



HAL
open science

Transferts thermiques et hydriques dans le continuum sol-mulch vegetal-atmosphere: Modelisation et premiere validation experimentale

F. Bussière

► **To cite this version:**

F. Bussière. Transferts thermiques et hydriques dans le continuum sol-mulch vegetal-atmosphere: Modelisation et premiere validation experimentale. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut National Agronomique Paris Grignon, 1991. Français. NNT: . tel-02852301

HAL Id: tel-02852301

<https://hal.inrae.fr/tel-02852301>

Submitted on 7 Jun 2020

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

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

TH-IC6

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON

INSTITUT NATIONAL DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE
STATION AGROPEDOCLIMATIQUE
DE LA ZONE CARAIBE
UNITE DE BIOCLIMATOLOGIE

THESE

Présentée par François BUSSIÈRE

Ingénieur agronome ENSAM

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

Sujet : TRANSFERTS THERMIQUES ET HYDRIQUES
DANS LE CONTINUUM SOL-MULCH VEGETAL-ATMOSPHERE :
MODELISATION ET PREMIERE VALIDATION EXPERIMENTALE

Soutenu le 1er Octobre 1991 devant la commission d'examen :

Mrs. A. PERRIER	}	Président
M. GLASS		Rapporteurs
J. BRANSIER		
M. FUCHS		Examineurs
L. BRUCKLER		
P. CELLIER		
L. KABAT		

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué à la Station Agropédoclimatique de la zone Caraïbe de l'Institut National de la Recherche Agronomique, au Centre des Antilles-Guyane.

Je remercie Raymond Bonhomme, initiateur de cette étude, alors directeur de la station de m'y avoir accueilli.

Merci également à Pierre Cellier et à Hervé Sinoquet pour leur aide scientifique et amicale ainsi que pour leurs conseils lors de la rédaction de ce document.

Plutôt que d'établir un générique fastidieux et immanquablement maladroit, je préfère remercier ici simplement et sincèrement tous ceux qui ont apporté leur contribution à ce travail.

Enfin, je remercie vivement les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
I QUANTIFICATION DE L'INFLUENCE DES PAILLAGES NATURELS	2
I.1. Effets de l'application d'un mulch	2
I.1.1 Influence d'un mulch sur le rendement d'une culture	2
I.1.2 Effet d'un mulch sur la fertilité du sol	2
I.1.3 Modification du champ de température dans le sol	3
I.1.3.1 Effet dépressif en zone tempérée	3
I.1.3.2 Effet favorable en milieu tropical	3
I.1.3.3 Importance du mode de répartition du mulch	4
I.1.4 Modification de l'humidité du sol et de son évaporation	4
I.1.4.1 Evaporation du sol nu	4
I.1.4.2 Influence de l'incorporation du mulch	4
I.1.4.3 Importance du mode de répartition du mulch	5
I.1.4.4 Effet dépressif	5
I.1.5 Conclusion	5
I.2 Choix d'un modèle	5
I.2.1 Quel type de modèle pour quel usage ?	6
I.2.2 Les modèles existants	6
I.2.2.1 Modèles simplifiés	6
I.2.2.2 Modèles complets	7
I.2.3 Faiblesses et carences	8

II MODELISATION	9
II.1 Structure du modèle	9
II.1.1 Les différents compartiments	9
II.1.2 Conditions aux limites	10
II.1.2.1 Les échanges avec l'atmosphère	10
II.1.2.1.1 Bilan radiatif	10
II.1.2.1.2 Echanges turbulents avec l'atmosphère	11
II.1.2.2 Conditions à la limite inférieure du système	13
II.2 Transferts dans le mulch	13
II.2.1 Transfert d'énergie	13
II.2.1.1 Différents modes de transfert	13
II.2.1.2 Transferts radiatifs	14
II.2.1.2.1 Rayonnement solaire	14
II.2.1.2.2 Rayonnement infra-rouge thermique	16
II.2.1.3 Transferts convectifs	18
II.2.1.4 Transferts conductifs	18
II.2.1.5 Equation de conservation résultante	18
II.2.2 Transferts de masse	19
II.2.2.1 Différents modes de transfert	19
II.2.2.2 En phase liquide	19
II.2.2.3 En phase vapeur	20
II.2.2.4 Equation de conservation	20

II.2.3 Propriétés physiques et paramétrisation du mulch	20
II.2.3.1 Propriétés radiatives	20
II.2.3.1.1 Pour le rayonnement solaire	20
II.2.3.1.2 Pour le rayonnement infra-rouge thermique	21
II.2.3.2 Propriétés thermiques	21
II.2.3.2.1 Conductivité thermique	21
II.2.3.2.2 Capacité calorifique	21
II.2.3.3 Coefficients de diffusion	22
II.2.3.4 Propriétés hydriques	23
II.3 Transferts dans le sol	24
II.3.1 Transferts de masse	24
II.3.1.1 En phase liquide	24
II.3.1.2 En phase vapeur	25
II.3.1.3 Equation de conservation	25
II.3.2 Transferts de chaleur	25
II.3.2.1 Flux de chaleur conductif	26
II.3.2.2 Flux de chaleur latente	26
II.3.2.3 Equation de conservation résultante	26
II.3.3 Propriétés physiques caractéristiques du sol	26
II.3.3.1 Propriétés hydrauliques	26
II.3.3.1.1 Potentiel de l'eau dans le sol	26
II.3.3.1.2 Conductivité hydraulique	27
II.3.3.2 Propriétés diffusives	28
II.3.3.3 Propriétés thermiques	29
II.3.3.3.1 Capacité calorifique	29
II.3.3.3.2 Conductivité thermique	30

II.4	Résolution du système	30
II.4.1	Choix de la méthode de résolution	30
II.4.1.1	Résolution des équations de transfert	30
II.4.1.2	Résolution des équations d'équilibre	31
II.4.2	Discrétisation	31
II.4.2.1	Choix de discrétisation	31
II.4.2.1.1	Pour le sol	31
II.4.2.1.2	Pour le mulch	31
II.4.2.1.3	Pas de temps	31
II.4.2.2	Conditions initiales et aux limites	31
II.4.2.2.1	Limite supérieure	31
II.4.2.2.2	Limite inférieure	32
II.4.2.2.3	Conditions initiales	32
II.4.2.3	Calcul des coefficients	32
II.4.2.4	Equation de bilan en chaque noeud i	32
II.4.2.4.1	Bilan d'énergie	32
II.4.2.4.2	Bilan de masse dans le mulch	33
II.4.2.4.3	Bilan de masse du sol	34
II.4.3	Déroulement des calculs	34
III	MESURES PRELIMINAIRES ET VALIDATION DES SOUS-MODELES	36
III.1	Propriétés physiques des matériaux expérimentaux	36
III.1.1	Le mulch	36
III.1.1.1	Formation du mulch naturel	36
III.1.1.2	Quantification du mulch	36
III.1.1.3	Capacité de rétention en eau	36
III.1.1.4	Propriétés radiatives	37

III.1.2 Le sol	37
III.1.2.1 Description	37
III.1.2.2 Propriétés hydriques	37
III.1.2.2.1 Courbe de rétention	37
III.1.2.2.1.1 Matériel et méthode	38
III.1.2.2.1.2 Résultats	38
III.1.2.2.2 Conductivité hydraulique	39
III.1.2.2.2.1 Matériel et méthode	39
III.1.2.2.2.2 Résultats	39
III.2 Modèle d'interception de la pluie	39
III.2.1 Matériel et méthode	39
III.2.2 Résultats	40
III.3 Modèles d'interception du rayonnement	40
III.3.1 Validation du modèle pour le rayonnement solaire	40
III.3.1.1 Matériel et méthodes	40
III.3.1.2 Résultats	41
III.3.2 Simplification du modèle complet	41
III.3.3 Choix d'un modèle simplifié pour le rayonnement infra-rouge	41
IV VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE COMPLET	43
IV.1 Expérimentation	43
IV.1.1 Le site	43
IV.1.2 Mesures effectuées dans le sol	43
IV.1.2.1 Températures	43
IV.1.2.2 Humidité du sol	43

IV.1.3 Mesures dans l'air	44
IV.1.3.1 Mesures de rayonnement net	44
IV.1.3.2 Mesures de température de l'air	44
IV.1.3.3 Mesures d'humidité de l'air	44
IV.1.4 Mesures dans le mulch	44
IV.1.4.1 Mesures de température	44
IV.1.4.2 Mesures d'humidité	45
IV.1.5 Mesures communes	45
IV.1.5.1 Mesures météorologiques	45
IV.1.5.2 Acquisition des données	45
IV.1.5.3 Autres mesures utilisées	45
IV.2 Données utilisées pour la mise en oeuvre du modèle	45
IV.2.1 Mesures disponibles	45
IV.2.2 Paramètres du modèle	46
IV.2.2.1 Estimation de la conductivité thermique du sol	46
IV.2.2.2 Valeur des paramètres utilisés	47
IV.2.3 Variables de forçage	49
IV.2.3.1 Calcul des données manquantes	49
IV.2.3.2 Variables mesurées	50
IV.2.4 Sorties du modèle	50
IV.3 Etude de sensibilité du modèle	50
IV.3.1 Principe	
IV.3.2 Choix des paramètres	51
IV.3.3 Résultats	52
IV.3.4 Choix de la procédure de calage	52

IV.4 Calage du modèle	53
IV.4.1 Choix de la période de calage	53
IV.4.2 Compartiment sol	53
IV.4.2.1 Comparaison initiale	53
IV.4.2.1.1 Profil d'humidité	53
IV.4.2.1.2 Evolution des températures	54
IV.4.2.2 Calage de la conductivité thermique	54
IV.4.3 Calage du modèle complet	55
IV.4.3.1 Comparaison initiale	55
IV.4.3.1.1 Profil d'humidité	55
IV.4.3.1.2 Evolution des températures	55
IV.4.3.2 Calage des diffusivités dans le mulch	55
IV.5 Validation	56
IV.5.1 Choix de la période	56
IV.5.2 Sur sol nu	56
IV.5.2.1 Comparaison des profils d'humidité	56
IV.5.2.2 Comparaison des évolutions de température	57
IV.5.2.3 Comparaison des flux de chaleur latente	57
IV.5.3 Sur sol mulché	58
IV.6 Comparaison modèle–mesure	58
IV.6.1 Prévision de l'humidité du sol	58
IV.6.2 Prévision des températures dans le sol	59
IV.6.3 Prévision des flux de chaleur latente	59
IV.7 Conclusion	59
CONCLUSION	60
BIBLIOGRAPHIE	61
ANNEXES	
Annexe A1	I
Annexe A2	IX
Annexe A3	XIII
Annexe A4	XVI

INTRODUCTION

Les zones tropicales sont caractérisées par un fort rayonnement : plus de 15 MJ/m²/jour en moyenne sur l'année. Cet important apport énergétique engendre des contraintes thermiques et hydriques qui peuvent être préjudiciables à la production agricole de ces régions. Les températures élevées sont susceptibles d'affecter aussi bien les organes aériens des plantes que les parties les plus superficielles de leur système racinaire. De même, la forte demande évaporative causée par le rayonnement peut provoquer un stress hydrique chez les plantes. A plus long terme, à l'échelle d'un cycle cultural, on peut observer une diminution de la réserve hydrique du sol par évaporation en sol nu (lorsque la culture n'est pas couvrante).

Les agriculteurs de ces régions ont développé de façon empirique des techniques de culture particulières destinées à tamponner les effets climatiques les plus gênants pour leur production. Stigter (1987) présente une revue de ces techniques. Les plus courantes sont les brise-vent, les associations culturales et les paillages naturels, elles permettent toutes de modifier un ou plusieurs paramètres du microclimat de la culture. Les brise-vent réduisent la turbulence au-dessus du couvert végétal et limitent ainsi son évapotranspiration. Les associations de cultures de tailles différentes permettent sinon une meilleure exploitation des ressources hydriques et minérales, du moins un ombrage et une protection mécanique de la culture sous-jacente. Les paillages forment une strate isolante à la surface du sol et limitent son évaporation.

A la Guadeloupe, depuis l'introduction de nouvelles techniques de coupe de la canne à sucre, les résidus de récolte ne sont plus laissés dans les champs. La disparition de ce paillage naturel (essentiellement composé de feuilles de canne à sucre) coïncide avec une baisse de production de la culture (Pellerin, 1986). Les résidus de récolte protégeraient la surface du sol en limitant les pertes hydriques par évaporation, la culture n'étant pas couvrante pendant les 5 mois suivant la récolte. Cette hypothèse est à l'origine de l'intérêt que porte l'unité de Bioclimatologie de l'INRA de Guadeloupe à l'étude des paillages naturels. De façon plus générale, ce travail s'inscrit dans une thématique d'étude des "manipulations traditionnelles du microclimat".

Dans le texte, nous utiliserons l'anglicisme "mulch" pour désigner ce que l'on pourrait traduire au mieux par "paillis" dans la langue française, c'est-à-dire un couverture de débris végétaux séchés disposés à la surface du sol.

Une rapide revue de la littérature fait apparaître un certain nombre d'effets pour lesquels le mulch a été testé. Nous venons d'évoquer les effets thermiques et hydriques mais il a aussi été étudié pour ses rôles trophiques (apports de matière organique et de nutriments au sol) et hydrologiques (limitation de l'érosion, arrêt du ruissellement et amélioration des propriétés hydrodynamiques des couches de surface). Nous ne développerons pas ces derniers aspects et focaliserons notre étude sur les effets thermiques et hydriques.

Nous rappelons d'abord d'une manière qualitative les effets des mulchs sur des variables physiques (température, humidité) ou plus simplement sur la production globale d'une culture. Puis, des approches plus déterministes décrivant de manière de plus en plus précise les phénomènes élémentaires de transfert à travers le mulch sont présentées. A l'issue de cette première partie, apparaît la nécessité de modéliser les transferts qui existent dans une telle atmosphère.

La deuxième partie présente un modèle de transferts couplés de masse et de chaleur entre un sol recouvert de mulch et l'atmosphère.

Les parties suivantes exposent les résultats de nos expérimentations. Tout d'abord, un certain nombre de paramètres du modèle sont déterminés expérimentalement puis des modules sont validés à partir d'expérimentations spécifiques ayant fait l'objet d'une étude particulière (interception du rayonnement solaire et de la pluie). Enfin, nous présentons une première confrontation du modèle avec les données expérimentales. Après validation, le modèle doit pouvoir être utilisé dans des situations caractéristiques permettant de dégager les éventuels effets bénéfiques du mulch.

I QUANTIFICATION GROSSIERE DE L'INFLUENCE DES PAILLAGES NATURELS:

I.1 Effets de l'application d'un mulch

Depuis une trentaine d'années, des études ont permis d'estimer de façon empirique l'effet du mulch utilisé volontairement ou non dans certains itinéraires techniques traditionnels ou introduit plus récemment pour lutter contre l'érosion et améliorer la conservation des sols. La plupart mettent en relation la présence d'un mulch particulier et la récolte finale d'une culture. Un nombre plus réduit d'auteurs étudie l'effet d'un mulch sur un paramètre physique (température, humidité). Nous verrons successivement quel est l'effet d'un mulch sur le rendement d'une culture, sa nutrition minérale et enfin la modification de la température du sol et son humidité.

I.1.1 Influence d'un mulch sur le rendement de la culture

Le gain de production lié à la présence du mulch est parfois spectaculaire, ainsi on a noté une augmentation de rendement de 158 % dans une bananeraie au Nord-est du Brésil (Dultra Cintra et Borges, 1988). Le mulch, composé de feuilles de bananiers représente une biomasse importante (10 cm d'épaisseur) dont le maintien (compte tenu de la décomposition rapide de la matière organique dans ce milieu) nécessite un apport supplémentaire, la production de la parcelle n'étant pas suffisante. Ce sont des gains de rendement tout aussi intéressants qu'a obtenu Budelman (1989) : 2 t de tubercules d'ignames par tonne de mulch pour une production initiale de 15 t/ha. Le mulch utilisé est composé de feuilles d'arbres légumineux. D'après l'auteur, il s'agit principalement d'une amélioration de la nutrition minérale due à la décomposition du mulch mais son expérimentation ne lui permettait pas de faire la part entre les effets nutritionnels et purement physiques du mulch.

D'autres études démontrent qu'il y a une augmentation importante de rendement en présence de différents mulchs (sciure, feuilles de maïs, herbe sèche), alors que celui-ci n'améliore pas de façon significative la nutrition azotée (Aiyelaagbe et Fawusi, 1986). Les gains sont, d'après les auteurs, uniquement dus à une action thermique et hydrique.

La plupart des travaux ne se contentent toutefois pas de cette mesure globale de l'efficacité d'un mulch et traitent aussi de l'évolution d'un ou plusieurs paramètres (fertilité du sol, température, évaporation ou teneur en eau).

I.1.2 Effet d'un mulch sur la fertilité du sol

Il semble que l'utilité d'un mulch pour améliorer la nutrition minérale de la plante, par le simple apport de matière organique qu'il représente, dépende fortement des qualités initiales du sol. Ainsi, un suivi pendant 10 ans d'une monoculture de maïs a montré que le mulch n'a pas d'effet direct sur l'alimentation minérale des plantes, mais améliore la structure du sol (Ketchenson et Beauchamp, 1978). De même, Hulugalle et al. (1987), notent une amélioration de la nutrition minérale du manioc par le mulch, uniquement sur un sol initialement peu fertile. Ce dernier résultat est à rapprocher des mesures faites en régions sèches (zone méditerranéenne) par Kalburtzi et al. (1990). La paille de blé se décomposant mal, représente une fumure peu efficace et rend difficile la préparation du lit de semence. Dans ce cas, les auteurs pensent qu'un brûlage de la paille est préférable pour la fertilisation de la culture.

Par contre, Bacon (1990), qui a suivi 4 cycles successifs d'une culture de riz, montre que les résidus de la (ou des) récoltes précédentes ont un effet positif : ils ne représentent pas une source d'azote importante mais favorisent le développement de la microfaune du sol et provoquent, à plus long terme un enrichissement du sol en éléments minéraux.

Si la décomposition de la matière organique peut permettre un enrichissement du sol en azote, ce phénomène risque aussi de produire des lessivats. Un problème lié à la

décomposition de la matière organique, comme la restitution de l'azote est le risque de phytotoxicité pour la culture suivante des lessivats d'un mulch. Cet effet, noté par Kalburtzi et al. (1990), a été mis en évidence par Purvis et Jones (1990) : il a été montré que la paille d'une dizaine de cultivars de sorghos et de tournesols a un effet inhibiteur sur la germination du blé.

Pour les effets physiques du mulch qui nous intéressent, nous noterons simplement que l'apport nutritionnel qu'il représente est dépendant des conditions climatiques et pédologiques, et qu'un facteur à ne pas oublier lors d'un emploi éventuel est le risque de phytotoxicité pour la culture qu'il est censé protéger.

I.1.3 Modification du champ de températures dans le sol

Les résidus de récolte, laissés à la surface du sol, jouent un rôle d'isolant thermique. Ils provoquent un ombrage du sol et, diminuant la turbulence à la surface du sol, limitent les échanges avec l'atmosphère. On peut donc attendre un effet sur la température dans le sol : à une même profondeur, la température moyenne sera plus basse dans un sol mulché que dans un sol nu. Par exemple, en milieu tropical, un mulch d'herbes sèches (5 t/ha) provoque une diminution des maxima de température de 7 °C à 5 cm de profondeur (Adeoya, 1984). Les conséquences pour la production végétale de cette baisse de température dépendent, comme nous allons le voir, du contexte climatique.

I.1.3.1 Effet dépressif en zone tempérée

Dans les grandes plaines des Etats-Unis, afin de lutter contre l'érosion éolienne et de diminuer les coûts de production, les techniques de "travail minimum" voire de "non travail" du sol se sont beaucoup développées. Les conséquences malvenues de la présence permanente des chaumes sur les parcelles ont été une baisse de production. Par exemple, le mulch de feuilles de maïs favorise la persistance du manteau neigeux et ralentit le réchauffement printanier (Ketchenson et al., 1982). Aston et Fischer (1986) font la même analyse pour une culture de blé : la diminution des sommes de températures à 2 cm de profondeur provoquée par un mulch de 2 à 4 t/ha retarde la germination du blé.

I.1.3.2 Effet favorable en milieu tropical

Le problème inverse se pose en milieu tropical, où ce sont les températures parfois trop élevées du sol qui vont déclencher des inhibitions dans le développement des plantes. Par exemple, une température de 29 °C à 5 cm de profondeur dans le sol inhibe la tubérisation de la pomme de terre ; c'est un facteur limitant l'extension géographique de cette culture. Un mulch de paille de blé de 14 t/ha de matière sèche est nécessaire pour obtenir la réduction thermique nécessaire au Venezuela (Burgers et Nel, 1984). Des études plus détaillées montrent qu'un paramètre déterminant de l'efficacité du mulch est la valeur de son albédo et que celui-ci peut diminuer lorsque le mulch vieillit. Dans ce cas, le mulch perd de toutes façons de son efficacité globale par simple tassement (Midmore, 1986). Pour le maïs et le vigna, mieux adaptés, la température seuil est de 35 °C et Simpson et Gumbs (1986) préconisent un mulch de 10 cm d'épaisseur, pour éliminer ce problème pendant la petite saison humide au Guyana, résultats confirmés par Manrique (1988) au Panama.

I.1.3.3 Importance du mode de répartition du mulch

L'enfouissement du mulch à la surface du sol supprime tout effet thermique, (Wade et Sanchez, 1983). Par contre, il semble plus intéressant de juger des effets

d'une couverture partielle du sol, surtout pour une culture en rang. Lal (1978) a effectué une étude de ce type, comparant l'effet du mode de répartition d'une même quantité de mulch (4t/ha de paille de riz) sur les températures du sol. A l'échelle de la parcelle, un mulch disposé

sur le rang est moins efficace que celui réparti dans l'interrang où son effet complète celui dû à l'ombrage provoqué par la culture. Le mulch réparti en couverture totale reste cependant plus efficace.

I.1.4 Modification de l'humidité du sol et de son évaporation

Dans ce domaine, les références bibliographiques sont plus nombreuses. Il existe des études spécifiques, premières tentatives de description de l'influence des paramètres physiques du matériau sur le flux de vapeur d'eau venant du sol. Nous ne développerons donc pas les études restant très descriptives (Lal, 1978 ; Tumorhaiwe et Gumb, 1983 ; Midmore et al., 1986 ; Brun et al., 1986 ; Enz et al., 1978), pour ne présenter que celles qui représentent un premier pas vers la modélisation, même empirique, du phénomène.

