) et son indice foliaire, d'après Wallace et al., 1993.

Figure 3: Evolution temporelle de l'évaporation journalière d'un sol sableux après une pluie (Wallace et al., 1993).

Figure 4: Variations diurnes de la transpiration du mil pour 3 journées de LAI différents, mais de conditions d'humidité de sol semblables (Wallace et al., 1993).

Figure 5: Variations diurnes de l'évaporation du sol intercalaire du mil pour 3 journées de LAI et de conditions d'humidité du sol différents (Wallace et al., 1993).

Figure 6: Comparaison des valeurs moyennes décadaires du coefficient cultural du mil déterminées suivant plusieurs expériences (Wallace et al., 1993).

Figure 7: Schéma du modèle résistif de Katerji et Perrier (1985).

Figure 8: Schéma du modèle de couvert épars de Shuttleworth et Wallace (1985).

Figure 9: Comparaison de plusieurs modèles de résistances de surface du sol, par Wallace (1991).

Figure 10: Schéma du modèle résistif à 2 couches de Lhomme et al. (1994).

Figure 11a: Localisation du site d'étude et pluviométrie annuelle moyenne (Sivakumar et al., 1993).

Figure 11b: Variabilité spatiale de la pluviométrie journalière (mm) dans la région de Banizoumbou (Lebel, communication personnelle).

Figure 12: Schéma du bassin versant de Sama Dey.

Figure 13a: Pluviométries journalières, Banizoumbou 1991.

Figure 13b: Pluviométries journalières, Banizoumbou 1992.

Figure 14: Moyennes mensuelles du rayonnement global journalier en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

Figure 15: Moyennes mensuelles des températures maximales et minimales de l'air en 1991 et 1992 à banizoumbou.

Figure 16: Moyennes mensuelles des humidités relatives maximales et minimales de l'air en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

Figure 17: Moyennes mensuelles des vitesses des vents maximales et minimales en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

Figure 18: Evolution de l'ETP (Penman 1948) en relation avec les précipitations mensuelles: Banizoumbou 1991 et 1992.

Figure 19: Evolution temporelle du nombre de tiges par poquet de mil en 1991 et 1992.

Figure 20: Evolution temporelle du nombre moyen de feuilles vertes par tige en 1992.

Figure 21: Croissance en hauteur de la partie aérienne et progression du front racinaire du mil, en 1991 et 1992 à Banizoumbou.

Figure 22: Evolution de la longueur moyenne de l'épi du mil en 1992.

Figure 23: Evolution dans le temps du poids de la matière sèche aérienne du mil en 1991 et 1992.

Figure 24: Croissance pondérale des différentes parties aériennes du mil (tiges, feuilles vertes, feuilles mortes et épis).

Figure 25: Evolution temporelle de la teneur en eau de la partie aérienne du mil.

Figure 26: Evolution au cours du cycle cultural de l'indice foliaire du mil: 1991 et 1992.

Figure 27: Evolution au cours du cycle cultural du pourcentage de recouvrement du sol par le mil: 1991 et 1992.

Figure 28: Croissance racinaire du mil: Evolution temporelle du poids de la matière sèche racinaire en 1991 et 1992.

Figure 29: Relevé des profils racinaires du mil par la méthode de la grille à mailles carrées de 5 centimètres (Banizoumbou, 1991).

Figure 30: Ajustements à des modèles logistiques des évolutions temporelles de la hauteur de la tige, la matière sèche aérienne et racinaire, et la profondeur des racines du mil.

Figure 31: Ajustement à une loi de GAUSS des évolutions temporelles du LAI, du degré de recouvrement, du nombre de tiges par poquet et du nombre de feuilles par tige, du mil.

Figure 32: Vitesse de croissance linéaire des tiges et racines de mil en 1992.

Figure 33: Vitesse de croissance pondérale des parties aérienne et racinaire du mil en 1992.

Figure 34: Relation entre la surface des feuilles vertes du mil et leur poids sec (Banizoumbou, 1991).

Figure 35: Variation au cours du cycle de la surface spécifique des feuilles de mil (1991 et 1992).