I.1.4.1 Evaporation du sol nu

Ces travaux sont en général effectués en laboratoire, sur des colonnes de sol remaniées ou non, auxquelles on impose une contrainte climatique artificielle. Bond et Willis (1969) imposent une demande évaporative importante (10 mm/jour) à des colonnes de limon sableux surmontées de différentes épaisseurs de mulch de paille de riz. Ils observent classiquement deux phases dans l'évaporation du sol: une phase d'intensité constante où la disponibilité de l'eau à la surface du sol n'est pas limitante, puis une phase où l'intensité de l'évaporation, limitée par la quantité d'eau disponible à la surface du sol, décroît rapidement. L'épaisseur du mulch, réduisant l'évaporation journalière, influence la durée du premier stade qui passe de 5 à 25 jours pour un mulch de 0 à 6,7 t/ha, l'évaporation cumulée à la fin de ce stade restant identique. Avec une expérimentation similaire, Unger et Parker (1976) ont testé l'influence du type de mulch sur l'évaporation d'un sol soumis à trois contraintes différentes (6.6, 9.2, 12.9 mm/j). Plus le mulch est formé d'un matériau dense, plus son efficacité est grande : 8 t/ha de paille de blé auront le même effet que 16 t/ha de résidus de sorgho ou 32 t/ha de coton. Par contre, Steiner (1989) propose une relation empirique unique pour des paillages de différentes natures reliant la quantité de mulch à la limitation de l'évaporation.

I.1.4.2 Influence de l'incorporation du mulch

Comme lors de l'étude de l'effet thermique, le problème est de déterminer si le mulch est plus efficace laissé à la surface du sol ou incorporé à celui-ci. Al-Darby et al. (1989), ont montré en laboratoire que l'incorporation de paille de blé (de 0 à 10 t/ha) supprime tout effet de celle-ci sur l'évaporation. Par contre, les résultats obtenus avec le mulch placé en surface sont comparables à ceux de Bond et Willis (1969) : un mulch de 4 t/ha, permet une augmentation globale de la réserve en eau du sol de 70 et 30 % pour une demande climatique de 4.5 et 16 mm/j respectivement. La réduction de l'évaporation est reliée linéairement à la racine carrée de la biomasse de mulch.

Pour Wade et Sanchez (1983), l'enfouissement du mulch a un effet positif sur la conservation de l'humidité dans les 5 premiers centimètres de sol ; le mulch disposé à la surface reste cependant plus efficace.

I.1.4.3 Importance du mode de répartition du mulch :

Le plus souvent, les mulchs utilisés sont les résidus de la récolte précédente. Ils peuvent être laissés partiellement sur pied (chaumes) ou fauchés et recouvrent alors la totalité ou non de la surface du sol.

Le premier aspect a été abordé par Smika (1983) qui a montré que les chaumes dressés étaient plus efficaces que le mulch. Il faut signaler néanmoins que cet auteur montre que l'efficacité du mulch est, dans ce cas principalement liée au vent et non au rayonnement.

Dans les zones à fort rayonnement solaire, l'effet d'ombrage prend certainement plus d'importance.

Le mulch réparti en bandes améliore l'infiltrabilité de l'eau et limite l'évaporation, mais il reste plus efficace lorsqu'il est disposé en couverture totale (Opara-Nadi et Lal, 1987).

I.1.4.4 Effet dépressif

Ces comportements contradictoires en apparence, méritent d'être signalés même si ils ne sont présentés que comme de simples hypothèses. Lors de pluies peu importantes, le mulch risque d'intercepter la quasi-totalité des précipitations et empêcher la réalimentation du sol (Midmore et al., 1986 ; Brun et al., 1986). Inversement, pendant des périodes de fortes pluies (plus de 40 mm par semaine), le mulch, empêchant une évaporation rapide de l'eau excédentaire à la surface d'un sol très argileux, peut augmenter les risques d'anoxie racinaire des cultures (Simpson et Gumbs, 1986).

I.1.5 Conclusions

Les mulchs végétaux limitent de façon importante les transferts thermiques et hydriques entre le sol et l'atmosphère. Ces effets peuvent avoir chacun une action positive sur la production en milieu tropical où le fort rayonnement provoque un échauffement et une évaporation importants du sol nu (ou faiblement couvert par la végétation). La couverture totale du sol semble être le mode d'utilisation le plus efficace. Par ailleurs, biomasse et nature du mulch jouent tous les deux un rôle déterminant dans son efficacité. Nous nous étions volontairement restreints à l'échelle de la parcelle, mais le mulch a aussi un rôle important dans la répartition des eaux superficielles en limitant le ruissellement et l'érosion.

Compte tenu de la grande diversité des conditions expérimentales, plus ou moins bien contrôlées, les études que nous venons d'évoquer sont difficilement comparables entre elles. Si l'on se contente de ce type d'approche, il faut effectuer une expérimentation spécifique chaque fois que l'on change de situation climatique, de sol, de culture, ou de caractéristiques physiques du mulch employé. Devant la lourdeur et le champ d'application réduit de telles études, il est clair que seule une approche physique décrivant au mieux les phénomènes élémentaires de transfert est nécessaire.

I.2 Choix d'un modèle

I.2.1 Quel type de modèle, pour quel usage ?

Les effets les plus évidents des mulchs naturels sont les effets thermiques et hydriques. Nous allons nous intéresser aux transferts de chaleur et d'eau, non seulement parce qu'ils ont tous les deux une action propre sur le microclimat au voisinage de la surface du sol, mais aussi tout simplement parce qu'ils sont physiquement liés.

Nous laisserons d'emblée de côté les aspects nutritionnels des résidus de récoltes qui, même s'ils ne sont pas enfouis à l'origine, sont amenés à se décomposer et être incorporés au sol dont ils modifient la composition chimique et les propriétés physiques.

Il nous faut donc envisager une modélisation des transferts couplés de masse et de chaleur. Le modèle doit être capable de fournir, pour un contexte donné, un ordre de grandeur fiable des modifications engendrées par la présence d'un mulch sur le sol. Pour rester applicable dans de nombreuses situations (climat, sol et mulch pouvant varier indépendamment), il doit utiliser une paramétrisation simple de ces différents milieux. Les mesures à effectuer pour la mise en oeuvre d'un tel modèle doivent être, sinon classiques, du moins faciles à réaliser avec des moyens réduits. Ce sont ces conditions qui garantiront l'applicabilité d'un modèle, notamment en zone tropicale.

Le modèle doit effectuer une simulation correcte des transferts de masse et d'énergie à travers le mulch. Compte tenu de nos contraintes logistiques et de celles qui prévalent dans les zones d'application prospectées, il doit pouvoir être utilisé sur un matériel informatique courant (microordinateur). Toujours dans les mêmes conditions de moyens techniques réduits, la paramétrisation des différents milieux (mulch et sol) doit être simple et facilement reproductible. Enfin, le modèle doit être conçu pour pouvoir être dégradé en gardant une précision suffisante. Il doit rester utilisable dans des conditions où les données disponibles sont réduites (données météorologiques de routine, par exemple).

Nous allons maintenant voir dans quelle mesure les travaux déjà réalisés sur le sujet sont susceptibles de nous intéresser et de répondre à ces exigences.

I.2.2 Modèles existants

Le terme mulch ne désigne pas seulement des éléments végétaux disposés à la surface du sol mais aussi, pour des sols de faible conductivité hydraulique, une couche de sol sec ne participant plus à l'évaporation mais assurant les transferts d'eau sous forme de vapeur. Bien que ces deux mulchs aient des caractéristiques physiques très différentes, nous rappellerons quelques travaux sur ce dernier thème, les premiers modèles incluant des mulchs végétaux en étant directement issus.

Perrier (1970) a modélisé l'influence d'un mulch de sol sec sur l'évaporation d'un sol nu. Dans ce mulch (créé naturellement ou par un travail du sol adapté), les transferts radiatifs sont négligeables. Hillel et al. (1975) utilisent un formalisme identique avec un mulch composé de graviers. Plus récemment, les transferts à l'intérieur du mulch ont été envisagés, ce sont ces approches que nous allons développer un peu plus longuement.

I.2.2.1 Modèles simplifiés

Ces modèles abordent les transferts de masse et de chaleur dans un système sol – mulch végétal en conservant pour le mulch les hypothèses précédentes :

- Le mulch est entièrement opaque
- Le mulch ne stocke pas d'eau

Dans ce cas, la prise en compte du mulch dans les transferts consiste simplement à ajouter une résistance supplémentaire aux transferts de masse et d'énergie à la surface du sol.

Van Bavel et Hillel (1975) ont fait une analyse théorique des transferts dans un système sol-mulch. Le bilan radiatif est donc effectué à la surface du mulch ; par contre l'évaporation se produit à l'interface sol-mulch. Le modèle effectue une comparaison sol nu – sol mulché, et utilise les travaux de Hillel et al. (1975) pour la dynamique hydrique dans un sol mulché. Les simulations sont réalisées à partir d'un jeu de données météorologiques "standards" pour un sol uniformément humide au départ. Le modèle montre (pour un mulch sec de 5 cm d'épaisseur) une décroissance de l'évaporation par rapport à celle d'un sol nu, responsable selon les auteurs, d'une élévation des températures maximales et moyennes à la surface du sol (interface sol – mulch).

Ces travaux représentent une première approche, il n'y a malheureusement pas de confrontation du modèle à des résultats expérimentaux même partiels.

Chung et Horton (1987) utilisent les mêmes hypothèses dans un modèle bidimensionnel permettant la prise en compte d'une couverture partielle du sol par le mulch (en bandes). Les transferts dans le mulch sont traités comme l'avaient fait Hillel et al. (1975). Une série de simulations a été réalisée pour les trois grands types de sol (argiles, limons et sables) et pour différents taux de couverture par le mulch (0, 50, 80 et 100% de la surface totale). Les simulations font apparaître un rayonnement net plus faible sur mulch que sur sol

nu (principalement dû à une différence d'albédo). Le mulch réduit les amplitudes et la valeur moyenne des températures et humidité du sol. Quelques informations intéressantes sont apportées par la modélisation bidimensionnelle par rapport aux modèles monodimensionnels classiques:

- La couverture partielle de mulch provoque des flux latéraux thermiques et hydriques importants près de la surface du sol.
- Les transferts redeviennent monodimensionnels dans ce cas à partir de 40 cm de profondeur.

Cette approche, intégrant une hétérogénéité spatiale structurée du mulch, est intéressante car, comme nous l'avons vu dans la partie bibliographique, l'utilisation du mulch en bandes est une pratique courante. Cependant, comme dans le cas des travaux évoqués précédemment, il manque une validation du modèle par confrontation à des données expérimentales.

I.2.2.2 Modèles complets

Ross et al. (1985a, 1985b) et Bristow et al. (1986) proposent une approche détaillée des transferts de chaleur et de vapeur à l'intérieur d'un système sol-mulch végétal-atmosphère. Ross et al. (1985a) modélisent, à partir de travaux concernant les couverts végétaux, les transferts radiatifs à l'intérieur du mulch. Le bilan d'énergie à la surface de celui-ci est établi en l'absence de vent, c'est à dire en prenant en compte simplement la convection libre. La comparaison est effectuée avec des données expérimentales obtenues en conditions naturelles, c'est à dire avec du vent. Cette différence entre hypothèse du modèle et conditions expérimentales explique que les températures du sol calculées sont généralement plus fortes que celles mesurées.

Dans le deuxième article, les auteurs introduisent les échanges turbulents avec l'atmosphère et proposent alors un véritable modèle de transferts couplés. La démarche et le formalisme sont tout à fait similaires dans les travaux de Bristow et al. (1986) qui traitent en plus l'interception de la pluie par le mulch.

Nous qualifions ce modèle de "complet" car il prend en compte les transferts de masse sous forme liquide et sous forme de vapeur d'eau dans le sol, ainsi que les transferts de chaleur par conduction et par convection (transport de chaleur latente dûs aux transferts d'eau en phase vapeur). Le mulch est traité comme un milieu fortement poreux composé de matériel végétal permettant des transferts radiatifs. D'autre part, il a la possibilité de stocker ou de restituer une certaine quantité d'eau et intercepte une partie des pluies incidentes. Il utilise une modélisation des échanges au-dessus des couverts végétaux pour traiter les transferts turbulents avec l'atmosphère. Par contre, le modèle est créé pour des mulchs de structure assez

compacte et les transferts turbulents à l'intérieur du couvert lui-même utilisent des résultats établis pour des pelages d'animaux.

Ces deux modèles ne comprennent toutefois pas de validations expérimentales, seules des simulations nous donnent quelques informations et les ordres de grandeur de certains phénomènes.

Le modèle de Bristow et al. (1986), appliqué à un paillis de 1 cm d'épaisseur présente des résultats parfois surprenants. Ainsi, pour une journée à fort rayonnement solaire, la température du sol sous le résidu est supérieure à celle de la surface du mulch. D'après les auteurs, ceci est dû à la réduction des pertes de chaleur sensible au niveau du sol, plus abrité que la surface. Les résultats concernant le réchauffement du sol sous un mulch par rapport à un sol nu vont dans le sens des observations déjà effectuées (réchauffement plus lent sous le mulch). Un autre résultat inattendu concerne l'évaporation pour les périodes à déficits hydriques marqués (Pluie - ETP < 0) : le sol couvert de résidus perd plus d'eau par évaporation que le sol nu.

Le modèle de Ross et al. (1985), a été employé dans des simulations utilisant une journée standard pendant six jours consécutifs. Les conditions sont celles d'une région tropicale "semi-aride". Principalement à cause de son effet d'ombrage, le mulch réduit beaucoup les variations de température du sol. L'effet sur les teneurs en eau (réduction de l'évaporation du sol de 15 % en 6 jours) est moins spectaculaire.

Flerchinger et Saxton (1989) modifient le modèle de Bristow et al. (1986), pour y inclure la possibilité de gel de l'eau dans le sol et le mulch. Ce modèle est destiné à évaluer les modifications apportées par un mulch sur la profondeur du front de gel dans le sol et la persistance du manteau neigeux en surface. Il a fait l'objet d'une validation expérimentale après un calage portant sur les coefficients de réflexion du sol et du mulch et le pourcentage de sol recouvert par la neige. Le modèle donne une bonne simulation des températures du sol dans des gammes de variation de faible amplitude.

I.2.3 Faiblesses et carences

Il existe donc dans la littérature quelques approches théoriques des transferts de masse et d'énergie dans le mulch. Souvent, ces travaux utilisent des résultats antérieurs sur les transferts dans les couverts végétaux : interception de la pluie, coefficients de diffusion. L'établissement de ces lois ne fait pas l'objet d'études spécifiques. Le plus important reproche que l'on puisse faire à ces travaux reste bien entendu, l'absence de validation expérimentale.

La modélisation de Bristow et al. (1986) est la plus complète. Elle semble intéressante pour nos besoins puisqu'elle permet, à partir de paramètres physiques simples, de simuler les transferts d'eau et de chaleur dans le système sol-mulch-atmosphère. Toutefois, le mulch considéré est peu épais et de structure assez fine. Dans l'étude des mulchs tels qu'ils existent en milieu tropical, nous pourrions être amenés à travailler sur des matériaux beaucoup plus grossiers (feuilles de canne à sucre, de bananier) et plus épais. L'interception de la pluie réclame aussi une attention particulière en milieu tropical humide : les pluies y sont abondantes et présentent une grande variabilité d'intensité. Un modèle fiable d'interception de la pluie doit prendre en compte cette variabilité et la structure particulière du mulch (plus dense et planophile qu'un couvert végétal).

II MODELISATION

II.1 Structure du modèle

II.1.1 Les différents compartiments

Le système que nous étudions est composé de trois milieux différents : l'atmosphère, le mulch et le sol. Nous nous intéressons aux transferts de masse et d'énergie à l'échelle de la parcelle c'est-à-dire sur une surface de quelques dizaines de mètres de côté présentant une certaine homogénéité horizontale. Les interfaces entre les différents milieux sont tous des plans horizontaux bien définis (pas de passage progressif du mulch au sol, par exemple). La limite supérieure du système est située à l'interface mulch-atmosphère, c'est à ce niveau que vont se faire les échanges de chaleur et d'eau sous différentes formes. La limite inférieure se situe à une certaine profondeur dans le sol, où les variables d'état peuvent être considérées comme constantes.

De même, nous ne tiendrons pas compte de modifications éventuelles des caractéristiques physiques de ces matériaux au cours du temps. De telles études sont nécessaires si l'on veut par exemple quantifier l'effet d'un paillage à l'échelle d'un cycle cultural. Les phénomènes mis en jeu se produisant à des pas de temps plus longs (quelques mois) l'expérimentation nécessaire pourra être menée ultérieurement.

Bien que le mulch et le sol soient des milieux de composition et de structure très différentes, ils présentent certaines caractéristiques communes. Ce sont des milieux poreux constitués d'une matrice solide et d'un mélange de fluides (eau+solutés, air). Ils sont d'une façon générale le siège de transferts de masse d'eau en différentes phases, gazeuse, liquide ou solide et de transferts d'énergie. Afin de modéliser les transferts couplés de masse et d'énergie dans ce milieu complexe, nous allons faire un certain nombre d'hypothèses.

- H1 – Mulch et sol sont indéformables et homogènes dans un plan horizontal de quelques dizaines de mètres carrés (parcelle)
- H2 – L'eau se trouve uniquement sous forme liquide ou gazeuse (pas de gel)
- H3 – L'eau liquide est de l'eau pure, on ne tient pas compte de la modification éventuelle de ses propriétés physiques due à la présence de solutés
- H4 – La pression totale de la phase gazeuse est constante et égale à la pression atmosphérique

Les variables d'état permettant de décrire le système sont:

- Pour les transferts de masse : la pression (ψ , potentiel, P_v , pression de vapeur d'eau dans l'air)
- Pour les transferts d'énergie : la température T

Notations (l'ensemble des symboles est rappelé en annexe A4) :

Dans ce qui va suivre, les conventions de notation suivantes seront utilisées :

J	: potentiel de l'eau dans le sol
P_v	: pression partielle de vapeur d'eau
C	: capacité
K	: conductivité
D	: diffusivité
ρ	: masse volumique
z	: variable d'espace (coordonnée verticale positive vers le bas)

Indices :

u	: pour le mulch
s	: pour le sol
m	: masse totale
l	: en phase liquide
v	: en phase vapeur
T	: dépendant de T
ψ	: dépendant de ψ
p	: dépendant de P_v

L'hypothèse d'homogénéité dans un plan horizontal, nous permet de considérer que les transferts sont monodimensionnels verticaux.

II.1.2 Conditions aux limites :

II.1.2.1 Les échanges avec l'atmosphère :

II.1.2.1.1 bilan radiatif :

Le mulch à la surface du sol reçoit le rayonnement solaire, c'est la source d'énergie qui va conditionner en grande partie les transferts thermiques et consécutivement les transferts de masse. Du fait des propriétés radiatives des feuilles sèches constituant le mulch, les rayonnements visibles et proches de l'infra-rouge d'une part (rayonnement solaire) et le rayonnement infra-rouge de grande longueur d'onde d'autre part (rayonnement infra-rouge thermique) vont être absorbés de façon différente à l'intérieur du mulch. Il convient donc de distinguer ces différentes composantes dans le bilan radiatif à la surface (Monteith, 1973).

$$RN = RG + RA - RE_{clo} - RE_{glo} \quad (1)$$

RN : rayonnement net.

RG : rayonnement global, rayonnement d'origine solaire arrivant au sol. On distingue généralement le rayonnement direct qui est directionnel, et le rayonnement diffus, issu de la rediffusion par l'atmosphère d'une partie du rayonnement direct (vapeur d'eau, poussières). Nous verrons plus loin pourquoi il n'est pas nécessaire, dans notre cas, de distinguer ces deux composantes.

RA : rayonnement atmosphérique, rayonnement de grande longueur d'onde émis par l'ensemble des constituants de l'atmosphère. Des formules empiriques existent pour le calculer à partir de la température de l'air et de l'humidité de l'air à l'échelle journalière (Brunt, 1932 ; Swinbank, 1953 ; Brutsaert, 1975) ; ces formules

doivent être ajustées localement. Pour travailler à des pas de temps plus fins, nous nous contenterons de l'estimer à partir d'autres mesures de rayonnement.

- RE_{clo} : rayonnement de courte longueur d'onde issu du mulch
(rayonnement rediffusé)
RE_{glo} : rayonnement de grande longueur d'onde issu du mulch
(rayonnement émis, éventuellement rediffusé)

II.1.2.1.2 Echanges turbulents avec l'atmosphère

Le mulch forme une surface rugueuse modifiant l'écoulement de l'air dans la couche limite atmosphérique. La tapis végétal va échanger de la quantité de mouvement, de la chaleur et de la vapeur d'eau avec la masse d'air sus-jacente. Considérant la couche limite de surface engendrée par le mulch comme homogène horizontalement et stationnaire, les flux y sont conservatifs:

$$\partial\Gamma/\partial z = 0 \quad \partial H/\partial z = 0 \quad \partial E_v/\partial z = 0 \quad (2)$$

- Γ : densité de flux de quantité de mouvement
 H : densité flux de chaleur sensible
 E_v : densité flux de vapeur d'eau

La fermeture de ces équations au premier ordre, supposant les flux proportionnels aux gradients dans la couche limite atmosphérique, nous donne les classiques profils logarithmiques en l'absence de gradient thermique vertical (Thom 1972) :

$$u = u_* / k \ln\{ (z-d)/z_m \} \quad (3)$$

$$H = (T_o - T) \rho_a c_p k u_* / \ln\{ (z-d)/z_h \} \quad (4)$$

$$E_v = (\rho_{vo} - \rho_v) k u_* / \ln\{ (z-d)/z_v \} \quad (5)$$

- u_* : vitesse de frottement (m/s)
 k : constante de Von Karman (= 0,4)
 z_m, z_h, z_v : hauteurs de rugosité pour les différents flux
(constantes d'intégration) (m)
 ρ_a : masse volumique de l'air (kg/m³)
 c_p : capacité calorifique de l'air (J/kg/°C)
 H : densité de flux de chaleur sensible (W/m²)
 E : densité de flux de vapeur d'eau (kg/m²/s)
 T : température moyenne de l'air au niveau z (°C)
 T_o : température de la surface (°C)
 ρ_v : masse volumique de la vapeur d'eau en z (kg/m³)
 ρ_{vo} : masse volumique de la vapeur d'eau en surface (kg/m³)
 d : hauteur de déplacement (m)

La vitesse du vent, la température et la masse volumique de vapeur d'eau sont les variables d'état respectivement associées aux flux de quantité de mouvement, de chaleur sensible et de vapeur d'eau (évaporation-condensation).

d , la hauteur de déplacement représente un plan virtuel, où se font les échanges. Pour la plupart des couverts végétaux, les valeurs de d varient entre les 2/3 et les 4/5 de la hauteur

réelle de la culture. Les valeurs de ce coefficient dépendent de la structure et de la densité du couvert. Nous utiliserons une relation valable pour la plupart des cultures de forte densité :

$$d = 0,77 \text{ epm} \quad (\text{Monteith, 1973}) \quad (6)$$

epm : épaisseur du mulch (m)

De même, nous prendrons des valeurs classiques de la hauteur de rugosité au-dessus des cultures (Monteith, 1973 ; Campbell, 1977) :

$$z_m = 0,13 \text{ epm} \quad (7)$$

et

$$z_h = z_v = 0,2 z_m \quad (8)$$

D'autre part, les transferts par convection libre (lorsque le gradient thermique vertical est positif), résultant de la stratification thermique de l'atmosphère au voisinage de la surface peuvent jouer un rôle important dans les échanges (convection mixte). Dans le cas général où ces effets ne peuvent plus être négligés, l'intégration des équations de conservation est possible en introduisant les fonctions ψ_m , ψ_h et ψ_v . Les profils deviennent alors :

$$u = u_* / k [\ln\{ (z-d)/z_m \} + \psi_m] \quad (9)$$

$$H = (T_o - T) \rho_a c_p k u_* / [\ln\{ (z-d)/z_h \} + \psi_h] \quad (10)$$

$$E_v = (\rho_{vo} - \rho_v) k u_* / [\ln\{ (z-d)/z_h \} + \psi_v] \quad (11)$$

Afin de déterminer les valeurs attribuées aux fonctions ψ_m , ψ_h et ψ_v , il faut connaître le degré de stabilité de l'atmosphère, c'est-à-dire l'importance de l'éventuelle stratification thermique.

Le paramètre de stabilité utilisé est défini à partir de la longueur de Monin-Obukhov (Monteith, 1973), déduite de considérations dimensionnelles ; il dépend du rapport entre l'énergie produite par convection libre et sa dissipation mécanique par la turbulence :

$$\xi = z/L = - \frac{k z g H}{\rho_a c_p T u_*^3} \quad (12)$$

L	: longueur de Monin-Obukhov	(m)
g	: accélération de la pesanteur	(9,81 m/s ²)
T	: température au niveau z	(K)

Le signe de ce rapport détermine l'éventuelle instabilité de l'atmosphère due à une stratification thermique, les fonctions de correction prennent alors pour valeurs les expressions suivantes (Paulson, 1970) :

⊕ Régime instable : $\xi \leq 0$

$$\psi_m = 2 \operatorname{Ln}\{(1+x)/2\} + \operatorname{Ln}\{(1+x^2)/2\} - 2 \operatorname{Arctg} x + \pi/2 \quad (13)$$

$$\psi_m = \psi_v = 2 \operatorname{Ln}\{(1+x^2)/2\} \quad (14)$$

$$\text{avec } x = (1 - 16\xi)^{1/4} \quad (15)$$

⊕ Régime stable : $0 < \xi < 1$ (Webb, 1970)

$$\psi_m = \psi_h = \psi_v = -5\xi \quad (16)$$

⊕ Régime très stable : $1 \leq \xi$

$$\psi_m = \psi_h = \psi_v = -5(1 + \operatorname{Ln}\xi) \quad (17)$$

II.1.2.2 Conditions à la limite inférieure du système

La limite inférieure du système se situe à une profondeur suffisante dans le sol où les conditions suivantes sont satisfaites : pour les transferts d'énergie, une température constante, pour les transferts de masse, un flux nul ou constant, suivant les conditions de sol rencontrées.

II.2 TRANSFERTS DANS LE MULCH

Les mulchs végétaux naturels représentent un système complexe, plus dense qu'un couvert végétal mais beaucoup plus poreux que le sol (au moins lorsqu'ils n'ont pas fait l'objet de préparation particulière). La matrice est composée des parties aériennes d'un couvert végétal, réparties de façon aléatoire. Les propriétés physiques de celles-ci seront donc celles de végétaux "morts".

La décomposition de la matière organique est beaucoup plus rapide en milieu tropical que dans les régions tempérées. Toutefois, cette évolution susceptible de modifier les propriétés physiques du matériau est lente par rapport au pas de temps auquel nous étudions les échanges, elle ne sera donc pas prise en compte (comme nous l'avons mentionné en II.1.1).

II.2.1 Transferts d'énergie

II.2.1.1 Différents modes de transfert

L'énergie radiative incidente (rayonnement solaire et rayonnement infra-rouge thermique) va, au cours de sa progression dans le mulch, être absorbée, rediffusée ou émise, suivant les cas. Nous aurons donc à tous niveaux dans le mulch, des gains ou des pertes d'énergie par transfert radiatif qui seront considérés comme des fonctions de production dans les équations de conservation de l'énergie. Les autres modes de transferts de la chaleur sont la convection et les transferts de type conductif (diffusion

moléculaire dans l'air et conduction dans le solide). Nous traiterons successivement de ces différents transferts.

II.2.1.2 Transferts radiatifs

II.2.1.2.1 Rayonnement solaire

Il existe dans la littérature de nombreux modèles de transferts radiatifs dans une culture (revus par Myneni et al., 1989). Si l'on assimile la couverture de mulch à un couvert végétal, nous pouvons utiliser un modèle de ce type pour simuler la pénétration du rayonnement jusqu'au sol. Il est alors nécessaire de connaître la répartition de la surface foliaire dans l'espace (surface et angle des feuilles) et les propriétés optiques des éléments de feuillage pour la gamme de longueurs d'ondes considérée.

Le modèle utilisé est celui développé par Bonhomme et Varlet-Grancher (1977). Ce modèle applique à un couvert végétal les lois de Kubelka et Munk qui modélisent la pénétration du rayonnement dans un milieu diffusant. Il permet d'avoir une expression analytique des flux descendants et ascendants à n'importe quel niveau à l'intérieur du couvert connaissant l'épaisseur de feuillage traversée.

Par rapport aux hypothèses applicables aux couverts végétaux, la structure particulière du mulch nous amène à prendre en compte deux phénomènes :

- Les éléments du mulch sont disposés horizontalement sur le sol. Donc les rayonnements solaire direct et diffus vont subir les mêmes lois d'extinction. D'autre part, les éléments de feuillage sont répartis de façon aléatoire.

- Pour les feuilles sèches, le coefficient de réflexion R est différent du coefficient de transmission τ alors que ceux-ci sont généralement considérés comme égaux pour les feuilles vertes.

En utilisant des notations similaires à celles de Bonhomme et Varlet-Grancher, à l'issue de calculs présentés en annexe A1, nous obtenons les résultats suivants :

Soient:

F	: indice foliaire total du mulch (surface de feuilles ramenée à la surface de sol)	(m ² /m ²)
epm	: épaisseur du mulch	(m)
ρ	: facteur de réflexion des éléments de feuillage	
τ	: facteur de transmission des éléments de feuillage	
ρ_0	: facteur de réflexion du sol nu	
f	: indice foliaire cumulé au niveau z (pour le mulch réparti uniformément, $f = z F/epm$)	
D(f)	: rayonnement descendant arrivant au niveau f	(W/m ²)
A(f)	: rayonnement ascendant arrivant au niveau f	(W/m ²)

Avec la constante :

$$\alpha = \sqrt{(1-\tau)^2 - \rho^2} \quad (18)$$

Au niveau f, on peut calculer,

Le rayonnement descendant reçu :

$$D(f) = C1 \exp\{+af\} + C2 \exp\{-af\} \quad (19)$$

Le rayonnement ascendant reçu :

$$A(f) = C3 \exp\{+\alpha f\} + C4 \exp\{-\alpha f\} \quad (20)$$

Ces deux expressions nous permettent de calculer le rayonnement absorbé de courte longueur d'onde (CLO) par une couche de mulch comprise entre $f1$ et $f2$ ($f2 > f1$) :

$$CLO = D(f1) - A(f1) - [D(f2) - A(f2)] \quad (21)$$

$$CLO = (C1 - C3)(\exp\{+\alpha f1\} - \exp\{+\alpha f2\}) + (C2 - C4)(\exp\{-\alpha f1\} - \exp\{-\alpha f2\}) \quad (22)$$

Les expressions des constantes $C1$, $C2$, $C3$, $C4$ en fonction des propriétés radiatives du sol et du mulch se trouvent en annexe A1.

Expression simplifiée :

Afin d'alléger les calculs au niveau du modèle complet, nous allons essayer de valider un modèle simplifié analogue à ceux utilisés pour calculer la pénétration du rayonnement à l'intérieur de couverts végétaux (Ross, 1975 ; Wu, 1990). Nous utiliserons une loi exponentielle décroissante pour simuler de façon simplifiée une diminution du bilan radiatif à l'intérieur du mulch.

Nous posons, pour une couche de mulch comprise entre $z1$ et $z2$, niveaux pour lesquels les indices foliaires cumulés sont respectivement $f1$ et $f2$,

$$D(f2) - A(f2) = (D(f1) - A(f1)) \exp\{ -K_e f \} \quad (23)$$

f : $f2 - f1$ indice foliaire de la couche
 K_e : coefficient d'extinction apparent pour le rayonnement global

On en déduit que le rayonnement absorbé par cette épaisseur f de mulch est :

$$CLO = [D(f1) - A(f1)] (1 - \exp\{ -K_e f \}) \quad (24)$$

En particulier, si $f1 = 0$ (surface du mulch),

$$D(0) - A(0) = RG - REclo = (1 - albm) RG \quad (25)$$

et

$$CLO = (1 - albm) RG (1 - \exp\{-K_e f\}) \quad (26)$$

$albm$: albédo du mulch
 RG : rayonnement global (W/m²)

Le coefficient K_e est ajusté à partir du modèle complet de transferts radiatifs de courte longueur d'onde.

II.2.1.2.2 Rayonnement infra-rouge thermique

Le même modèle de transferts radiatifs a été utilisé. Les notations, identiques à celles du paragraphe précédent, sont assorties d'une apostrophe (') lorsqu'il y a risque de confusion. Les calculs sont aussi développés en annexe A1. Dans ce domaine de longueur d'onde, il nous faut tenir compte des rayonnements émis par le sol et le mulch.

Nous poserons donc :

$$E(f) = \epsilon_f \sigma T_f^4 : \text{rayonnement émis par le mulch au niveau } f \quad (\text{W/m}^2) \quad (27)$$

$$E_s = \epsilon_s \sigma T_s^4 : \text{rayonnement émis par le sol} \quad (\text{W/m}^2) \quad (28)$$

$$\beta = 1 - \tau - \rho \quad (29)$$

avec

ϵ_f	: émissivité des feuilles
ϵ_s	: émissivité du sol
σ	: constante de Stephan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)
T_f	: température des feuilles au niveau f
T_s	: température du sol

Le rayonnement descendant reçu au niveau f :

$$D'(f) = C1' \exp\{+\alpha'f\} + C2' \exp\{-\alpha'f\} + \beta' \text{Re}(f) / \alpha'^2 \quad (30)$$

Le rayonnement ascendant reçu au niveau f :

$$A'(f) = C3' \exp\{+\alpha'f\} + C4' \exp\{-\alpha'f\} + \beta' \text{Re}(f) / \alpha'^2 \quad (31)$$

Comme pour le rayonnement solaire, le terme que nous voulons calculer pour les transferts d'énergie est la quantité de rayonnement absorbé par une couche de mulch (GLO).

$$\text{GLO} = D'(f1) - A'(f1) + (-D'(f2) + A'(f2)) \quad (32)$$

Afin de ne pas alourdir les calculs du modèle complet, nous avons cherché à établir une expression simplifiée. Les calculs sont développés en annexe A1 ; nous nous contenterons ici de rappeler les hypothèses que nous avons envisagées et les expressions obtenues.

⊕ Modèle complet :

$$\begin{aligned} \text{GLO} &= (C1' - C3')(\exp\{\alpha'f1\} - \exp\{\alpha'f2\}) + (C2' - C4')(\exp\{-\alpha'f1\} - \exp\{-\alpha'f2\}) \\ &+ \beta' \text{Re}(f1) / \alpha'^2 - \beta' \text{Re}(f2) / \alpha'^2 \end{aligned} \quad (33)$$

⊕ Hypothèse 1 : Rediffusions négligeables (cf Annexe A1)

La couche de mulch comprise entre f_1 et f_2 est considérée comme un milieu absorbant de température homogène T . On montre que les rayonnements émis entre f_1 et f_2 et sortants à ces niveaux sont tous deux égaux à :

$$\text{Re} (1 - \exp\{-(f_2 - f_1)\}) \quad (34)$$

Les rayonnements descendants et ascendants traversant le mulch vont subir tous les deux une extinction exponentielle :

$$D'(f_2) = D'(f_1) \exp\{-(f_2 - f_1)\} \quad (35)$$

$$A'(f_1) = A'(f_2) \exp\{-(f_2 - f_1)\} \quad (36)$$

Le bilan des flux entrants et sortants donne :

$$\begin{aligned} \text{GLO} &= D'(f_1) - A'(f_2) \exp\{-(f_2 - f_1)\} + A'(f_2) - D'(f_1) \exp\{-(f_2 - f_1)\} \\ &\quad - 2 \text{Re}(1 - \exp\{-(f_2 - f_1)\}) \end{aligned} \quad (37)$$

$$\text{GLO} = [D'(f_1) + A'(f_2) - 2 \text{Re}] (1 - \exp\{-(f_2 - f_1)\}) \quad (38)$$

⊕ Hypothèse 2 : Le mulch se comporte comme une feuille

$$\text{GLO} = D'(f_1) + A'(f_2) - 2 \text{Re} \quad (39)$$

⊕ Hypothèse 3 : Les feuilles sont des corps noirs ($\epsilon_f = 1$)

Applicable aux deux modèles précédents, elle nous permet d'écrire :

$$\text{Re} = \sigma T^4 \quad (40)$$

II.2.1.3 Transferts convectifs

Le mulch présente une porosité importante (plus de 80 %) et des espaces vides de forte section. Cette structure permet l'établissement de phénomènes de convection libre ou forcée, par pénétration du vent dans le mulch. Les transferts pouvant s'effectuer sous forme de chaleur sensible (suivant les gradients de température) et de chaleur latente (suivant les gradients de densité de vapeur d'eau), le flux de chaleur convective s'écrit alors :

$$J_{ucco} = -D_{uc} \rho_a c_p \frac{\partial T}{\partial z} - L_v D_{uv} \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \quad (41)$$

z	: coordonnée suivant un axe vertical	(m)
ρ_v	: masse volumique de la vapeur d'eau	(kg/m ³)
c_p	: chaleur massique de l'air	(J/kg/K)
J_{ucco}	: flux de chaleur convectif dans le mulch	(W/m ²)
D_{uc}	: diffusivité turbulente de la chaleur	(m ² /s)
D_{uv}	: diffusivité turbulente de la vapeur d'eau	(m ² /s)
L_v	: chaleur latente de vaporisation de l'eau	(J/kg)

II.2.1.4 Transferts conductifs

Compte tenu de la faible conductivité thermique du matériel végétal, les études concernant les couverts végétaux ou les mulchs (Bristow et al., 1986) négligent en général ce terme. Les seuls transferts énergétiques pris en compte sont alors, outre les éventuels transferts radiatifs, la diffusion moléculaire et la convection.

Cependant, si l'on considère qu'un tassement du mulch (notamment près de la surface du sol) peut être associé à une forte teneur en eau, il peut y avoir des transferts de chaleur purement conductifs. La loi de Fourier nous donne :

$$J_{uc} = \lambda_u \frac{\partial T}{\partial z} \quad (42)$$

J_{uc}	: flux de chaleur conductif dans le mulch	(W/m ²)
λ_u	: conductivité thermique du mulch	(W/m/K)

II.2.1.5 Equation de conservation résultante

L'équation de conservation de l'énergie à l'intérieur du mulch est posée, conformément à l'hypothèse que nous avons faite, pour les seuls transferts verticaux.

$$C_{uc} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [-L_v D_{uv} \frac{\partial \rho_v}{\partial z} + (\lambda_u + \rho_a c_p D_{uc}) \frac{\partial T}{\partial z}] + GLO + CLO \quad (43)$$

C_{uc}	: capacité calorifique du mulch	(J/m ² /K)
GLO	: terme source (absorption du rayonnement thermique)	(W/m ²)
CLO	: terme source (absorption du rayonnement solaire)	(W/m ²)

II.2.2 Transferts de masse

Nous allons maintenant aborder les transferts d'eau à travers le mulch, dont certains (transferts de vapeur) sont liés aux transferts énergétiques.

II.2.2.1 Différents modes de transferts

Nous devons envisager les transferts d'eau sous forme liquide ou gazeuse. Nous verrons tout d'abord comment traiter les transferts d'eau liquide dans ce milieu puis le formalisme utilisé pour les transferts de vapeur traité précédemment (II.2.1.3) sera repris.

II.2.2.2 En phase liquide

La taille minimale des interstices entre les débris végétaux constituant le mulch est de quelques millimètres. Cette constatation nous permet de formuler l'hypothèse suivante :

H5 – Il n'y a pas de développement de tension capillaire dans le mulch.

L'influence du potentiel osmotique est aussi négligée. Dans ces conditions, les seuls mouvements d'eau susceptibles de se produire sont dus à la gravité terrestre. La pénétration directe de la pluie dans les trous du mulch, comme l'écoulement le long des feuilles des précipitations interceptées doivent être envisagés.

L'interception de la pluie a été principalement étudiée en milieu forestier, le couvert végétal jouant un rôle important dans la récupération et la redistribution des précipitations en hydrologie (Calheiros de Miranda et Butler, 1986; Crockford et Richardson, 1990). Quelques modèles existent pour quantifier l'interception de cultures herbacées (Butler et Huband, 1985). Par contre, le rôle des végétaux morts dont la structure est la plus proche de celle du mulch, est plutôt abordé sous l'aspect de réservoir (Pitman, 1989).

Les modèles sont généralement empiriques, exprimant la quantité d'eau percolée en fonction de la pluie incidente et de la capacité de stockage du couvert (Couturier et Ripley, 1973 ; Thompson, 1981 ; Smith, 1985). Ils ne tiennent généralement pas compte de l'intensité de la pluie (volume par unité de temps). Certains paramètres, comme l'énergie cinétique des gouttes de pluie jouent certainement un rôle important dans la quantité d'eau interceptée mais difficilement accessibles à la mesure, ils ne sont pas intégrés dans les modèles.

Jiagan (1988) propose un modèle théorique d'interception de la pluie par un couvert forestier malheureusement sans validation expérimentale.

Nous utiliserons finalement le modèle de Rutter et al. (1971) qui tient compte de l'intensité de la pluie et a déjà été validé expérimentalement. Il modélise les variations de quantité d'eau stockée par le couvert (i.e. le mulch) de la façon suivante:

$$- dQ/dt = K \exp\{C_d Q\} - P \quad (44)$$

avec :

Q : quantité d'eau stockée (mm)
 P : intensité de la pluie (mm/s)
 K, C_d : coefficients ajustés

Les coefficients K et C_d dépendent bien entendu des caractéristiques du mulch : surface foliaire, densité, capacité de rétention individuelle des éléments de feuillage. En

l'absence de relation établie entre ces différents paramètres, ceux-ci sont ajustés à partir d'observations effectuées alors que la pluie a cessé et que le drainage continue. Nous avons alors :

$$- dQ/dt = K \exp\{C_d Q\} \quad (45)$$

II.2.2.3 En phase vapeur

Comme nous l'avons vu pour les transferts thermiques, la diffusion de la vapeur à l'intérieur du mulch peut mettre en jeu deux mécanismes : la diffusion moléculaire et la diffusion turbulente. Leurs importances respectives dépendent de la densité du paillis et des conditions météorologiques à la surface (vitesse du vent). Ces deux mécanismes peuvent être exprimés par un même formalisme de type "loi de Fick".

$$\vec{J}_{uv} = - D_{uv} \vec{\nabla} \rho_v \quad (46)$$

D_{uv} : diffusivité de la vapeur d'eau dans le mulch (m²/s)
 ρ_v : masse volumique de la vapeur d'eau (kg/m³)

Le paramètre D_{uv} exprime pour le moment une diffusivité moléculaire ou turbulente, le choix en sera fait ultérieurement.

II.2.2.4 Equation de conservation

En cas de pluie, l'interception de celle-ci est traitée à part, compte tenu du caractère erratique du phénomène.

$$C_{um} \partial \rho_v / \partial t = - D_{uv} \partial \rho_v / \partial z \quad (47)$$

C_{um} : capacité "hydrique" du mulch (par analogie avec la capacité hydrique du sol)

II.2.3 Propriétés physiques et paramétrisation du mulch

Nous avons introduit dans les équations de conservation de la chaleur et de la masse d'eau un certain nombre de paramètres caractéristiques du mulch que nous allons maintenant expliciter.

II.2.3.1 Propriétés radiatives

II.2.3.1.1 Pour le rayonnement solaire

Les coefficients de réflexion R et de transmission τ pour le rayonnement solaire peuvent être obtenus dans la bibliographie (Tanner et Chen, 1990) ou expérimentalement à partir de mesures spectrophotométriques.

Le coefficient de réflexion du sol, dans cette même gamme de longueurs d'ondes est généralement dépendant de l'humidité à la surface du sol. Une détermination expérimentale

est nécessaire, pour chaque type de sol utilisé, par une mesure simultanée des rayonnements incidents, réfléchis et de l'humidité de surface.