Figure 36: Relation entre le produit "longueur X largeur" d'une feuille de mil et sa surface.

Figure 37: Exemple de bilan radiatif au dessus d'une culture de mil au 71 ème jours après semis.

Figure 38: Régressions linéaires entre bilan de courtes longueurs d'ondes (1-a)Rg et bilan de grandes longueurs d'ondes (Ra-Rt) pour 3 différentes périodes du cycle du mil en 1992.

Figure 39: Comparaison entre (Ra-Rt) calculé à l'aide de la relation du tableau 12 (croissance végétative) et (Ra-Rt) mesuré en 1991.

Figure 40: Relation entre le rayonnement global et le rayonnement net d'une culture de mil en phase de croissance végétative (1992).

Figure 41: Evolution diurne de l'albédo du mil, comparaison avec l'albédo d'un sol nu sableux sec: Banizoumbou 1992.

Figure 42: Variation de l'albédo du mil en fonction du LAI.

Figure 43: Comparaison des valeurs de flux conductif à la surface du sol (G corrigé) à celles qui sont mesurées à 3 cm de profondeur dans ce sol (G mesuré) pour 4 journées en 1992.

Figure 44: Exemples d'évolutions diurnes des différents termes du bilan d'énergie du mil, en 1991.

Figure 45: Valeurs journalières de l'ETR du mil en 1991, comparaison avec l'ETP-Penman.

Figure 46: Valeurs journalières de l'ETR du mil en 1992, comparaison avec l'ETP-Penman.

Figure 47: Moyennes décadaires du rapport ETR/ETP (ETP-Penman) au cours du cycle du mil-1991.

Figure 48: Moyennes décadaires du rapport ETR/ETP (ETP-Penman) au cours du cycle du mil-1992.

Figure 49: Evolution de l'évaporation journalière d'un sol nu après une pluie: Banizoumbou, mil bas-fond 1992.

Figure 50: Exemples de mesures de résistance stomatiques équivalentes des 2 faces de la feuille de mil, en 1992.

Figure 51: Température de surface des feuilles de mil, comparaison avec celle de l'air au niveau de référence.

Figure 52: Profils diurnes et nocturnes de température dans le sol intercalaire du mil en 1992.

Figure 53: Résistance stomatique des feuilles de mil en fonction du rayonnement global.

Figure 54: Evolution de la largeur moyenne des feuilles de mil en fonction du LAI.

Figure 55: Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie (Pluie = 26 mm).

Figure 56: Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie (Pluie = 12 mm).

Figure 57: Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie (Pluie = 40 mm).

Figure 58: Evolution de la résistance de la couche sèche du sol en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie (Pluie = 26 mm, pluie = 12 mm, pluie = 40 mm).

Figure 59: Ajustement des coefficients d'atténuation de la vitesse du vent (n') et de la diffusivité turbulente (n) selon le LAI.

Figure 60: Organigramme du modèle.

Figure 61: Exemples d'évolution diurne des résistances aérodynamiques et de surface du couvert pendant une journée humide.

Figure 62: Exemples d'évolution diurne des résistances aérodynamiques et de surface du couvert pendant une journée sèche.

Figure 63: Exemple d'évolution diurne de la résistance de la couche sèche du sol pendant une journée humide.

Figure 64: Exemple d'évolution diurne de la résistance de la couche sèche du sol pendant une journée sèche.

Figure 65: Evolution au cours du cycle cultural du mil des résistances de surface du couvert: stomatique (r_{sc}) et de couche limite (r_{ac}).

Figure 66: Evolution au cours du cycle cultural du mil des résistances aérodynamiques au dessus (r_{aa}) et à l'intérieur de la culture (r_{as}).

Figure 67: Evolution de la résistance de la couche sèche du sol selon les épisodes pluvieux.

Figure 68: Comparaison des évolutions au cours du cycle du mil des valeurs moyennes journalières des résistances r_{sc} , r_{ac} , r_{aa} , et r_{as}

Figure 69: Comparaison des valeurs d'évapotranspiration totale du mil, mesurées et calculées à l'aide du modèle (LAI = 0).