II.2.3.1.2 Pour le rayonnement infra-rouge thermique

Une détermination expérimentale de l'émissivité est possible, par comparaison des rayonnements émis par le matériau testé et un corps noir maintenu à la même température. Les valeurs couramment obtenues pour les sols et les végétaux sont comprises entre 0.94 et 1 (Fuchs et Tanner, 1966). Les valeurs des coefficients de réflexion et de transmission doivent satisfaire la relation $\epsilon + \tau' + R' = 1$. Des travaux récents (Chen et Tanner, 1990) proposent pour la première fois une mesure de la transmittance de tels matériaux.

II.2.3.2 Propriétés thermiques

II.2.3.2.1 Conductivité thermique

Il existe peu d'études concernant les propriétés thermiques de ce type de matériau (Pennypacker et al., 1975). Nous utiliserons une fonction issue du modèle théorique de De Vries (1963), vérifié expérimentalement par Riha et al. (1980) qui donne une relation linéaire entre conductivité thermique et teneur en eau pondérale pour une litière forestière :

$$\lambda_u = A_u \theta_u + B_u \quad = (48)$$

λ_u : conductivité thermique du mulch (W/m/K)
 θ_u : teneur en eau du mulch (kg/kg)
 A_u, B_u : coefficients empiriques (normalement dépendants de caractéristiques physiques du matériau)

II.2.3.2.2 Capacité calorifique

Le modèle de de Vries (1963) est utilisé. La capacité calorifique du milieu est égale à la somme des capacités calorifiques de chacun des composants pondérées par leurs volume respectifs.

$$C_{uc} = \sum_i x_i C_{c_i} \quad (49)$$

x_i : teneur volumique en constituant i (volume de i / volume total)
 C_{c_i} : capacité calorifique volumique du constituant i

Pour le mulch, les principaux constituants sont l'eau (e), l'air (a) et la matière végétale (m):

$$C_{uc} = C_{c_m} x_m + C_{c_e} x_e + C_{c_a} x_a \quad (50)$$

Tableau II.1 : Propriétés thermiques des composants du sol (d'après de Vries 1963).

Constituants	Chaleur massique (J/g/K)	Capacité calorifique (10 ⁶ J/m ³ /K)	Conductivité thermique (W/m/K)
Quartz	0,8	2,13	8,8
Argiles	0,9	2,39	2,92
Mat. organ.	1,92	2,5	0,25
Eau	4,18	4,18	0,57
Air	1,01	0,0012	0,025

Les valeurs des Cc_i sont rappelées dans le tableau II.1 (Campbell, 1985). La capacité calorifique volumique de l'air est négligeable devant celle de la matière organique et de l'eau.

$$C_{uc} = Cc_m \rho_u / \rho_m + Cc_e \theta_u \rho_u / \rho_e \quad (51)$$

ρ_u	: masse volumique du mulch	(kg/m ³)
ρ_m	: masse volumique de la matière organique	(kg/m ³)
ρ_e	: masse volumique de l'eau	(kg/m ³)
θ_u	: humidité pondérale du mulch	(kg/kg)

II.2.3.3 Coefficients de diffusion

L'estimation des coefficients D_{uc} et D_{uv} peut être faite à partir de relations expérimentales exprimant ces diffusivités en fonction de la vitesse du vent et de la diffusivité dans l'air libre. Une relation de ce type est utilisée par Bristow et al. (1986) ou déterminée expérimentalement par Tanner et Shen (1990) pour des mulchs composés de résidus végétaux broyés. Ces relations sont de la forme :

$$D_{ux} = D_{ax} (1 + C u) \quad (52)$$

$x = v, c$: pour la vapeur d'eau, pour la chaleur
D_{ux}	: diffusivité du mulch pour x
D_{ax}	: diffusivité dans l'air de x
C	: coefficient expérimental
u	: vitesse du vent à un niveau de référence

Rappelons que les D_{ax} sont calculés à partir des coefficient s de diffusion dans l'air à 0°C, D_{ox} (l'influence de la pression étant généralement considérée comme négligeable) par la relation (Monteith, 1973) :

$$D_{ax} = D_{ox} (1 + 0,007 T_c) \quad (53)$$

T_c	: température	(°C)
-------	---------------	------

Une autre possibilité, utilisée dans des modèles de séchage du foin (Thompson, 1981) est de se servir des relations employées pour modéliser les échanges à l'intérieur des couverts végétaux (Businger, 1975 ; Legg et Monteith, 1975), en supposant une atténuation exponentielle du vent à l'intérieur du mulch :

$$D_{ux}(z) = D_{ux}(epm) \exp\{X ((z/epm)-1)\} \quad (54)$$

epm	: épaisseur du mulch	(m)
z	: niveau dans le mulch ($z < epm$)	(m)
$D_{ux}(z)$: coefficient de diffusion au niveau z	(m ² /s)
X	: coefficient expérimental	

La structure des mulchs sur lesquels nous voulons travailler est plus proche de celle d'un couvert végétal bas que de celle de résidus de récolte finement broyés. Par conséquent, nous préférons cette dernière relation.

II.2.3.4 Propriétés hydriques

Les équations de conservation sont exprimées à partir de la masse volumique de la vapeur d'eau (ρ_v), mais la variable d'état que nous utilisons pour les transferts de masse est la pression partielle de vapeur d'eau (P_v). La vapeur d'eau étant assimilée à un gaz parfait, nous avons la relation :

$$P_v = \rho_v / M_v R T \quad (55)$$

P_v	: pression partielle de vapeur d'eau	(Pa)
ρ_v	: masse volumique de la vapeur d'eau	(kg/m ³)
M_v	: masse molaire de la vapeur d'eau	(kg/mol)
R	: constante des gaz parfaits	(J/mol/K)
T	: température	(K)

Il faut maintenant relier la teneur en eau du mulch (i.e du paillage) à cette pression partielle de vapeur d'eau.

⊕ Tout d'abord, nous supposons les éléments de feuillage qui constituent le mulch en équilibre hydrique avec l'air qui les entoure. D'après la loi de Kelvin, le potentiel de l'eau dans le mulch est relié à la densité de la vapeur d'eau :

$$\rho_v = \rho_{vs} \exp \{ g \psi_u M_v / RT \} \quad (56)$$

ρ_{vs}	: masse volumique de la vapeur d'eau à saturation	(kg/m ³)
g	: accélération de la pesanteur	(m/s ²)
ψ_u	: potentiel de l'eau dans le mulch	(J/kg)

On peut écrire (définition de l'humidité relative) :

$$Hr = \frac{P_v}{P_{vs}} = \exp \{ g \psi_u M_v / RT \} \quad (57)$$

P_{vs}	: Pression de vapeur saturante	(Pa)
----------	--------------------------------	------

⊕ On doit introduire une relation empirique pour relier la teneur en eau du mulch (θ_u) au potentiel (ψ_u). Myrold et al. (1981) ont travaillé sur de la paille de blé afin d'établir une relation expérimentale entre le potentiel et l'humidité pondérale :

$$\psi_u = a_u \{ \theta_u \}^{-b_u} \quad (58)$$

θ_u	: teneur en eau pondérale
a_u, b_u	: coefficients expérimentaux

De façon similaire, Bristow et al. (1986), Thompson (1981), Tanner et Shen (1990b) emploient directement des relations entre l'humidité relative et la teneur en eau pondérale pour du matériel végétal. Ces relations sont toutes empiriques et déterminées pour un matériel

végétal particulier, elles donnent toutefois des résultats comparables. Nous utiliserons la relation décrite par Bristow et al. (1986) :

$$\theta_u = 0.064 (\bar{Hr}^{-0.51} - 1)^{-0.42} \quad (59)$$

II.3 TRANSFERTS DANS LE SOL

Par rapport aux hypothèses introduites en II.2, nous ajouterons une hypothèse classique pour les études des transferts dans les sols (Brunet, 1984 ; Campbell 1985)

H6 – Les transferts de chaleur sous forme radiative sont négligeables

La modélisation adoptée est celle proposée par Campbell (1985), utilisée par Bristow et al. (1986). Nous envisagerons d'abord les transferts de masse puis les transferts de chaleur et enfin nous verrons comment paramétrer les propriétés physiques du sol.

II.3.1 Transferts de masse

Les transferts de masse d'eau peuvent s'effectuer sous forme liquide ou sous forme vapeur. *A priori*, on peut décomposer chacun de ces flux en une composante due au gradient de température et une due au gradient de potentiel (Jackson et al., 1974; Brunet, 1984).

$$J_{sm} = J_{sh\psi} + J_{slT} + J_{sv\psi} + J_{svT} \quad (60)$$

(Les notations sont explicitées en II.1.1).

II.3.1.1 En phase liquide

Le flux d'eau sous l'effet des gradients de potentiel est exprimé par la loi de Darcy. On néglige le potentiel osmotique pour ne conserver que la composante matricielle (engendrée principalement par les forces de capillarité) et la composante gravitaire.

$$\vec{J}_{sh\psi} = -K_{sl} (\nabla\psi - g\nabla z) \quad (61)$$

$J_{sh\psi}$: flux d'eau liquide dû au gradient de potentiel (kg/m²/s)
 K_{sl} : conductivité hydraulique (kg s / m³)

Nous négligerons le flux d'eau liquide sous l'influence des gradients de température.

Finalement :

$$J_{sl} = J_{sh\psi} \quad (62)$$

II.3.1.2 Flux en phase vapeur

La diffusion d'un gaz s'exprime par la loi de Fick adaptée au milieu poreux (loi de Stephan).

$$\vec{J}_{sv} = - D_{sv} \vec{\nabla} \rho_v \quad (63)$$

J_{sv} : densité de flux de vapeur dans le sol (kg/m²/s)
 D_{sv} : diffusivité de la vapeur dans le sol. (m²/s)

que l'on peut décomposer immédiatement en :

$$\vec{J}_{sv} = - (D_{sv\psi} \vec{\nabla} \psi + D_{svT} \vec{\nabla} T) \quad (64)$$

$D_{sv\psi} = D_{sv} \partial \rho_v / \partial \psi$: diffusivité de la vapeur due au gradient de potentiel
 $D_{svT} = D_{sv} \partial \rho_v / \partial T$: diffusivité de la vapeur due au gradient de température

II.3.1.3 Equation de conservation

Si l'on définit, de façon classique, la "capacité hydraulique" du sol en posant :

$$C_{sm} = \partial \theta / \partial \psi \quad (65)$$

L'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$C_{sm} \partial \psi / \partial t = \partial / \partial z [(K_{sl\psi} + D_{sv\psi}) \partial \psi / \partial z + D_{svT} \partial T / \partial z - K_{sl\psi}] \quad (66)$$

θ : humidité volumique du sol

II.3.2 Transferts de chaleur

Nous allons tout d'abord traiter du flux de chaleur conductif puis des flux de chaleur latente ayant pour origine les transferts de vapeur d'eau dans le sol. Les transferts de chaleur convectifs liés aux flux d'eau liquide sont négligés.

II.3.2.1 Flux de chaleur conductif

Le flux de chaleur par conduction, dépendant du gradient de température est déterminé par la loi de Fourier.

$$\vec{J}_{sc} = \lambda_s \vec{\nabla T} \quad (67)$$

J_{sc} : flux de chaleur conductif (W/m²)
 λ_s : conductivité thermique du sol (W/m/K)

II.3.2.2 Flux de chaleur latente

La migration de la vapeur d'eau dans le milieu entraîne un transfert de chaleur sous forme de chaleur latente :

$$\vec{J}_{sco} = -L_v [D_{sv\psi} \vec{\nabla}\psi + D_{svT} \rho_a c_p \vec{\nabla}T] \quad (68)$$

J_{sco} : flux de chaleur latente (W/m²)
 L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg)

II.3.2.3 Equation de conservation résultante

$$C_{sc} \partial T / \partial t = \partial / \partial z [L_v D_{sv\psi} \partial \psi / \partial z + (\lambda_s + L_v D_{svT} \rho_a c_p) \partial T / \partial z] + Sc \quad (69)$$

C_{sc} : capacité calorifique du sol (J/m³/K)
 Sc : terme source de chaleur (bilan radiatif courte et grande longueur d'onde à la surface du sol $Sc = GLO + CLO$) (W/m²)

II.3.3 Propriétés physiques caractéristiques du sol

II.3.3.1 Propriétés hydrauliques

II.3.3.1.1 Potentiel de l'eau dans le sol

On peut déterminer expérimentalement la relation liant le potentiel de l'eau dans le sol et son humidité volumique. Il existe plusieurs relations empiriques ou semi empiriques (Sisson et al., 1988). Nous avons conservé celle utilisée par Bristow et al. (1986). Elle a le mérite d'être simple, n'utilisant que deux paramètres, donc facile à établir pour différents sols. Testée par Sisson et al., (1988), elle paraît relativement fiable.

$$\psi = \psi_e (\theta / \theta_s)^{-b} \quad (70)$$

b : paramètre d'ajustement, dépendant de la texture du sol
 ψ_e : potentiel d'entrée d'air (J/kg)
 θ : humidité volumique (m³/m³)
 θ_s : humidité volumique à saturation (m³/m³)

ψ_e est le potentiel pour lequel l'air commence à pénétrer dans le sol, comme b , il est ajusté.

II.3.3.1.2 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est calculée à partir de la relation précédente et de la conductivité hydraulique à saturation, elle-même mesurable. Le modèle choisi est exposé par Campbell (1985).

$$K_{sl} = K_{ss} (\psi_e/\psi)^n \quad (71)$$

avec

$$\begin{aligned} n &= 2+3/b \\ K_{sl} &: \text{conductivité hydraulique} && \text{(m/s)} \\ K_{ss} &: \text{conductivité hydraulique à saturation} && \text{(m/s)} \end{aligned}$$

La conductivité hydraulique dépendant du potentiel de l'eau, l'équation de transfert de masse (65) est très fortement non linéaire, ceci pose des problèmes notamment dans les situations où les coefficients de transfert varient rapidement (forte infiltration ou dessèchement du sol près de la surface). Une transformation intégrale, classique dans les cas particuliers de résolutions analytiques des équations permet de réduire la non-linéarité (Campbell, 1985).

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\psi} K_{sl} \psi d\psi \quad (72)$$

L'intégration nous donne les relations suivantes :

$$\Phi = \alpha |\psi|^\beta \quad (73)$$

$$\Phi_e = \alpha |\psi_e|^\beta \quad : \text{potentiel matriciel d'entrée d'air}$$

$$\alpha = K_{ss}/(n-1) |\Phi_e|^{-n} \quad (74)$$

$$\beta = 1-n \quad (75)$$

$$K_{sl}\Phi = K_{ss} (\Phi/\Phi_e)^{(2b+3)/(b+3)} \quad (76)$$

Avec cette nouvelle variable, les équations de conservation de masse et d'énergie dans le sol prennent la forme suivante :

$$C_{sm} \partial\Phi/\partial t = \partial/\partial z [\partial\Phi/\partial z + D_{svT} \partial T/\partial z - K_{s|\Phi}] \quad (77)$$

$$C_{sc} \partial T/\partial t = \partial/\partial z [D_{sv\Phi} \partial\Phi/\partial z + (\lambda_s + L_v D_{svT} \rho_a c_p) \partial T/\partial z] + Sc \quad (78)$$

II.3.3.2 Propriétés diffusives

Les transferts gazeux ne s'effectuent pas dans l'air libre, mais dans un volume réduit par la présence des phases liquides et solides qui ont une géométrie particulière. De nombreux auteurs se sont intéressés à la mesure de la diffusivité, tant pour les transferts de vapeur d'eau que pour la circulation d'autres gaz (oxygène). Ils ont donc cherché à relier la diffusivité dans le sol à celle dans l'air en tenant compte non seulement de la porosité mais aussi de la géométrie du réseau de pores, plus difficile à caractériser. Comme nous l'avons vu précédemment, la diffusivité moléculaire dans l'air est reliée aux variations de température par la relation suivante :

$$D_{av} = D_{ov}(1+0,007T_c) \quad (79)$$

D_{ov} : coefficient de diffusion à 0 °C (1 atmosphère)
 T_c : température (°C)

Afin de calculer la diffusivité du sol (D_{sv}) à partir de D_{av} , différentes fonctions expérimentales sont présentées dans la bibliographie (Kimball et Lemon, 1971). Les modèles statistiques utilisés sont de deux types : linéaires (Wesseling, 1962) ou s'ajustant à une fonction puissance (Lai et al., 1976 ; Sallam et al., 1984). Une synthèse a été effectuée par Troeh et al. (1982) qui proposent une relation alliant au mieux les qualités des modèles précédents :

$$D_{sv} = D_{av} [(\epsilon-U)/(1-U)]^V \quad (80)$$

U, V : constantes
 ϵ : porosité ($\epsilon = \theta_s - \theta$)
 θ_s : teneur en eau volumique à saturation
 θ : teneur en eau

Nous allons maintenant calculer les coefficients de diffusion liés aux gradients de température et de potentiel, D_{svT} et $D_{sv\Phi}$. Reprenons la relation (63) :

$$J_{sv} = - D_{sv} \partial \rho_v / \partial z \quad (81)$$

Par définition, l'humidité relative, $Hr = \rho_v / \rho_{vs}$ (ρ_{vs} : masse volumique à saturation)

$$J_{sv} = - D_{sv} [\rho_{vs} \partial Hr / \partial z + Hr \partial \rho_{vs} / \partial z]$$

$$J_{sv} = - D_{sv} [\rho_{vs} (\partial Hr / \partial \psi) (\partial \psi / \partial \Phi) (\partial \Phi / \partial z) + Hr (\partial \rho_{vs} / \partial T) (\partial T / \partial z)]$$

$$J_{sv} = - D_{sv} [\rho_{vs} Hr (M_v/RT) \partial\psi/\partial\Phi \partial\Phi/\partial z + Hr \partial\rho_{vs}/\partial T \partial T/\partial z]$$

$$J_{sv} = - D_{sv} [\rho_{vs} Hr (M_v/RT) 1/\beta \alpha | \Phi |^{(1-\beta)/\beta} \partial\Phi/\partial z + Hr \partial\rho_{vs}/\partial T \partial T/\partial z]$$

$$J_{sv} = - D_{sv} [\rho_{vs} Hr (M_v/RT) 1/\beta \alpha | \Phi |^{(1-\beta)/\beta} \partial\Phi/\partial z + Hr M_v/RT P' \partial T/\partial z]$$

Finalement,

$$D_{svT} = - D_{sv} Hr P' M_v/RT \quad (82)$$

$$D_{sv\Phi} = - D_{sv} P_{vs} Hr 1/\beta \alpha | \Phi |^{(1-\beta)/\beta} \quad (83)$$

M_v : masse molaire de la vapeur d'eau (kg/mol)
 Hr : humidité relative
 P' : pente de la courbe de pression de vapeur saturante (Pa/K)

La pression de vapeur saturante est calculée à partir d'une formule empirique (formule de Tetens) :

$$P_{vs} = 610,78 \exp \{ 17,27 T_c / (237,3 + T_c) \} \quad (84)$$

T_c : température (°C)

La pente de cette courbe nous est donnée par la relation de Clapeyron,

$$P' = dP_{vs}(T) / dT = P_{vs}(T) L_v M_v/RT^2 \quad (85)$$

$P_{vs}(T)$: pression de vapeur saturante à T (Pa)
 L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg)
 R : constante des gaz parfaits (J/mol/K)

II.3.3.3 Propriétés thermiques

II.3.3.3.1 Capacité calorifique

Comme pour le mulch, la capacité calorifique du sol est calculée classiquement par le modèle de de Vries (1963)

Pour le sol, les principaux constituants sont l'eau (e), l'air (a) et la matrice solide (s) :

$$C_{sc} = C_{s}x_s + C_{e}x_e + C_{a}x_a \quad (86)$$

La capacité calorifique de l'air étant négligeable devant celle des deux autres principaux composants, nous pouvons écrire :

$$C_{sc} = Cc_s(1-\varepsilon) + Cc_e \theta \quad (87)$$

ε	: porosité totale du sol	
θ	: teneur en eau volumique	
Cc_s	: capacité calorifique volumique du sol (tableau II.1)	J/m ³ /K
Cc_e	: capacité calorifique volumique de l'eau	J/m ³ /K

II.3.3.3.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique dépend de la porosité du sol et à cause de la grande différence de conductivité thermique entre l'eau et l'air, la conductivité globale du milieu poreux va varier avec sa teneur en eau. Bristow et al. (1986) utilisent une formulation empirique, Campbell (1985) donne des expressions des coefficients déduits du modèle de de Vries (1963). Toutefois, ces modèles ont été mis au point pour la conductivité thermique apparente totale du milieu, c'est à dire qu'ils incluent les transferts de chaleur sous forme de vapeur d'eau qui sont pris en compte par ailleurs. Suivant les résultats expérimentaux de Brunet (1984), Bruckler (1986) et Berge (1990), nous modéliserons la variation de la conductivité thermique avec la teneur en eau par une relation linéaire en fixant une valeur minimale, pour les faibles teneurs en eau, ainsi que la valeur maximale, lorsque l'on se rapproche de la saturation.

$$\theta \leq \theta_{\min} \quad \lambda_s = A_s \theta_{\min} + B_s \quad (88)$$

$$\theta_{\min} < \theta < \theta_{\max} \quad \lambda_s = A_s \theta + B_s \quad (89)$$

$$\theta_{\max} \leq \theta \quad \lambda_s = A_s \theta_{\max} + B_s \quad (90)$$

II.4 Résolution du système

II.4.1 Choix des méthodes de résolution

II.4.1.1 Résolution des équations de transfert

Les transferts de masse et d'énergie, à l'intérieur du mulch et du sol sont chacun modélisés par un système de deux équations aux dérivées partielles respectivement en T , P_v et Φ , P_v , paraboliques, du second ordre et couplées. De plus, la plupart des coefficients de transfert dépendent des variables d'état, et donc ces équations sont fortement non linéaires. Seule une résolution numérique est possible. Les méthodes généralement employées pour résoudre les problèmes de diffusion verticale en milieu poreux homogène sont des méthodes aux différences finies. Le principe, développé en annexe A2, repose sur la troncature du développement en série de Taylor des fonctions dont on veut utiliser les dérivées.

La résolution du système linéaire formé est effectuée grâce au classique algorithme de Thomas (Campbell, 1985).

II.4.1.2 Résolution des équilibres

Les équilibres (bilans d'énergie et de masse) sont régis par des équations non linéaires : une méthode itérative est alors nécessaire pour trouver numériquement une solution à ces relations. La méthode de Newton–Raphson est largement employée pour la résolution de ce type de problème. Elle utilise elle aussi une approximation utilisant le premier terme du développement en série de Taylor de la fonction (Annexe A2).