Figure 70: Comparaison des valeurs d'évapotranspiration totale du mil, mesurées et calculées à l'aide du modèle (LAI = 1,2).

Figure 71: Comparaison des valeurs d'évapotranspiration totale du mil, mesurées et calculées à l'aide du modèle (LAI = 2,7).

Figure 72: Comparaison des valeurs d'évapotranspiration totale du mil, mesurées et calculées à l'aide du modèle, correspondantes à la période de sénescence.

Figure 73: Régression linéaire entre valeurs diurnes d'évapotranspiration totale mesurées et calculées par le modèle, pour la zone de LAI = 0.

Figure 74: Régression linéaire entre valeurs diurnes d'évapotranspiration totale mesurées et calculées par le modèle ($0,3 < LAI < 1,5$).

Figure 75: Régression linéaire entre valeurs diurnes d'évapotranspiration totale mesurées et calculées par le modèle ($1,5 < LAI < 2,8$).

Figure 76: Régression linéaire entre valeurs diurnes d'évapotranspiration totale mesurées et calculées par le modèle (période de sénescence).

Figure 77: Régression linéaire entre valeurs journalières de l'ETR mesurées et calculées sur l'ensemble du cycle cultural du mil-92.

Figure 78: Evolution au cours du cycle cultural des rapports Tr/ETR , Ev/ETR .

Figure 79: Evolution au cours du cycle cultural des rapports Tr/ETP et Ev/ETP .

Figure 80: Comparaison entre valeurs de LE mesurées et calculées à l'aide de la forme simplifiée du modèle (LAI = 0).

Figure 81: Comparaison entre valeurs de LE mesurées et calculées à l'aide de la forme simplifiée du modèle (LAI = 1,5).

Figure 82: Régression linéaire entre LE mesurée et LE calculée par la forme simplifiée du modèle.

Figure 83: Evolution au cours du cycle du mil 1992 du LAI et du stock d'eau dans les 50 premiers centimètres du sol.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Besoins en eau de 3 variétés de mil mesurés au Sénégal entre 1973 et 1977 par Dancette (1983).

Tableau 2: Besoins en eau de 3 variétés de mil mesurés par Valet et Albert (1976) à Tillabery (Niger).

Tableau 3: Bilans hydriques et efficacités d'utilisation de l'eau du mil suivant plusieurs expériences réalisées en zone sahélienne.

Tableau 4: Nature et position des capteurs sur les sites d'expérimentation.

Tableau 5: Durées de la période de tallage du mil obtenues sur 3 expériences.

Tableau 6: Caractéristiques de tallage du "mil bas-fond".

Tableau 7: Caractéristiques à la floraison et à la maturation du mil bas-fond.

Tableau 8: Date de floraison et de maturation de 2 variétés de mil, lors d'un essai en 1986 à l'ICRISAT.

Tableau 9: Ajustement à des lois mathématiques connues des évolutions temporelles des paramètres biologiques.

Tableau 10: Relations entre la surface des feuilles de mil et leur poids sec pour différentes variétés de mil.

Tableau 11: Relations entre la surface des feuilles de mil et leurs dimensions linéaires pour plusieurs variétés de mil.

Tableau 12: Relations linéaires entre bilans radiatifs horaires (W/m^2) de courtes longueurs d'ondes $(1-a)R_g$, et de grandes longueurs d'ondes $(R_a - R_t)$ suivant différents stades de développement du mil.

Tableau 13: Relation entre le rayonnement net et le rayonnement global selon les stades phénologiques du mil (Banizoumbou, 1992).

Tableau 14: Bilan radiatif hebdomadaire du mil en 1991 ($MJ/m^2/j$).

Tableau 15: Bilan radiatif hebdomadaire du mil en 1992 ($MJ/m^2/j$).

Tableau 16: Valeurs d'albédo du mil, comparaison avec celles d'autres surfaces.

Tableau 17: Bilan d'énergie du mil en 1991 ($MJ/m^2/j$).

Tableau 18: Bilan d'énergie du mil en 1992 ($MJ/m^2/j$).

Tableau 19: Bilan hydrique hebdomadaire du mil en 1991 (mm/semaine)

Tableau 20: Bilan hydrique hebdomadaire du mil en 1992 (mm/semaine)

Tableau 21: Comparaison de valeurs d'ETR et d'efficacité d'utilisation de l'eau par le mil en 1991 et 1992, avec celles d'autres expériences.

Tableau 22: Etude de la sensibilité du modèle pendant les journées humides.

Tableau 23: Etude de la sensibilité du modèle pendant les journées sèches.

Tableau 24: Résultats d'analyses statistiques sur la comparaison entre valeurs mesurées d'ETR et celles estimées à l'aide du modèle, pour 4 différentes périodes du cycle cultural du mil.

Tableau 25: Résultats d'analyse statistique sur la comparaison des cumuls journaliers d'ETR mesurés (mm/j) avec ceux estimés à partir du modèle.

Tableau 26: Comparaison des valeurs journalières d'ETR mesurées (ETR_{mes.}) à celles calculées, d'une part à l'aide du modèle (ETR_{est.}), et d'autre part en utilisant le coefficient cultural (C) proposé par Doorenbos et Pruit, (1977): $ETR = C \cdot ETP$ (campagnes 1991 et 1992).

Tableau 27: Exemples de bilans d'énergie journaliers pour 4 différentes périodes du cycle cultural du mil. Les densités de flux de chaleur provenant de la végétation et du sol, sont distingués.

Tableau 28: Données climatiques et caractéristiques phénologiques correspondantes aux journées du tableau 27.

Tableau 29: Poids des paramètres biologiques sur la détermination de l'évapotranspiration totale de la culture (ETR), la transpiration de la plante (T_r) et l'évaporation du sol (Evsol).