II.4.2 Discrétisation

Elle dépend bien sûr du schéma numérique utilisé, ce choix et les contraintes qu'il impose sont discutés en annexe (A2).

II.4.2.1 Choix de discrétisation

II.4.2.1.1 Pour le sol

Les variations de température et d'humidité sont très rapides près de la surface (surface d'échange où s'appliquent les contraintes climatiques) et de plus en plus amorties au fur et à mesure que la profondeur augmente. Classiquement, dans les problèmes de résolution numérique des équation de transfert dans les sols, on adopte un pas d'espace variable (progression géométrique de la taille des mailles par exemple). Toutefois, un maillage trop serré multiplierait de façon rédhibitoire les calculs. Il faut donc faire un compromis entre la rapidité de convergence de l'algorithme et la durée des calculs.

Les abscisses pour lesquelles seront effectués les calculs sont (en m) :

0,01 ; 0,02 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,20 ; 0,40 ; 0,80 ; 1

II.4.2.1.2 Pour le mulch

Afin de pouvoir comparer les échanges entre le sol et l'atmosphère avec ou sans mulch, nous utiliserons dans les deux cas exactement la même discrétisation pour le sol. Le mulch sera découpé en quatre couches d'égales épaisseurs.

II.4.2.1.3 Pas de temps

A certains moments particuliers d'une journée (précipitation, lever ou coucher du soleil), il peut y avoir de rapides variation des flux, nécessitant une réduction du pas de temps, qui sera alors d'autant plus court que les variations sont rapides (Brunet, 1984). Les problèmes apparaissent principalement lors de la résolution du bilan de masse, à cause de la forte non linéarité des coefficients mis en jeu. Toutefois, nous considérerons comme Campbell (1985) que la transformation intégrale utilisée réduit ce problème et nous utiliserons un pas de temps constant d'une dizaine de minutes. Sur cette durée, les grandeurs mesurées peuvent être considérées comme constantes et notamment pour les variables caractéristiques de la masse d'air.

II.4.2.2 Conditions initiales et aux limites

II.4.2.2.1 Limite supérieure

Nous imposons à la limite supérieure des condition de première espèce, c'est à dire une température de l'air (T_a) et une humidité relative de l'air (H_{ra})

connues. Le noeud 1 du système est placé, suivant le cas à la surface du sol ou à la surface du mulch, c'est la résolution des équations d'échange avec l'atmosphère qui va imposer les conditions à la surface.

II.4.2.2 Limite inférieure

Des conditions de première espèce sont aussi imposées comme limite inférieure (T et θ imposés à 1m). La température peut être considérée comme effectivement constante à 1m, au moins à l'échelle de la journée. Pour la teneur en eau, nous imposerons à 1 m une valeur permettant de rendre compte de la présence d'une nappe (sol saturé) ou d'un fort drainage (teneur en eau faible) suivant les caractéristiques locales du sol.

II.4.2.3 Conditions initiales

A l'instant initial, le profil de température et d'humidité dans l'ensemble du système sont supposés connus.

II.4.2.3 Calcul des coefficients

Les différents coefficients, capacités, conductivités ou diffusivités $C(\Phi(t,i),T(t,i))$, $K(\Phi(t,i),T(t,i))$, $D(\Phi(t,i),T(t,i))$, seront notés : $C(t,i)$, $K(t,i)$ et $D(t,i)$ à l'instant t et au noeud i . Ils sont estimés de la façon suivante :

– Par rapport à t , linéarisation explicite :

$$C(t+1,i) = C(t,i)$$

$$K(t+1,i) = K(t,i)$$

$$D(t+1,i) = D(t,i)$$

(Les valeurs des coefficients sont calculées avec les valeurs des variables du pas de temps précédent)

– Par rapport à i , moyenne arithmétique pour les coefficients de transfert

$$C(t+1,i+1/2) = [C(t,i) + C(t,i+1)] / 2$$

$$D(t+1,i+1/2) = [D(t,i) + D(t,i+1)] / 2$$

$$K(t+1,i+1/2) = [K(t,i) + K(t,i+1)] / 2$$

II.4.2.4 Equations de bilan en chaque noeud

II.4.2.4.1 Bilan d'énergie

Les équations de bilan d'énergie étant semblables dans le mulch et dans le sol, l'ensemble sera considéré comme un continuum et traité par la même procédure :

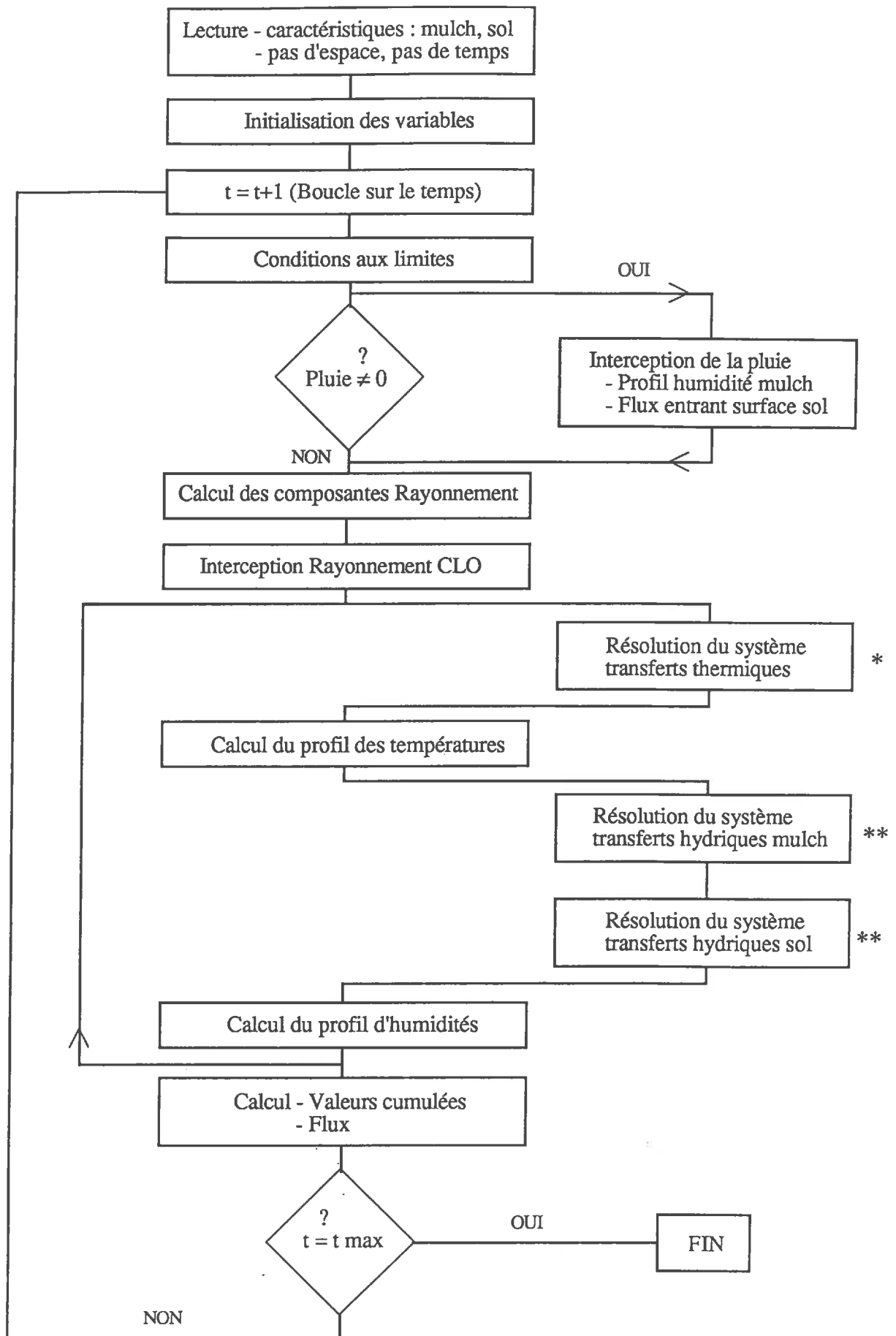


Figure II.1.a : Organigramme simplifié des calculs effectués par le modèle.
Programme principal.

II.4.2.4.3 Bilan de masse du sol (équation (76))

$$\begin{aligned}
 C_{sm}(t+1,i) [\Phi(t+1,i) - \Phi(t,i)] [z(i+1) - z(i-1)] / 2 \Delta t = \\
 \left. \begin{aligned}
 & - [\Phi(t+1,i) - \Phi(t+1,i-1)] / [z(i) - z(i-1)] + K_{sl}\Phi(i-1) \\
 & + [\Phi(t+1,i+1) - \Phi(t+1,i)] / [z(i+1) - z(i)] - K_{sl}\Phi(i)
 \end{aligned} \right\} \text{liquide} \\
 \left. \begin{aligned}
 & - D_{sv\Phi}(t+1,i-1) [\Phi(t+1,i) - \Phi(t+1,i-1)] / [z(i) - z(i-1)] \\
 & + D_{sv\Phi}(t+1,i) [\Phi(t+1,i+1) - \Phi(t+1,i)] / [z(i+1) - z(i)]
 \end{aligned} \right\} \text{vapeur} \\
 + EV(i) + MT(i)
 \end{aligned}$$

Avec les termes sources suivants :

EV : évaporation à la surface du sol (pour les autres noeuds, EV=0)

MT : transfert de vapeur dû aux gradients de température

Lorsqu'il y a des précipitations, on impose une condition de flux d'eau liquide à la surface du sol.

II.4.3 Déroulement des calculs

Le programme a été écrit en Pascal (Turbo Pascal 4.0 de Borland). L'organigramme est représenté sur la figure II.1. Les transferts thermiques sont d'abord calculés, puis les transferts hydriques. Le déroulement des calculs est le suivant, pour chaque pas de temps :

- 1 – Calculs indépendants de l'évolution de T et Φ
 - Calcul de l'interception de la pluie pour chaque couche de mulch et du flux d'eau ainsi créé à la surface du sol [PL(i)]
 - Calcul de l'interception du rayonnement solaire par le mulch jusqu'à la surface du sol [CLO(i)]
- 2 – Calcul des transferts thermiques
 - Interception du rayonnement de grande longueur d'onde par le mulch et la surface du sol [GLO(i)]
 - Calcul des coefficients d'échange entre la surface du mulch et l'atmosphère
 - Calcul du profil de températures dans le mulch et le sol
 - Répétition des calculs jusqu'à satisfaction d'un critère de convergence (variation relative de la température de surface inférieure à un seuil)

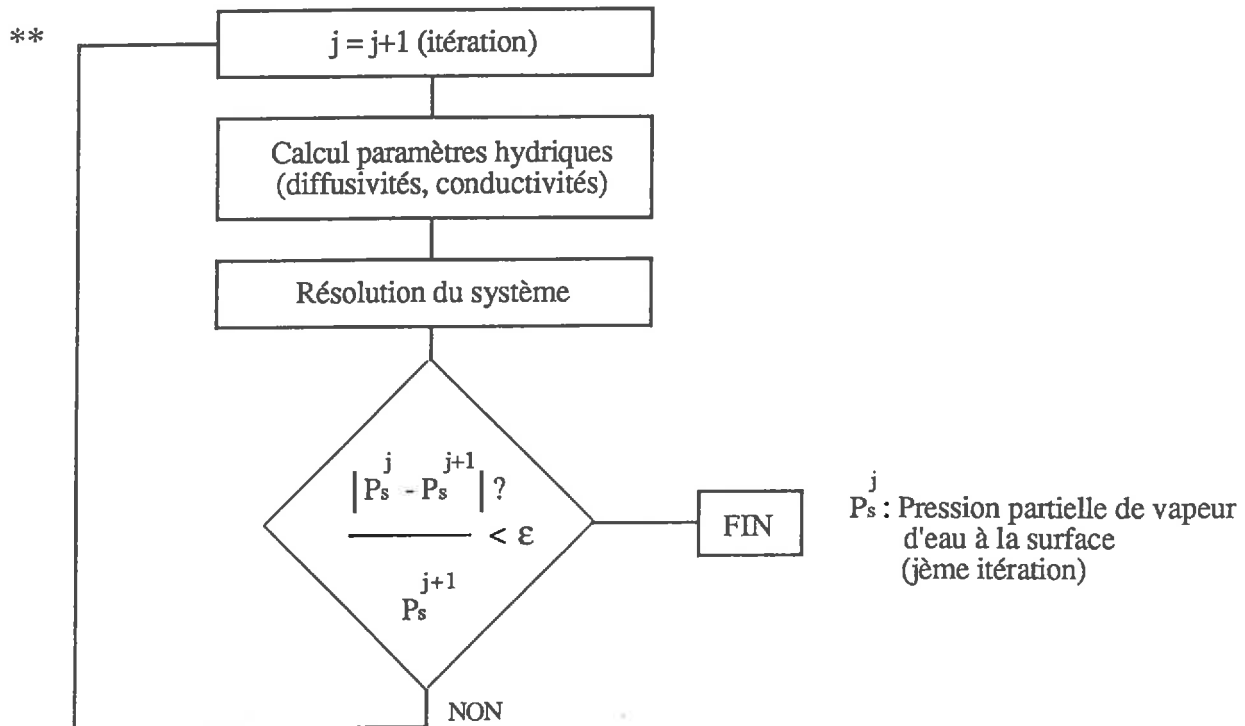
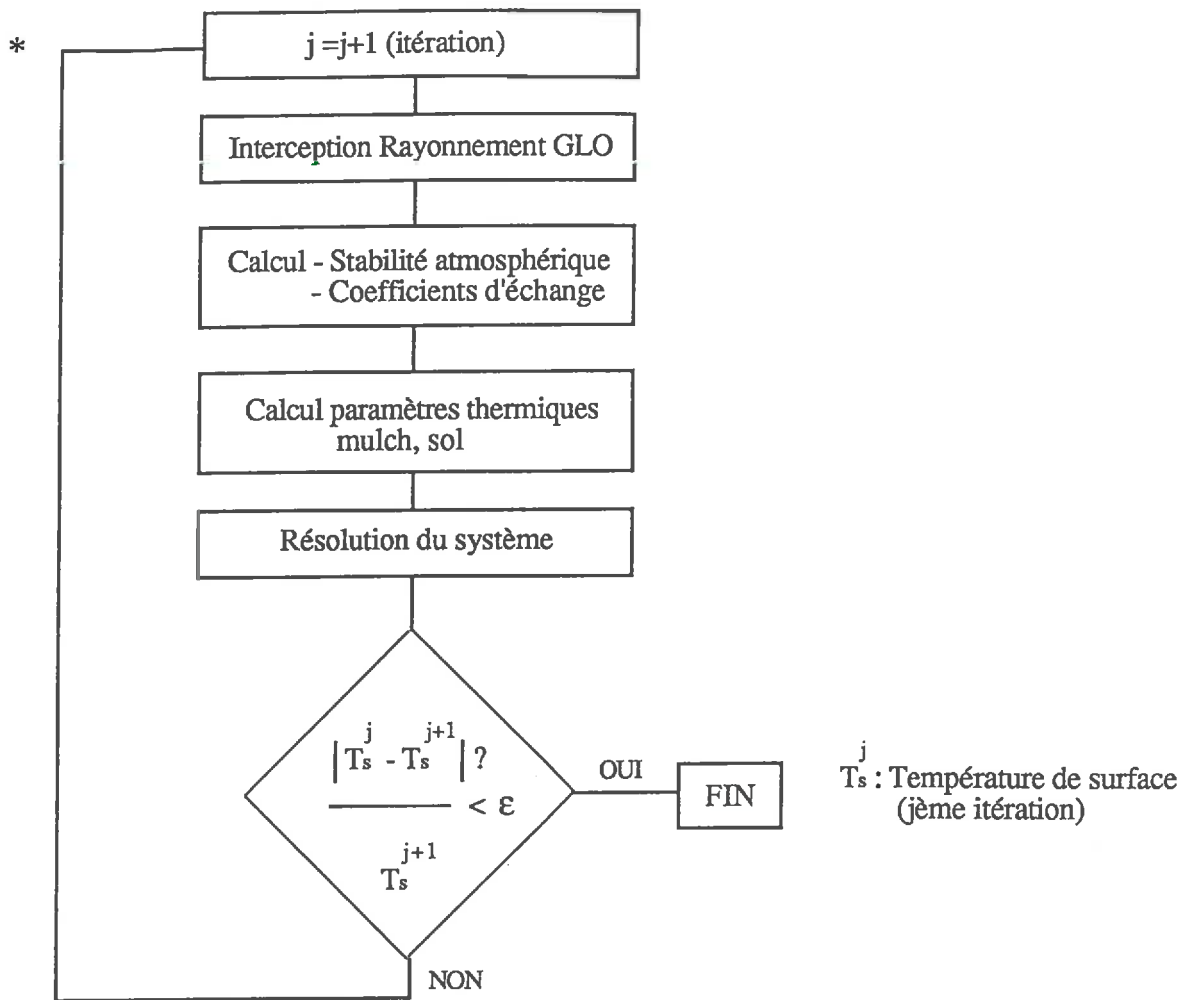


Figure II.1.b : Organigramme simplifié des calculs effectués par le modèle. Sous-programme.

- 3 – Calcul des transferts hydriques
 - Calcul du profil de pression de vapeur d'eau dans le mulch
 - Calcul du profil d'humidité dans le sol
 - Calcul du profil d'humidité dans le mulch
 - Réitération jusqu'à satisfaction du critère de convergence
- 4 – Calcul des variables de sortie
- 5 – Passage au pas de temps suivant (retour au 1)

Tableau III.1 : Biomasse (T/ha) et surface foliaire (m^2/m^2) du mulch en conditions naturelles.

Origine	Machine Rang [14]	Machine Interrang [16]	Manuelle Rang [10]	Manuelle Interrang [10]	Ensemble [50]
Feuilles	15,1 {5,1}	21,1 {7,9}	13,4 {5,8}	16,5 {8,7}	17,0 {7,6}
Tiges	4,5 {6,0}	2,9 {2,0}	4,7 {4,5}	0,5 {1,2}	3,2 {4,3}
Total	19,6 {9,5}	24,0 {8,8}	18,1 {9,4}	17,1 {9,6}	20,2 {9,7}
I.F. feuilles	9,6 {0,1}	15,1 {5,1}	11,8 {5,8}	10,3 {5,6}	11,3 {5,8}
I.F. tiges	0,04 {0,06}	0,03 {0,03}	0,06 {0,05}	0,01 {0,01}	0,01 {0,01}

Valeurs moyennes { } : écart-type
[] : nombre d'individus

Tableau III.2 : Capacité de rétention des feuilles de mulch. (Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 95 %).

	Humidité pondérale (kg/kg)	Capacité de rétention (mm/m^2)
Valeur maximale	0,83 $0,63 < \theta_{max} < 1,03$	0,13 $0,10 < C_{max} < 0,16$
A l'équilibre (24 h, 25 °C)	0,13 $0,10 < \theta_{eq} < 0,16$	0,11 $0,08 < C_{eq} < 0,14$

III MESURES PRELIMINAIRES ET VALIDATION DES SOUS-MODELES

III.1 Propriétés physiques des matériaux expérimentaux

III.1.1 Le mulch

III.1.1.1 Formation du mulch naturel

Afin de nous placer dans une situation proche de la réalité, nous avons choisi de travailler sur un mulch existant à la Guadeloupe formé des résidus de récolte de la canne à sucre. Ce mulch comprend des feuilles de canne à sucre et quelques morceaux de tige. Par la taille des éléments de feuillage considérés (les feuilles pouvant mesurer jusqu'à 1 m de longueur pour 10 cm de large), nous nous trouvons dans des conditions très différentes des mulchs les plus souvent évoqués dans la littérature (cf I.1). Ceux-ci sont en général issus de graminées de taille plus modeste (blé ou riz) ou ayant subi une transformation (maïs broyé). Rappelons enfin que la canne à sucre est une culture pérenne, maintenue pendant cinq ans au moins sur la même parcelle. Elle est coupée une fois par an (entre mars et juin), pendant la saison sèche. Le mulch est donc "renouvelé" chaque année et c'est la biomasse de ce mulch "récent" que nous avons mesurée et qui a fourni les paramètres de base pour notre étude.

III.1.1.2 Quantification du mulch

A l'aide d'un cadre métallique de 0,25 m², des prélèvements ont été effectués sur des parcelles représentatives des deux modes de récolte principaux de la canne à sucre (i.e. de formation du mulch) : la récolte manuelle ou à la machine.

A l'intérieur de ce cadre, la totalité du mulch a été prélevée. Divers renseignements sont notés : épaisseur du mulch, position de l'échantillon (rang ou interrang), mode de récolte de la parcelle. Ensuite, sur chaque échantillon, la matière sèche et la surface foliaire sont mesurées en distinguant toujours tiges et feuilles.

Les résultats sont consignés dans le tableau III.1. On remarque les écarts-types importants pour l'ensemble des mesures effectuées. Il aurait fallu multiplier par 5 le nombre d'échantillons prélevés pour avoir une estimation des paramètres à 10 % près. Cela n'était pas réalisable, compte tenu de la lourdeur des mesures (notamment de surface foliaire) mises en oeuvre. Nous nous contenterons donc de cette image "approchée" du mulch présent dans les champs de canne à sucre de la Guadeloupe et les moyennes des paramètres nous serviront de référence par la suite.

La biomasse de ce mulch (20 t/ha) se trouve parmi les plus importantes de toutes celles évoquées dans la bibliographie. On peut déjà supposer que ce paramètre ainsi que le fort indice foliaire (8) vont avoir un effet décisif sur les transferts d'énergie.

III.1.1.3 Capacité de rétention en eau

La quantité d'eau pouvant être stockée par les éléments de feuillage par simple imbibition (α_p) a été mesurée en laboratoire. Le protocole employé est semblable à celui décrit par Nizinski et Saugier (1988) pour mesurer les capacités de rétention de feuilles ou d'écorces d'arbre. Les feuilles ont été immergées dans l'eau puis pesées après égouttage de quelques secondes, une deuxième pesée a eu lieu après 24 h de mise en équilibre au laboratoire (température : 25 °C, humidité relative 70 %). Après séchage à l'étuve (24 h à 80 °C), la matière sèche et la surface foliaire ont été mesurées.

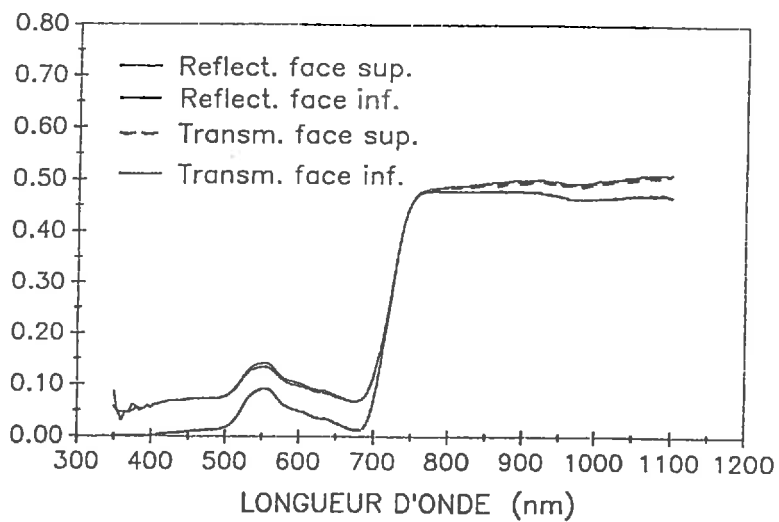


Figure III.1 : Propriétés radiatives d'une feuille verte de canne à sucre.

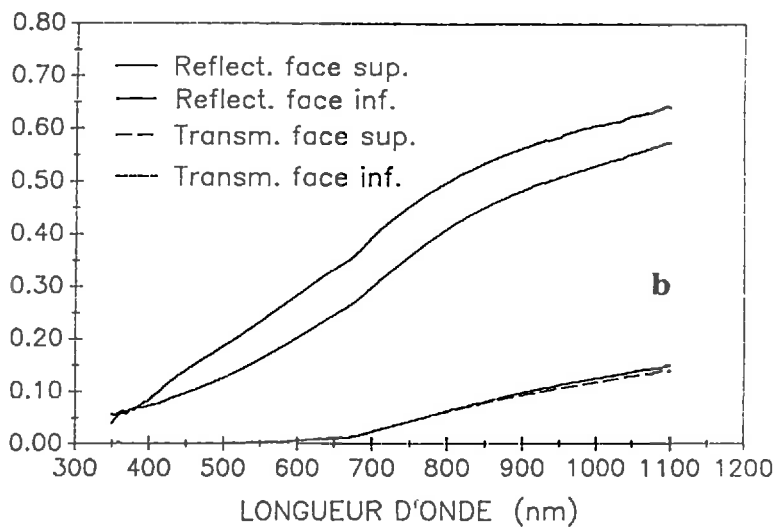
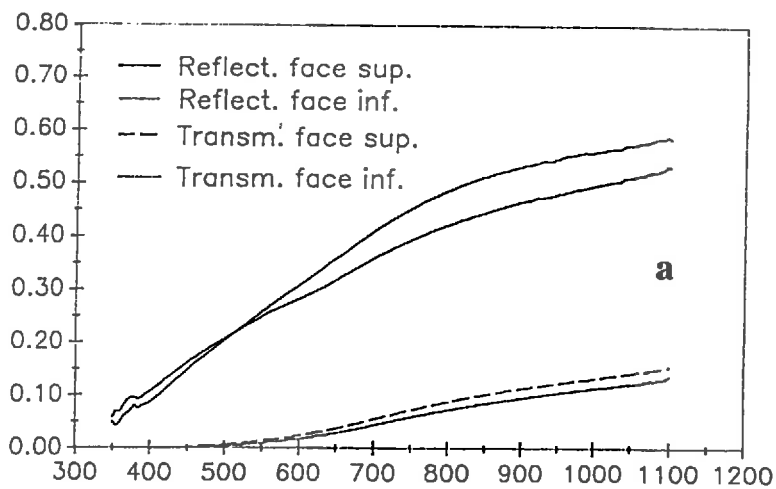


Figure III.2 : Propriétés radiatives d'une feuille sèche de canne à sucre.
a : Récente, **b :** Ancienne.

Les résultats sont présentés dans le tableau III.2. Malgré des différences d'aspect (feuilles plus ou moins lacérées), on observe une faible variabilité des quantités d'eau stockées d'une feuille à l'autre. Apparemment, à partir du moment où les feuilles sont sèches, la quantité d'eau qui peut être retenue à surface foliaire égale est à peu près constante.

III.1.1.4 Propriétés radiatives

Les propriétés radiatives des feuilles sèches de canne à sucre ont été mesurées dans une gamme allant de 300 à 1100 nm par bandes de 6 nm à l'aide d'un spectrophotomètre LI-COR 1800.

Par rapport aux feuilles vertes, qui présentent généralement des propriétés optiques différents pour le rayonnement visible et le proche infra-rouge (figure III.1), on observe pour les feuilles sèches une évolution quasi linéaire des réflectances et transmittances avec la longueur d'onde (figure III.2a). Il n'y a plus lieu de considérer deux gammes de longueurs d'ondes pour lesquelles les propriétés radiatives des feuilles sont différentes. Nous utiliserons donc pour les calculs une valeur moyenne pondérée par l'énergie reçue, pour tout le spectre solaire, à savoir $\rho = 0,31$ et $\tau = 0,03$.

Avec l'action combinée du climat et des microorganismes, on observe un vieillissement des feuilles qui deviennent plus sombres, leurs propriétés radiatives sont représentées sur la figure III.2b. On observe effectivement une légère diminution de la réflectance et de la transmittance. Cette évolution serait certainement à prendre en compte dans l'étude de l'action d'un mulch sur une plus grande échelle de temps.

Ces résultats sont tout à fait similaires à des valeurs publiées récemment par Tanner et Shen (1990).

III.1.2 Le sol

III.1.2.1 Description

Le sol sur lequel a été effectuée l'expérimentation est formé d'alluvions ferrallitiques. L'analyse granulométrique fait apparaître une très forte teneur en argiles (77 %) (Van Oort, 1988). Ce constituant va donc jouer un rôle prépondérant dans les propriétés physiques (principalement hydriques) du matériau. Cette argile, l'halloysite, est assemblée en agrégats sphériques dont la taille est de l'ordre du millimètre. Cette structure génère un système de porosité particulier qui confère au sol certaines propriétés hydriques, comme la conductivité hydraulique, pouvant être proches de celles d'un sol limoneux.

Dans les études systématiques des propriétés hydriques des sols, les sols argileux considérés possèdent au plus 50% d'argiles. La détermination des propriétés hydriques des sols tropicaux nécessite donc des mesures expérimentales.

La présence d'une proportion assez importante d'oxydes de fer est responsable d'une densité de solide supérieure à 2,65, valeur classiquement utilisée pour les sols (Campbell, 1975). Nous estimerons cette densité à 2,75 (Van Oort, communication personnelle). Une densité de 1,07 a été mesurée sur des échantillons prélevés à l'aide de cylindres en inox de 8,5 cm de diamètre pour 4,5 de hauteur.

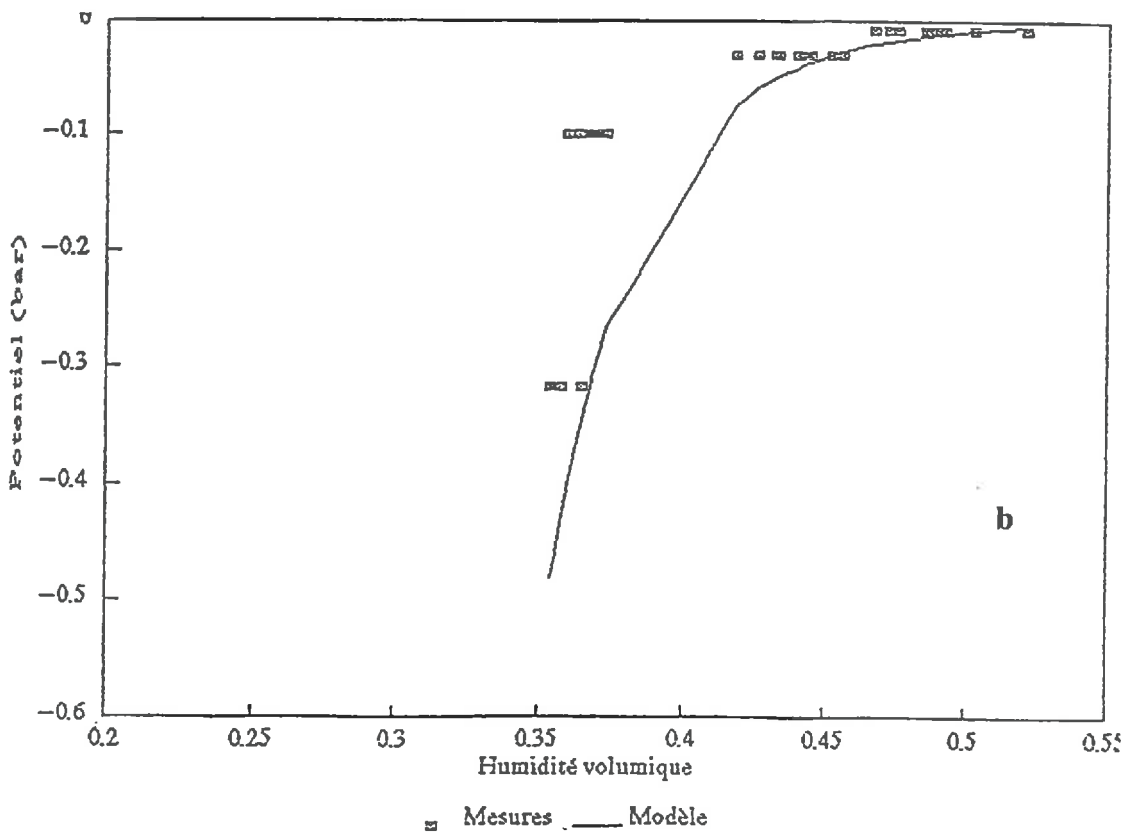
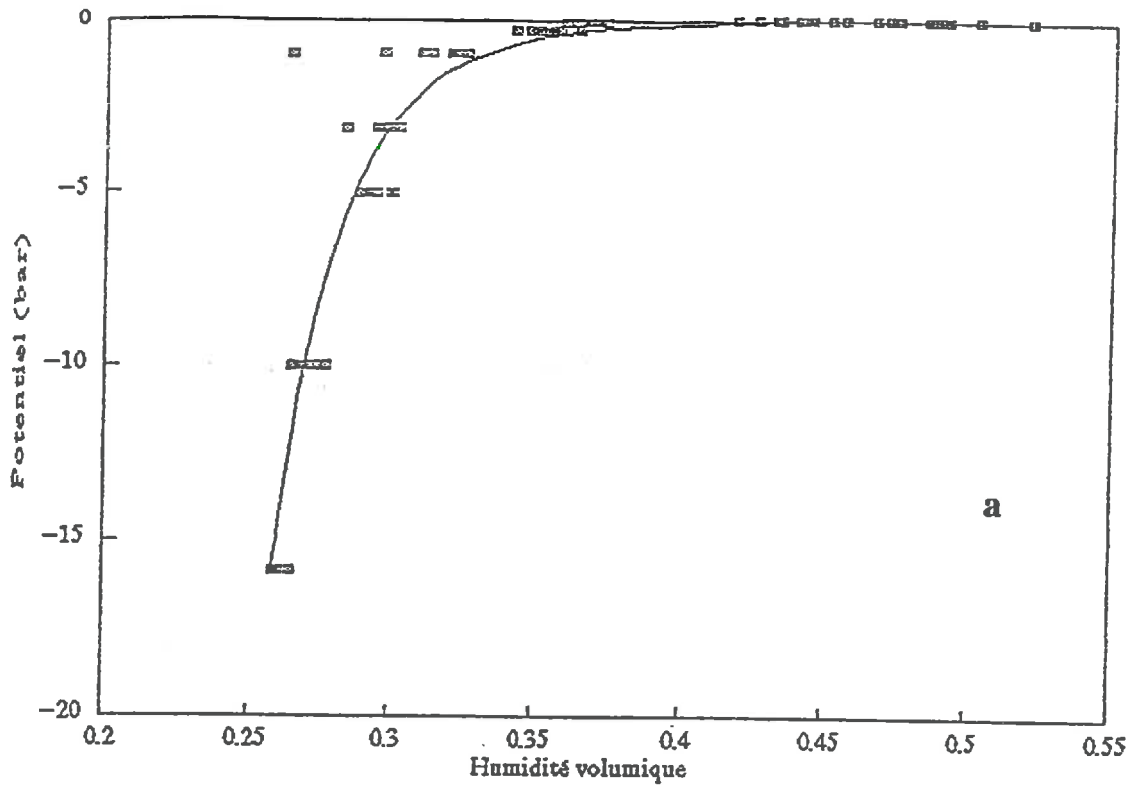


Figure III.3.: Courbe de rétention du sol de la parcelle expérimentale. (sol ferrallitique, 77% d'Argile). a : Pour toute la gamme de potentiels, b : Pour les faibles potentiels ($< 0,5$ bar).

III.1.2.2 Propriétés hydriques

III.1.2.2.1 Courbe de rétention

La relation liant la quantité d'eau présente dans un échantillon de sol et le potentiel de celle-ci est généralement appelée "courbe de rétention".

III.1.2.2.1.1 Matériel et méthodes

Dans l'horizon superficiel (5 premiers cm), des prélèvements de sol non remanié ont été effectués à l'aide de cylindres de PVC de 2,5 cm de diamètre et de 2,8 cm de hauteur enfoncés verticalement. Compte tenu de la structure que nous avons évoquée dans le paragraphe précédent, ils peuvent être considérés comme représentatifs du sol pour la mesure de ses propriétés hydriques.

Deux méthodes sont ensuite employées suivant la gamme de potentiels considérée :

- Pour la mesure des potentiels de 0 à 16 bars, on utilise des cellules à pression. Une pression pneumatique constante est appliquée sur l'échantillon saturé qui peut perdre de l'eau par sa face inférieure à travers une paroi poreuse. A l'équilibre, la succion capillaire de l'eau dans l'échantillon compense exactement la pression atmosphérique.

- Au delà de 16 bars, compte tenu des contraintes expérimentales, on utilise plutôt la méthode hygroskopique. Les échantillons sont placés dans l'atmosphère d'une enceinte fermée en contact avec une solution saline saturée. A température constante, la solution impose une humidité relative connue (loi de Raoult). A l'équilibre, le potentiel de l'eau dans l'échantillon de sol est alors parfaitement connu et l'on mesure la teneur en eau de celui-ci.

III.1.2.2.1.2 Résultats

Rappelons que l'on veut modéliser la courbe de rétention par une fonction du type (cf. II.3.3.2) :

$$\psi = \psi_e (\theta/\theta_s)^{-b}$$

avec :

ψ	: potentiel de l'eau dans le sol	mesuré
θ	: humidité volumique	mesurée
θ_s	: humidité volumique à saturation	calculée
ψ_e	: potentiel d'entrée d'air	ajusté
$-b$: paramètre	ajusté

D'après des mesures faites au laboratoire et sur le terrain, l'air résiduel piégé dans le sol est quasi inexistant (van Oort, communication personnelle), nous prendrons donc :

$$\theta_s = \varepsilon = 0,61 \quad (\varepsilon = \text{porosité})$$

L'ajustement à une fonction puissance a été effectué par la méthode d'ajustement non linéaire de Marquart (SAS, 1987). Les paramètres obtenus sont donnés dans le tableau III.3. et les figures III.3 (a et b) représentent la fonction ajustée.

Tableau III.3 : Courbe de rétention du sol, modèle de Campbell (1985)

Valeur des paramètres b et ψ_e obtenus par ajustement non linéaire.
(Méthode de Marquart, SAS 1987)

paramètre	valeur	intervalle de confiance (95 %)
b	-11,12	$-12,67 < b < -9,57$
ψ_e	-0,011	$-0,026 < \psi_e < 0,003$

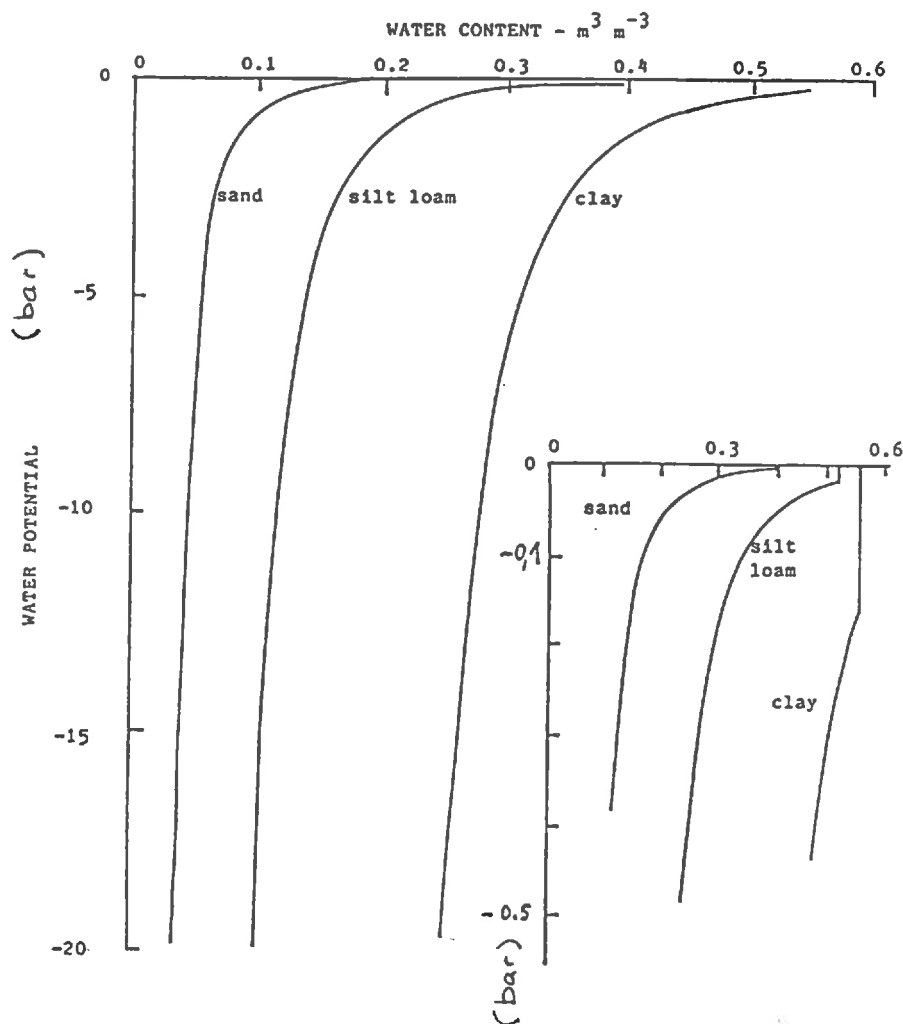


Figure III.4 : Courbes de rétention de différents types de sol (d'après Campbell, 1985)

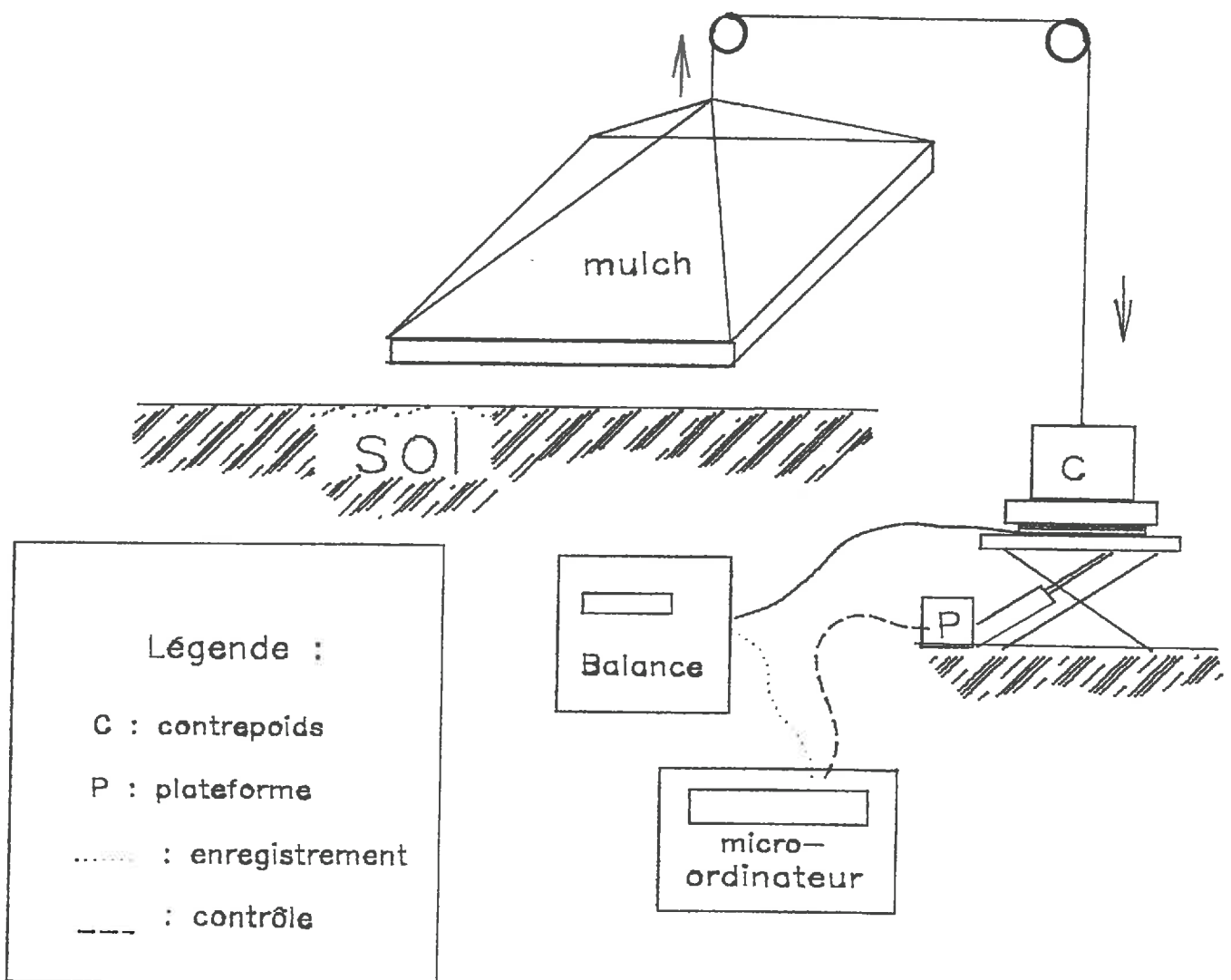


Figure III.5 Représentation schématique du dispositif de mesure des variations de stock d'eau d'un tapis de mulch (pesée automatique).