PROGRAMME DE CALCUL EN BASIC

```
' PROGRAMME D'ESTIMATION DE L'ETR DU MIL SUIVANT LE MODELE DE
' SHUTTLEWORTH et Wallace (1985).
```

```
REM liste des calculs effectués
```

```
' Calcul des résistances au tranfert des flux.
' Calcul de la demande climatique au dessus du couvert.
' Calcul de l'évapotranspiration totale de la culture.
' Calcul de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol.
' Calcul de la température de surface des feuilles et du sol.
```

```
CLS
```

```
REM Dimensionnement des variables
```

```
DIM J(200),Hr(200),er(200),Tr(200),Rn(200),G(200),U(200),Ts(200)
DIM Deltao(200),Rg(200),LE(200),LEs(200),LEc(200),LEm(200),ddo(200)
DIM V(200),Kh(200),raa(200),ras(200),rac(200),rb(200),rss(200),rsc(200)
DIM rst(200),Rns(200),Rnc(200),H(200),Hc(200),Hs(200),Hm(200),Tto(200)
DIM eo(200),ETP(200),Tf(200),Tss(200),rap(200), Delta(200)
```

```
REM Liste des constantes utilisées
```

```
Zr = 4      'Hauteur de référence
k = 0.4     'Constante de VON KARMAN
ZoP = 0.01  'longueur de rugosité d'un sol nu
Cd = 0.07   'Coefficient de traînée
ro = 1.2    'Masse volumique de l'air
Cp = 1000   'Chaleur spécifique de l'air
roCp = ro*Cp
gamma = 66  'Constante psychrométrique
kn = 0.41   'coefficient d'extinction du rayonnement net dans
            'le couvert
Pi = 4*atn(1) 'Pi
```

```
'Introduction de la date de semis du mil
```

```
'INPUT " Date de semis      ", Jsemis
Jsemis=182
```

```
'Introduction des numéros de jour à traiter
```

```
Locate 3,20
Input "Numero du jour de debut, de fin      ", jourDeb, jourFin
```

```
' lecture du fichier des pluies
```

```
open "pluie92" for input as 2
while not eof(2)
    input#2, noj, pluie(noj)
wend
close 2
```

```
' Ouverture du fichier de resultats
```

```
open "a:result12" for output as 3
```

```
for no=jourDeb to jourFin : print using"####    ####.#"; no, pluie(no) :_
```

```
    next no
```

```
delay 2
```

```
for no=jourDeb to jourFin
```

```
jour=no
```

```
nojour$=right$(str$(jour),3) : print "****";nojour$;"****"
```

```
JAS = jour-Jsemis
```

```
REM CALCUL DE DIVERS PARAMETRES BIOLOGIQUES *****
```

```
' Calcul de l'indice foliaire du mil: LAI
```

```
LAI =(0.769/(0.109*(2*pi)^0.5))*exp(-0.5*((log10(JAS)-1.827)/0.109)^2)
```

```
Print using"##.##"; LAI
```

```
' calcul du PAI: Panicle area index
```

```
if JAS>72 then PAI=0.11 else PAI=0.0
```

```

' Calcul de la largeur moyenne des feuilles de mil: w (en m)
w = (5.24/(1+1.33*exp(-1.67*LAI)))/100

' Calcul de la hauteur moyenne du couvert: htc (en m)
htc = (245/(1+990*Exp(-0.11*JAS)))/100
Print using"##.## "; htc

' Calcul du degré de recouvrement du sol par le couvert végétal: DR
DR=((17.733/(0.127*(2*pi)^0.5))*exp(-0.5*((log10(JAS)-1.857)/0.127)_
2))/100
Print using"##.## "; Dr

REM Paramètres de rugosité aérodynamique du couvert

' hauteur de déplacement du plan de référence aérodynamique
dp=1.1*htc*log(1+((cd*LAI)^(1/4)))
' longueur de rugosité du couvert
Zo=Zop+0.3*htc*((cd*LAI)^(1/2))
' coefficient d'atténuation de la diffusivité turbulente à
l'intérieur du couvert
n = 1.5*LAI^0.36
'coefficient d'atténuation de la vitesse du vent à l'intérieur
du couvert
np = 0.4*LAI^0.36

REM CALCUL DES FLUX HORAIRES #####

' reinitialisation de la valeur d'évaporation potentielle cumulée
if pluie(jour)>1 then ETcum = 0

REM lecture du fichier des valeurs horaires
LOCATE 5,20
FICH$="J"+nojour$+".prn"
OPEN "I", #1, FICH$
i=0
while not eof(1)
incr i
INPUT #1, J(i),Hr(i),er(i),Tr(i),Rn(i),G(i),U(i),Rg(i),Ts(i),Hm(i),_
LEM(i)
wend
close #1
CLS

for I=1 To 24
Jour=j(i)
Heure=Hr(i)
er=er(i)
Tr=Tr(i)
Rg=Rg(i)
G=G(i)
Rn=Rn(i)
Ts=Ts(i)
Vent=U(i)
Hm=Hm(i)
LEM=LEM(i)

REM Termes de transfert convectif
'Vitesse de frottement
V = (k*vent)/log((Zr-dp)/Zo)
'Diffusivité turbulente au dessus du couvert
Kh = k*V*(htc-dp)
'Résistance aérodynamique au dessus du couvert
rap = (1/(k*V))*Log((Zr-dp)/(htc-dp))+(htc/(n*Kh))*(exp_
(n*(1-(Zo+dp)/htc))-1)
'Résistance aérodynamique à l'intérieur du couvert
ras = (htc*exp(n)/(n*Kh))*(exp(-n*Zop/htc)-exp(-n*(Zo+dp)/htc))
'Vitesse du vent au sommet du couvert: uh