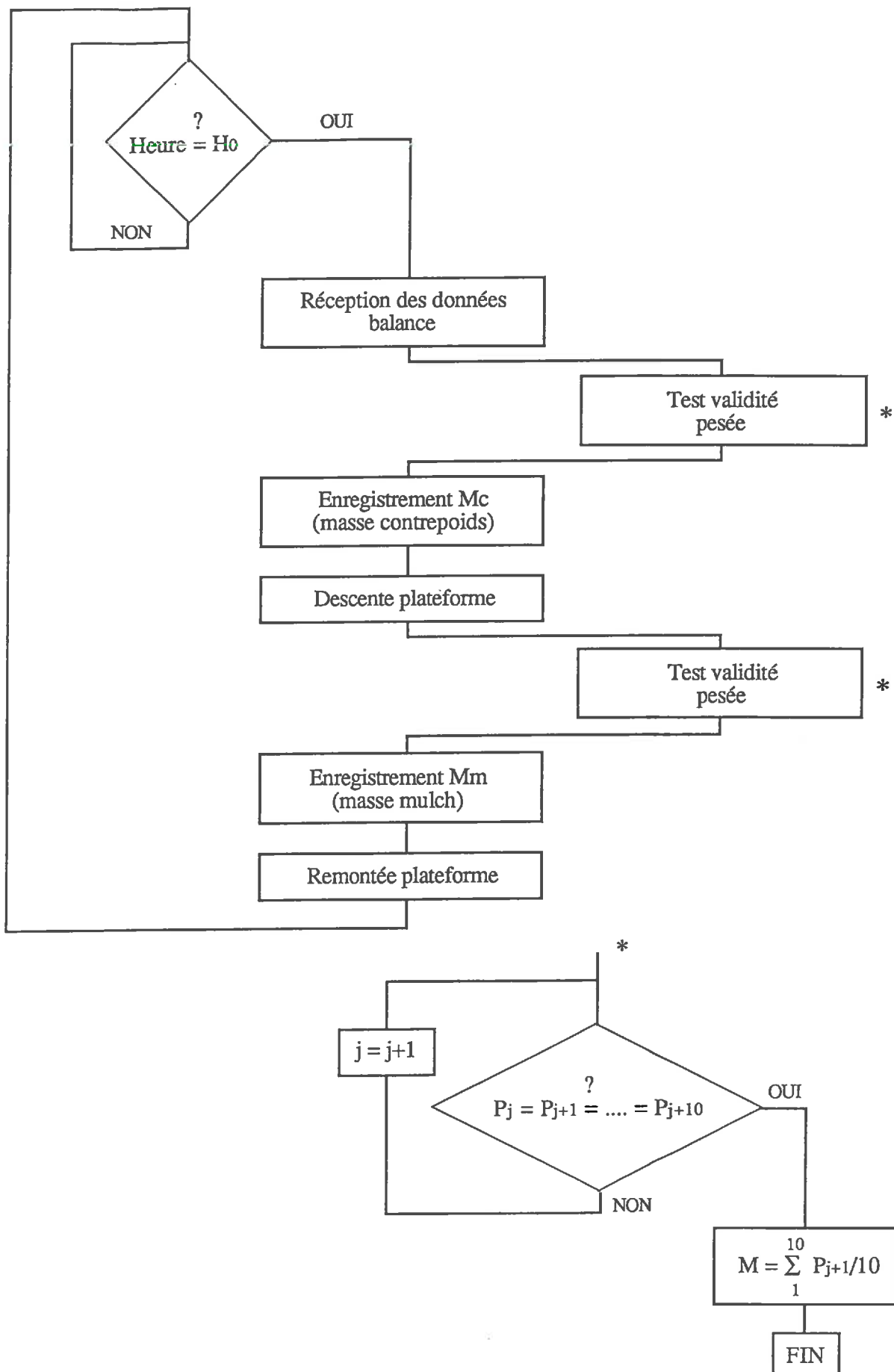


Figure III.6 : Organigramme d'une séquence de mesures (pesée du cadre de mulch).

Hormis la forte dispersion de certains points de mesure, il y a parfois, pour les faibles potentiels ($- 0,1$ bar, figure III.3b) une mauvaise description du comportement réel des variables par le modèle qui a par contre l'avantage d'être simple et facile à intégrer dans les équations de transfert.

La valeur du paramètre b est conforme à ce que l'on pouvait attendre en sol argileux (figure III.4, d'après Campbell, 1985). Par contre, le potentiel d'entrée d'air est plus élevé (moins négatif), et plus proche des valeurs généralement mesurées pour des sols limoneux, voire sableux.

III.1.2.2.2 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique du sol (cf. II.3.3.1.2), est calculée à partir de la courbe de rétention que nous venons de déterminer et la conductivité hydraulique à saturation qu'il faut mesurer expérimentalement.

III.1.2.2.2.1 Matériel et méthodes

Des monolithes de sol non remaniés ont été prélevés dans des cylindres en inox de 8,5 cm de diamètre et 4,5 cm de hauteur dans l'horizon superficiel. Après saturation des échantillons, une lame d'eau de 2 cm d'épaisseur est maintenue au sommet de ceux-ci tandis que le débit de l'eau percolante est mesuré.

L'eau s'écoulant préférentiellement le long des parois du cylindre lui-même n'est pas prise en compte. Malgré le soin apporté aux prélèvements, les risques d'erreur inhérents à la méthode sont nombreux compte tenu des dimensions réduites de l'échantillon et de la grande variabilité spatiale du paramètre mesuré.

III.1.2.2.2.2 Résultats

Nous utiliserons la valeur moyenne de $8,3 \cdot 10^{-6}$ m/s ($\pm 1,1 \cdot 10^{-6}$, $n=4$) comme paramètre d'entrée du modèle. On remarque là encore que cette valeur est plutôt proche de celles communément admises pour des sols limoneux, voire pour des sols sableux.

III.2 Modèle d'interception de la pluie

III.2.1 Matériel et méthodes

Un dispositif permettant la mesure simultanée de la pluie incidente, de la quantité d'eau ayant percolé à travers le mulch et de la quantité d'eau stockée à l'intérieur de celui-ci a été réalisé.

Une cage en aluminium de 5 m² de surface pour 0,1 m de hauteur repose sur un bac de collecte des pluies, enterré et de même surface. La cage dans laquelle est reconstitué un tapis de mulch (cf III.1.1.2) est reliée par un câble à un contrepoids de masse supérieure posé sur une balance mobile suivant un axe vertical (figure III.5).

– Lorsque la plateforme est en position haute :

Le mulch repose sur le sol et la balance mesure la masse totale du contrepoids.

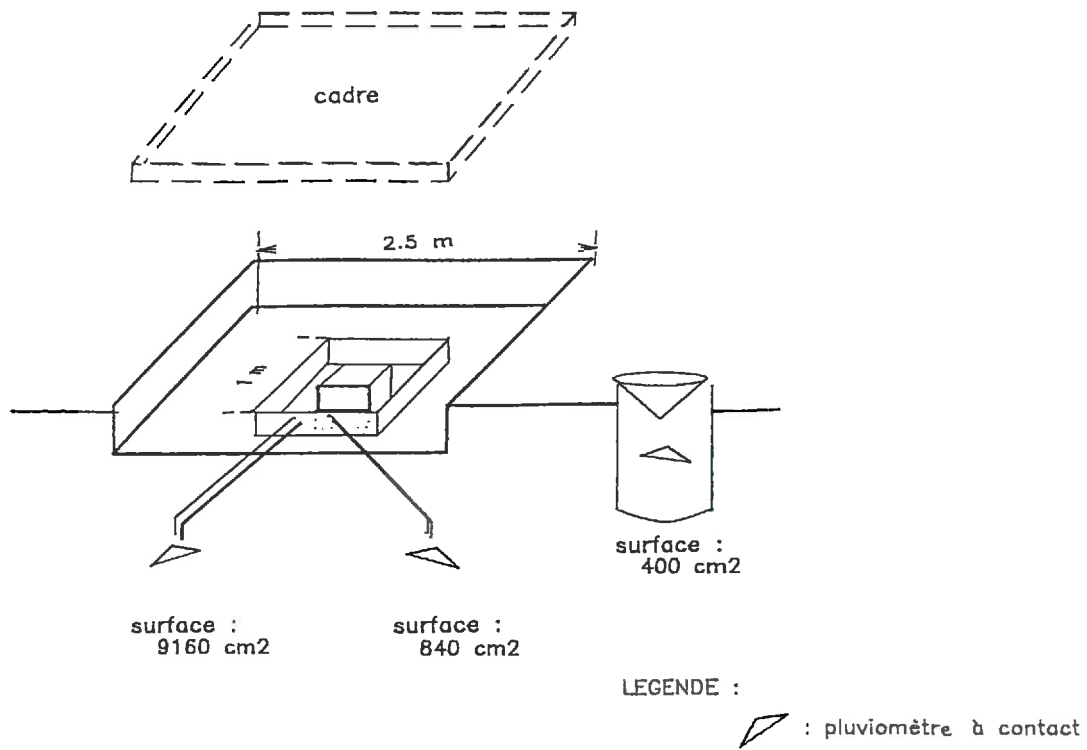


Figure III.7 : Dispositif expérimental de mesure des pluies incidentes et de la quantité d'eau ayant percolé à travers le mulch.

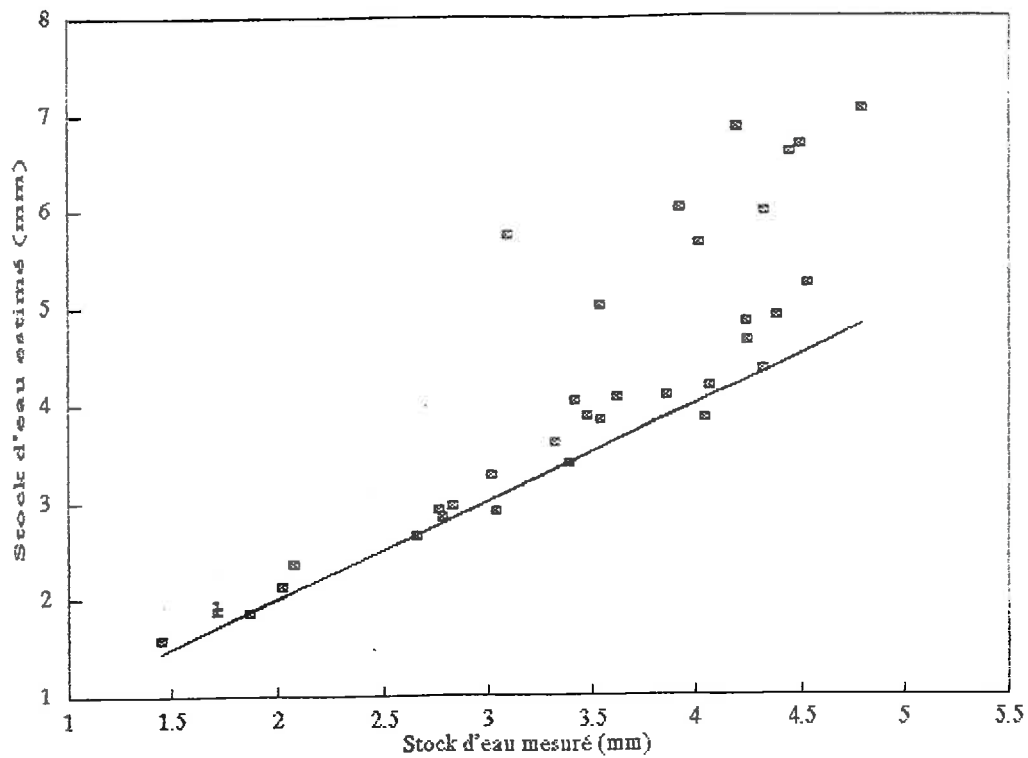


Figure III.8 : Comparaison des quantités d'eau stockées par le mulch mesurées et estimées par le modèle de Rutter et al. (1971).

– Lorsque la plateforme est en position basse :

Le mulch est soulevé du sol par l'intermédiaire du câble et la balance mesure la masse du contrepois moins celle du cadre contenant le mulch.

Le cadre contenant le mulch, soulevé pendant la mesure, est particulièrement sensible à l'action du vent. Une mesure ne sera validée que si 10 pesées successives sont identiques à 100 g près (sur une gamme de 60 Kg), ce qui nous permet, compte tenu de la taille du cadre d'estimer les variations de stock d'eau du mulch avec une précision de 0.02 mm.

Un microordinateur portable Husky Hunter 208 muni d'un port série assure le pilotage du dispositif (commande des mouvements de la plateforme) et l'enregistrement des données (réception et stockage des informations envoyées par la balance). L'organigramme de la séquence de mesure est représenté par la figure III.6.

Les données pluviométriques sont mesurées grâce à des pluviomètres à contact Précis-mécanique délivrant une impulsion pour 0,2 mm de pluie. L'enregistrement est assuré par des centrales d'acquisition Delta-T. La surface réceptrice standard de 400 cm² est utilisée pour mesurer les pluies incidentes. Afin d'intégrer une certaine hétérogénéité spatiale du mulch, des surfaces de réception plus importantes (9160 et 840 cm²) collectent l'eau de drainage sous le mulch. La plus petite est utile en cas de pluies intenses lorsque le débit de la grande sature le pluviomètre (Figure III.7). Dans les deux cas, les volumes d'eau récupérés sont mesurés par un pluviomètre identique au précédent.

Un intervalle d'intégration court (1 min), permet d'avoir une description fine des cinétiques de précipitation et percolation. Le délai entre deux pesées est par contre fixé à 30 min, compte tenu de la durée effective de la mesure et des perturbations dues aux mouvements du cadre.

III.2.2 Résultats

Nous disposons d'un échantillonnage d'environ 45 pluies indépendantes dont plus de la moitié sont inférieures à 1 mm. Le pas de temps est de 30 min et nous connaissons pour chaque pluie le volume d'eau incidente, celui drainé, et les quantités initiales et finales stockées dans le mulch.

Pour 7 de ces pluies, il y a eu un drainage enregistré après la fin des précipitations. Malgré la faiblesse de l'effectif, nous en avons déduit les valeurs des paramètres K et C_d comme le suggèrent Rutter et al. (1971). Les valeurs obtenues sont K = 2. 10⁻⁴ et C_d = 1,4.

Puis, le modèle complet a été appliqué pour déterminer la quantité d'eau stockée dans le mulch à la fin de chaque période connaissant le stock initial et le volume de pluie reçu. Sur la figure III.8, nous comparons les valeurs calculées et celles obtenues expérimentalement. La droite représente la première bissectrice. Le modèle surestime fortement la quantité d'eau stockée pour un certain nombre de points ; tous correspondent à de fortes pluies. Ce problème peut s'expliquer par le fait que le calage a été effectué sur des volumes de drainages très faibles qui représentent mal le comportement du mulch en cas de fortes pluies. On a donc un risque de sous-estimation de la quantité d'eau réhumectant le sol dans le modèle complet.

Une meilleure validation d'un tel modèle d'interception de la pluie peut être obtenue à partir de pluies simulées.

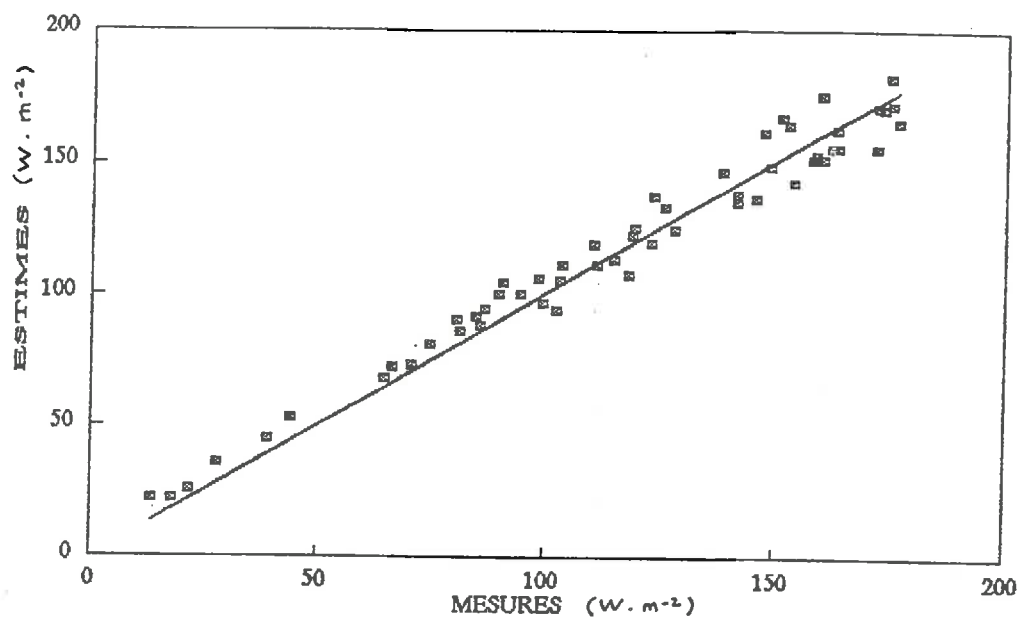


Figure III.9 : Modèle d'interception du rayonnement solaire par le mulch, comparaison du rayonnement réfléchi mesuré et simulé.

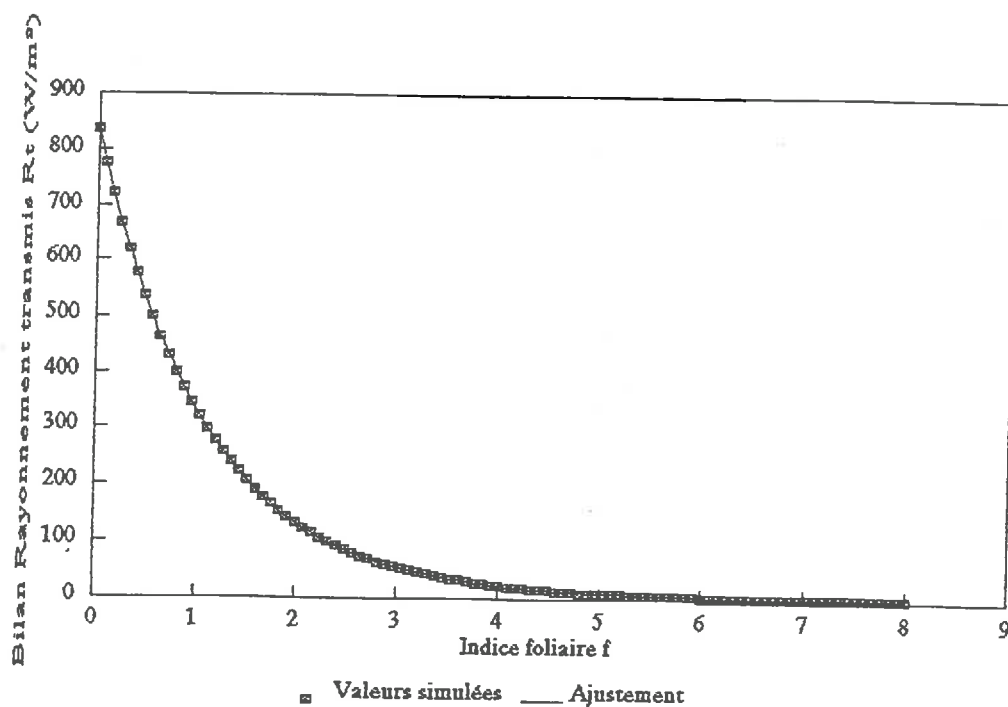


Figure III.10 : Evolution du rayonnement solaire transmis (R_t) avec l'indice foliaire du mulch traversé.
 Modèle simplifié ajusté : $R_t = (1-a) R_i \exp\{-0,92 f\}$
 Rayonnement incident : $R_i = 1000 \text{ W/m}^2$
 Albédo du mulch : $a = 0,16$.

III.3 Modèle d'interception du rayonnement

III.3.1 Validation du modèle pour le rayonnement solaire

III.3.1.1 Matériel et méthodes

Les mesures effectuées par deux thermopiles (Kipp et Zonen, délivrant environ 100 microvolts par Watt) sont intégrées et enregistrées (pas de temps horaire) par une centrale d'acquisition CR21 (Campbell ltd). Les deux capteurs, placés à 1 m au dessus d'un tapis de mulch, mesurent respectivement le rayonnement global incident et le rayonnement réfléchi.

Conformément à des mesures antérieures (Sinoquet, 1988), l'albédo du sol nu a été fixé à une valeur de 0.07 indépendante de l'humidité. Rappelons qu'en général l'albédo d'un sol varie de façon décroissante avec son humidité de surface (cf. relation utilisée par Bruckler et al., 1986). Le coefficient de réflexion des éléments de mulch (ρ) est de 0,31 et leur coefficient de transmission (τ) vaut 0,03.

III.3.1.2 Résultats

Les valeurs de rayonnement réfléchi simulées par le modèle sont comparées à celles mesurées (Figure III.9). La relation modèle-mesures est très proche de la première bissectrice et la pente de cette droite n'est pas significativement différente de 1. Nous considérerons que cette confrontation, quoique partielle, valide le modèle d'interception du rayonnement. L'albédo de l'ensemble du tapis de mulch sera considéré comme constant et égal à 0,16, valeur conforme à ce que l'on peut trouver dans la bibliographie (Shen et Tanner, 1990).

III.3.2 Simplification du modèle complet

Le modèle complet a été utilisé pour générer les données permettant d'exprimer le rayonnement intercepté en fonction de l'indice foliaire traversé (Figure III.10). Le modèle simplifié suivant a été ajusté sur ces données :

$$R_t = R_i \exp \{-0,92 f\} \quad (r^2 = 0.9999)$$

avec :

R_t	: rayonnement transmis	(W/m ²)
R_i	: rayonnement incident	(W/m ²)
f	: indice foliaire	

Le coefficient global d'extinction de 0,92 trouvé est tout à fait compatible avec les gammes admises dans la littérature (Ross, 1975).