```

```

uh = (V/log((htc-dp)/Zo))/k
'Résistance de couche limite des feuilles
rb = (100/np)*((w/uh)^0.5)/(1-exp(-np/2))
'Résistance de couche limite du couvert
rac = rb/(2*LAI)

REM Calcul des rayonnements nets
Rns = Rn*exp(-kn*(LAI+PAI))      'Rayonnement net arrivant au sol
Rnc = Rn-Rns                    'Rayonnement net absorbé par la végétation

REM Calcul de la résistance stomatique des feuilles de mil et du
'couvert
rstMax=2000
rstmin=200
fRg=exp(-0.004*Rg)
rst=rstmin+(rstMax-rstmin)*fRg  'résistance stomatique équivalente
                                'de la face sup. et inf. de la feuille
rsc = rst/LAI                  'résistance de surface du couvert entier

REM Calcul de la demande climatique au dessus du couvert

'Pente de la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de T
delta = (FNPSAT(Tr+1))-(FNPSAT(Tr))
'Evapotranspiration potentielle Standard
ETo = (delta/(delta+gamma))*(Rn-G)
'Terme advectif de l'équation de PENMAN
Ea = (0.26/24)*(gamma/(delta+gamma))*(FNPSAT(Tr)-er)*(1+0.54*vent)
'ETP PENMAN
ETP = ETo+Ea
'Cumul horaire de l'ETP Penman (en W/m2)
ETcum = ETcum+ETP
'Conversion de l'ETP horaire cumulée en mm
ETPcum=ETcum*3600/2.4e6

REM Calcul de la résistance de la surface du sol
rssl = 80*exp(0.23*ETPcum)
rss = rssl/(1-Dr)

REM Calcul des flux de chaleur latente et sensible
Tto=Ts
do
Ttol=Tto

'Rayonnements nets
A = Rn-G
Aas = Rns-G

'dérivée par rapport à la température de la courbe de pression
'saturante suivant le modèle de SHUTTLEWORTH et al., 1985.
Deltao = (FNPSAT(Tr)-FNPSAT(Tto))/(Tr-Tto)

'Corrections de stabilité
IF (Tto-Tr)>0 THEN raa = rap/(((1+(5*9.8*(Zr-dp)*(Tto-Tr)/_
                                (Tr*(vent^2))))^(3/4))
ELSE IF (Tto-Tr)=0 THEN raa = rap
ELSE raa = rap/(((1+(5*9.8*(Zr-dp)*(Tto-Tr)/(Tr*(vent^2))))^2)

'Résistances équivalentes
Ra = (deltao+gamma)*raa
Rs = (deltao+gamma)*ras+gamma*rss
Rc = (deltao+gamma)*rac+gamma*rsc

'coefficients de SHUTTLEWORTH et al.
Cc = 1/(1+Rc*Ra/(Rs*(Rc+Ra)))
Cs = 1/(1+Rs*Ra/(Rc*(Rs+Ra)))

'déficit de saturation au niveau de référence
D = FnpSAT(Tr)-er

```

```

' Termes de Shuttleworth correspondant à l'équation de
' Penman-Monteith appliquée à un couvert fermé (PMc) et à au
' sol nu (PMs)
PMc = (deltao*A+(rocp*D-deltao*rac*Aas)/(raa+rac))_
      / (deltao+gamma*(1+rsc/(raa+rac)))
PMs = (deltao*A+(rocp*D-deltao*ras*(A-Aas))/(raa+ras))_
      / (deltao+gamma*(1+rss/(raa+ras)))

' Evapotranspiration globale
LE = Cc*PMc+Cs*PMs

'déficit de saturation à un niveau fictif du couvert: environ dp+Zo
Ddo = D+(deltao*A-(deltao+gamma)*LE)*raa/rocp

' Evaporation du sol intercalaire
LEs = (Deltao*Aas+roCp*Ddo/ras) / (deltao+gamma*(1+rss/ras))

' Transpiration de la végétation
LEc = (deltao*(A-Aas)+roCp*Ddo/rac) / (deltao+gamma*(1+rsc/rac))

' flux de chaleur sensible provenant du sol
Hs = Aas-LEs

' Flux de chaleur sensible provenant de la végétation
Hc = A - LE - Hs

' flux de chaleur sensible globale
H = Hc + Hs

' calcul de Tto
Tto=Tr+H*raa/rocp

' Température de la surface des feuilles du mil
Tf = Tr+(A-LE)*raa/rocp+(A-Aas-LEc)*rac/rocp
' Température de la surface du sol nu
Tss = Tto + Hs*ras/rocp

Loop until abs(Tto-Tto1)<0.01

REM visualisation des resultats
if i = 1 then
PRINT
PRINT " Jour   Heure      Rn      G      LEM      LE      LEC      LEs  "
PRINT "-----"
PRINT
end if
R1$=" ####   ####   #####   ####   ####   ####   ####   ####  "
PRINT USING R1$; Jour, Heure, Rn, G, LEM, LE, LEC, LEs

REM Sauvegarde des résultats de calcul dans un fichier
print#3, using"#####";jour, heure;
PRINT #3, using"#####.##";Rn, Rnc, Rns, G, LE, LEC, LEs, H,
Hc, Hs, tf, tss, rss, rsc, rst, rac, rb, ras, raa, Hm, LEM, ETP
Next i

print using "ETP Cumulee en mm   #####.##";ETPcum
delay 3
next no
close #3
END

```

```

DEF FNPSAT(T)= 611*(10^((7.5*T)/(237.3+T)))

```

ABSTRACT

Data collected on millet crop during the 1992 Hapex-Sahel experiment are used to valid the Shuttleworth-Wallace (1985) model for the whole growing season. The model inputs are meteorological data and crop biological characteristics. The outputs provide latent and sensible heat fluxes, as soil and vegetation surface temperatures. The study consists on parametrization of the main components of the model: evaluation of available radiation between plant and soil, millet leaf area index, panicle index and stomatal resistance. Soil surface resistance is parametrized as a function of cumulated potential evaporation.

From these formulation, total crop evaporation (soil evaporation + plant transpiration) is estimated and compared with the areal measured evaporation obtained by Bowen ratio-energy balance method for the whole growing season. Good agreement is found for hourly and daily evaporation, it increases for fully developed crop. Total soil evaporation of a sparse millet represents more than 50% of the field evaporation from seedling stage to a LAI stage of 1.5. For the whole growing season, it represents 40% of the total field evaporation.

RESUME

Des données bioclimatiques recueillies sur une culture de mil dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel 1992, ont été utilisées pour paramétrer les divers compartiments d'un modèle de couvert épars composé de deux niveaux d'échanges: la surface du sol et la végétation. Il s'agit du modèle de Shuttleworth et Wallace (1985). Les entrées du modèle sont les données météorologiques classiques et les caractéristiques biologiques de la culture. En sortie, le modèle fournit les flux de chaleur latente et sensible, ainsi que les températures de surface du sol et de la plante. La paramétrisation a porté d'une part, sur la répartition de l'énergie disponible entre la surface du sol et la végétation, et d'autre part, sur les principales résistances aux échanges des flux. Des mesures de rayonnement net au dessus de la culture, d'indice foliaire et d'indice de surface des panicules, ont été utilisées pour calculer le rayonnement net arrivant au sol, suivant la loi de Beer, avec un coefficient d'extinction égal à 0,41 (Wallace et al., 1990). La résistance de la couche sèche du sol qui représente le frein principal à l'évaporation du sol a été paramétrée en fonction de l'ETP cumulée depuis la dernière pluie. Des mesures de résistance stomatique à 3 niveaux verticaux sur la plante et des mesures simultanées de rayonnement global, ont servi à calculer les différents paramètres d'une fonction simple de prévision de la résistance stomatique moyenne de la culture. Quant aux résistances aérodynamiques, elles sont calculées suivant les formulations de Shuttleworth et Gurney (1990), à partir des mesures de la vitesse du vent au niveau de référence.

Le modèle ainsi développé et appliqué sur l'ensemble du cycle cultural du mil, permet une estimation horaire et journalière de l'ETR assez satisfaisante, avec la possibilité de calculer séparément la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. Les valeurs d'ETR estimées par le modèle concordent bien avec celles qui sont mesurées au dessus de la culture par la méthode du bilan d'énergie/rapport de Bowen. Cette concordance est encore meilleure pendant la phase de végétation maximale. L'analyse des sorties du modèle montre que l'évaporation du sol représente une fraction importante de l'ETR totale: Plus de 50% de l'ETR du début du cycle jusqu'au stade de LAI=1,5, et de l'ordre de 40% ETR sur l'ensemble du cycle cultural de la plante.

Mots clés: couvert épars, mil, bilan d'énergie, bilan hydrique, transpiration, évaporation du sol.