III.3.3 Choix d'un modèle simplifié pour le rayonnement infra-rouge

Le modèle de transferts radiatifs pour l'infra rouge thermique n'a pas été validé expérimentalement, faute de pouvoir mesurer les transferts radiatifs dans le mulch indépendamment des autres modes de transfert.

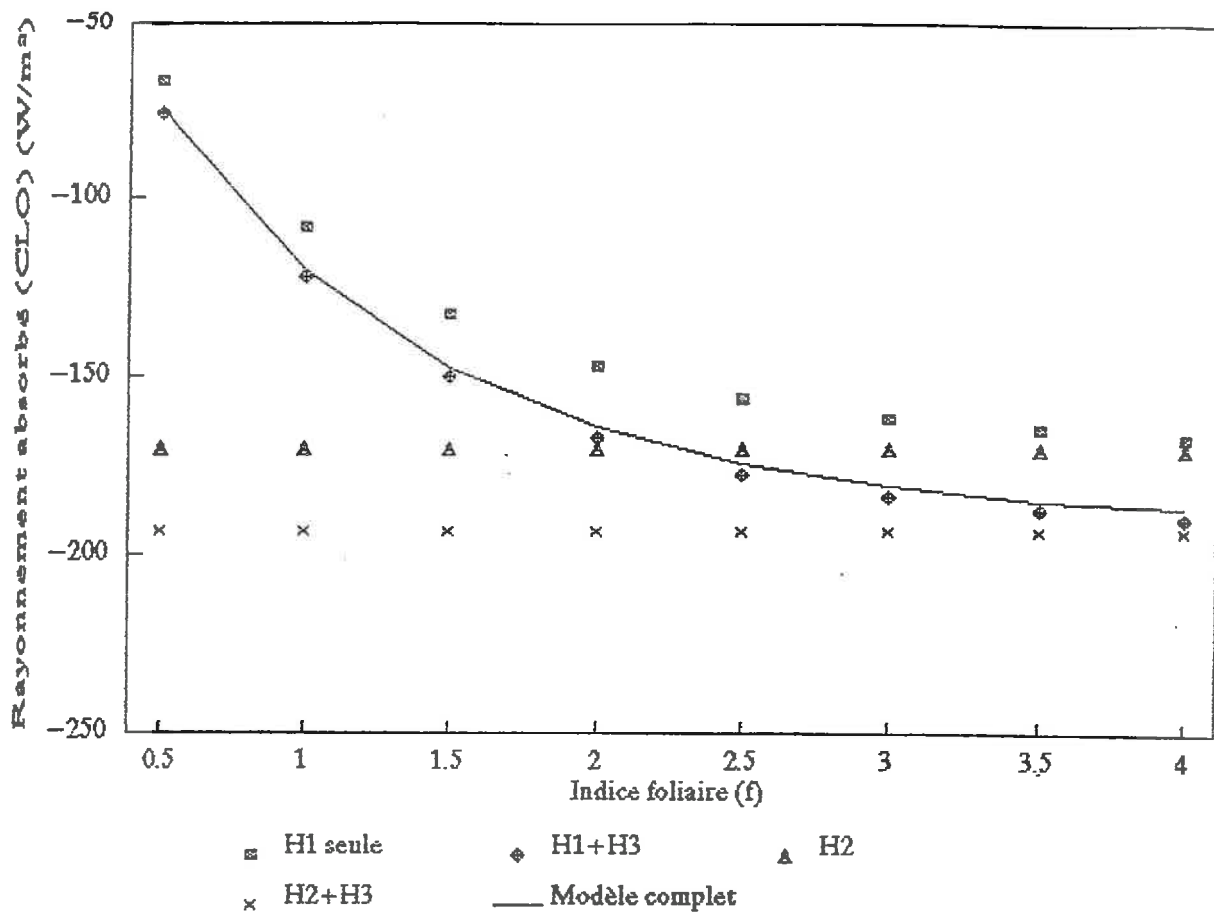


Figure III.11 : Evolution du rayonnement absorbé par une couche de mulch en fonction de son indice foliaire ($RA = 300 \text{ W/m}^2$)
Influence des différentes hypothèses simplificatrices.

Le modèle complet (décrit en annexe A1) a été utilisé comme modèle de référence et les différentes hypothèses simplificatrices ont été introduites successivement afin de tester l'influence de chacune sur le résultat final. Les simulations sont effectuées pour une couche de mulch posée sur le sol dont on calcule le rayonnement absorbé (GLO).

Les données standard utilisées par le modèle complet sont :

rayonnement atmosphérique :	RA	=	300 W /m ²
émissivité des feuilles :	ϵ_f	=	0,97
émissivité du sol nu :	ϵ_s	=	0,98
indice foliaire du mulch :	0,5	$\leq F \leq$	4
température des feuilles :	T_f	=	315 K
température du sol :	T_s	=	310 K

Nous utiliserons les notations suivantes dans la discussion (pour plus de détails, voir annexe A1) :

Modèle	Hypothèse	Expression du rayonnement absorbé
M1	H1	$GLO = (RA + \epsilon_s \sigma T_s^4 - 2\epsilon_f \sigma T_f^4) (1 - \exp\{-F\})$
M13	H1 + H3	$GLO = (RA + \sigma T_s^4 - 2\sigma T_f^4)(1 - \exp\{-F\})$
M2	H2	$GLO = RA + \sigma \epsilon_s T_s^4 - 2\epsilon_f \sigma T_f^4$
M23	H2 + H3	$GLO = RA + \sigma T_s^4 - 2\sigma T_f^4$

Par construction, les modèles M2 et M23 ne dépendent pas de l'indice foliaire. D'autre part, M1 et M13 tendent vers M2 et M23, respectivement quand f augmente ($\exp\{-f\}$ tend vers 0 quand f tend vers l'infini) (figure III.11).

Les modèles M2 et M23 sont rejetés car ils surestiment fortement le rayonnement émis aux faibles indices foliaires. Le modèle M13 se rapproche le plus du modèle complet, c'est celui que nous utiliserons par la suite. Notons que même lorsqu'on utilise des émissivités de feuilles de 0,94 avec le modèle complet, l'erreur sur l'estimation de rayonnement absorbé (avec M13) ne dépasse pas 3 %.

Les meilleurs résultats obtenus avec l'hypothèse H3 (modèle M13 meilleur que M1) sont logiques : l'hypothèse H1 revenant à négliger les rediffusions dans le mulch donc à supposer que les éléments de feuillage absorbent tout le rayonnement.

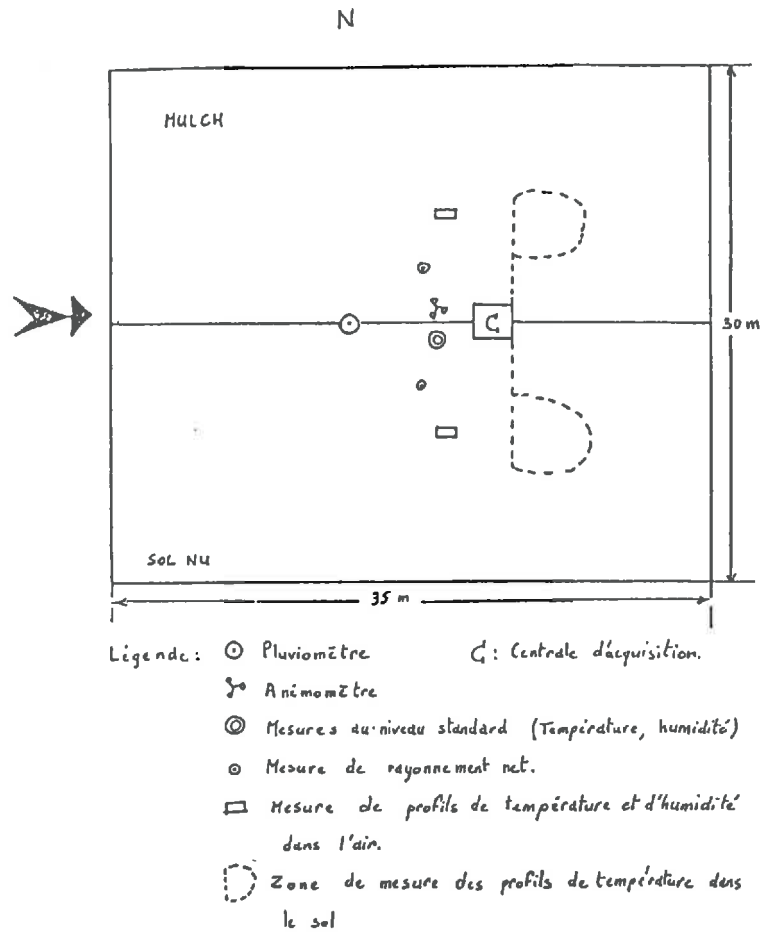


Figure IV.1 : Parcelle expérimentale utilisée.

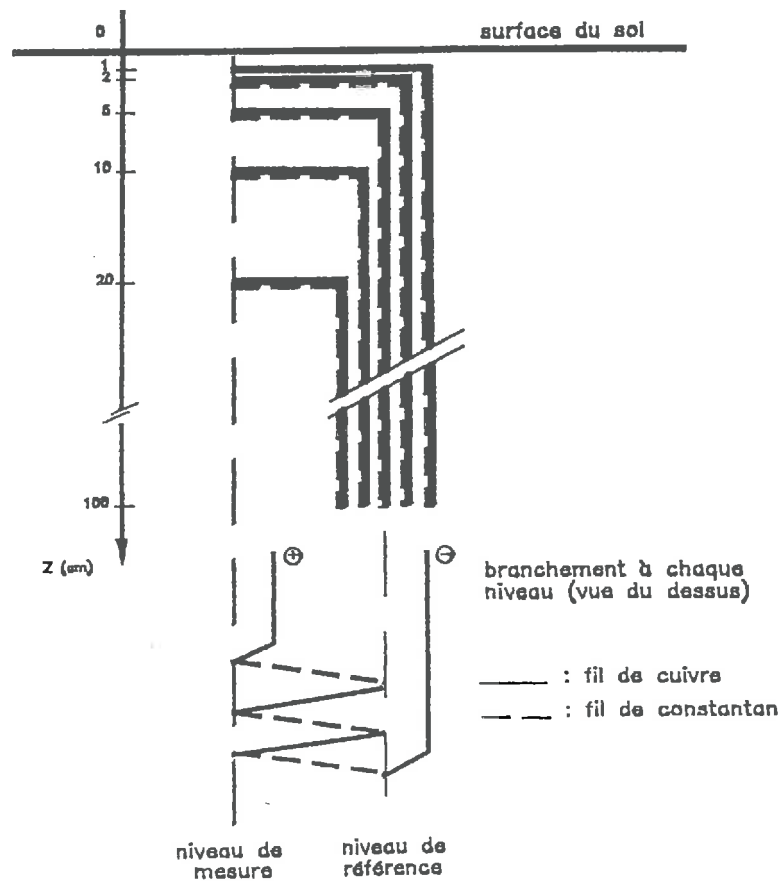


Figure IV.2 : Représentation schématique du dispositif de mesure du profil de températures dans le sol.

IV VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE COMPLET

IV.1 Expérimentation

IV.1.1 Le site

Sur le domaine expérimental de Duclos (Centre INRA de Guadeloupe, 16°15'N 61°40'W, altitude 125m) une parcelle de 35 x 30 m a été maintenue en sol nu pendant la durée de l'expérimentation. Un mulch de canne à sucre a été disposé sur une moitié de cette parcelle, avec une densité correspondant aux observations que nous avons faites sur le terrain (20 t/ha). La séparation entre les deux parcelles était parallèle à la direction des vents dominants qui sont des alizés de secteur est (Figure IV.1). Le travail du sol correspondait à un lit de semence très fin (plusieurs passages de cultivateur) ; de plus, un passage de rouleau a été effectué afin d'assurer un tassement plus important de l'horizon superficiel et une structure la plus homogène possible.

Sur sol nu, la taille moyenne des aspérités en surface est de l'ordre du centimètre, alors que le mulch a une épaisseur moyenne de 10 cm.

IV.1.2 Mesures effectuées dans le sol

IV.1.2.1 Températures

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Cuivre-Constantan à 5 profondeurs : 1, 2, 5, 10 et 20 cm. A chaque profondeur, afin d'assurer une mesure en plusieurs points permettant d'obtenir une estimation de la valeur moyenne de la température, 3 thermocouples sont connectés en série (figure IV.2), les soudures de référence sont regroupées à 1 m de profondeur. Cette température à 1 m de profondeur, variant peu à l'échelle de la journée, représente la condition à la limite inférieure du système.

Une température "de surface" a aussi été estimée par 5 thermocouples en série disposés à la surface du sol. Il est évident qu'il n'est pas possible de mesurer la température de surface du sol avec cette technique : des soudures posées sur le sol et donc exposées au rayonnement ont un bilan d'énergie différent de celui du sol dont elles sont censées mesurer la température. Des soudures très légèrement enfouies (afin de ne pas être exposées au rayonnement solaire) mesurent une température à quelques fractions de millimètre de profondeur mais pouvant différer de plusieurs degrés de celle de surface. (Fuchs et Tanner 1967).

Ces mesures sont réalisées simultanément sur la parcelle en sol nu et la parcelle mulchée. La température à 1 m dans le sol est mesurée par un thermocouple référencé par rapport à une température interne de la centrale d'acquisition.

IV.1.2.2 Humidité du sol

C'est l'humidité pondérale du sol qui a été mesurée quotidiennement (à 10 h locales) sur les deux parcelles par une méthode gravimétrique. Les niveaux de mesure sont les mêmes que ceux employés pour la mesure de température. Cinq prélèvements sont effectués à chaque profondeur et à la surface du sol (sur 2 à 3 mm d'épaisseur). Ceux-ci sont effectués par tranches horizontales à partir d'une fosse ouverte pour chaque profil. L'humidité à 1 m de profondeur est mesurée à partir d'un prélèvement hebdomadaire effectué à la tarière avec 3 répétitions.

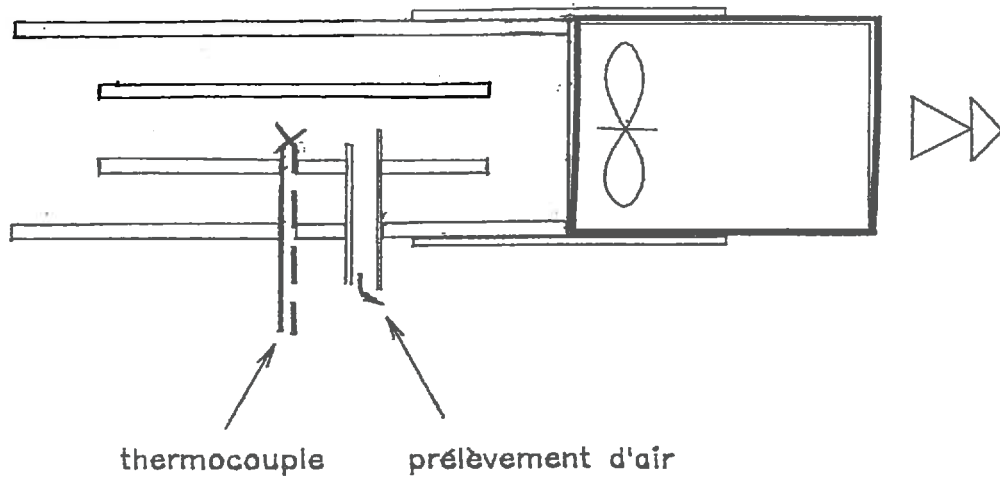


Figure IV.3 : Prise ventilée permettant la mesure de la température et de l'humidité relative de l'air à un niveau.

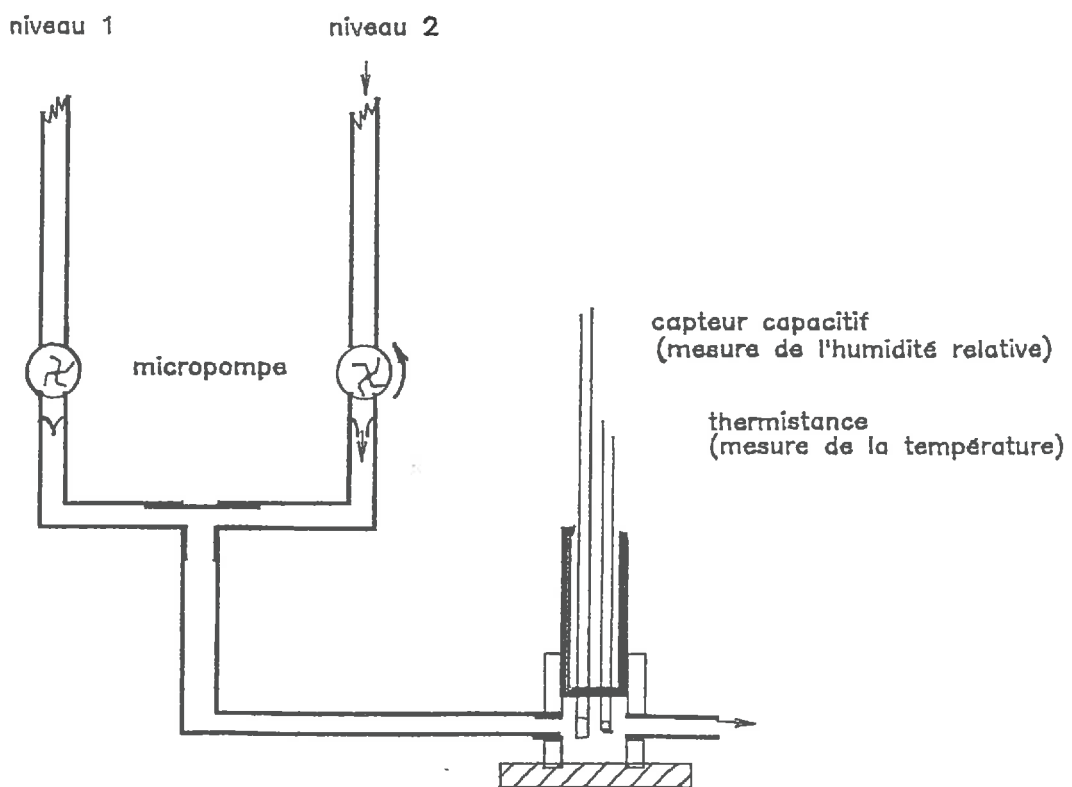


Figure IV.4 : Montage permettant la mesure successive par le même capteur de l'humidité relative de l'air prélevé à deux niveaux.

IV.1.3 Mesures dans l'air

IV.1.3.1 Mesures de rayonnement net

Sur chaque parcelle, un pyrromètre différentiel (Schenck) placé à un mètre au-dessus de la surface (sol ou mulch) mesure le rayonnement net. Ce capteur formé de 2 surfaces réceptrices opposées protégées par des coupelles en polyéthylène (transparent pour toutes les longueurs d'onde) mesure directement le bilan d'énergie de la surface sur laquelle il est placé avec une précision annoncée d'environ 10 W/m².

IV.1.3.2 Mesures de température de l'air

Ces mesures sont effectuées à deux niveaux sur chaque parcelle, soit 0,5 et 1,5 m de hauteur au-dessus de la surface. Des prises d'air ventilées formées d'une double enceinte (tubes coaxiaux en PVC) permettent une mesure de la température moyenne de l'air à ce niveau à l'aide d'un thermocouple (figure IV.3). La température de référence, commune à toutes ces mesures est générée par un manchon isolant et réfléchissant abrité du rayonnement solaire dans un abri naturellement bien ventilé.

IV.1.3.3 Mesures d'humidité de l'air

Dans chaque prise ventilée, un tube de plastique fin (diamètre interne : 4mm) permet le prélèvement de l'air nécessaire à la mesure de l'humidité relative moyenne (figure IV.3).

L'air est prélevé à l'intérieur des prises ventilées par de petites pompes (Sercom) d'un débit de 150 ml/min et acheminé vers le capteur par un tube de polypropylène. Pour une même parcelle, l'air prélevé à chaque niveau de mesure est envoyé alternativement sur le même capteur capacitif (HMP35A Vaisala) afin d'en mesurer l'humidité relative et la température. C'est le déclenchement alterné des micropompes (munies de clapets anti-retour) qui assure l'inversion des niveaux de mesure (figure IV.4).

IV.1.4 Mesures dans le mulch

IV.1.4.1 Mesures de température

Des mesures de températures sont réalisées à trois niveaux (A, B, C) dans le mulch à l'aide de thermocouples dont la taille est voisine du millimètre placés dans l'air (5 en série). Les niveaux de mesure sont situés :

- sous le mulch,
 - A. à la surface du sol (interface sol-mulch)
 - B. au milieu du mulch (l'abscisse exacte n'étant pas mesurable)
- C. à la surface du mulch (interface mulch-atmosphère), à l'abri du rayonnement direct.

Tableau IV.1 : Chronologie des opérations réalisant la mesure d'humidité relative à deux niveaux.

Mesure d'Humidité relative					
		Niveau bas		Niveau haut	
Minute	Prél.	Mes.	Prél.	Mes.	
1	✓				
2		✓			
3	✓	✓			
4			✓		
5			✓	✓	
6			✓	✓	
7	✓				
8	✓	✓			
9	✓	✓			
10			✓		
11			✓	✓	
12			✓	✓	
M O Y E N N E					

Cette séquence est réalisée simultanément pour les 3 "sites" de mesure :

- au-dessus du sol nu
- au-dessus du mulch
- à l'intérieur du mulch

IV.1.4.2 Mesures d'humidité

On mesure l'humidité relative de l'air aux niveaux A et B avec la technique décrite précédemment. Au niveau du prélèvement, l'extrémité des tuyaux a été perforée sur une longueur de 1 m (compte tenu de la variabilité importante du milieu). L'ensemble (taille et nombre des perforations) a été calibré pour assurer le même débit d'air au niveau des capteurs capacitifs que celui imposé par les prélèvements effectués à l'intérieur prises ventilées (figure IV.3).

IV.1.5 Mesures communes

IV.1.5.1 Mesures météorologiques

La pluie à 1 m du sol est enregistrée par un pluviomètre à contact Précis mécanique. Le vent, la température et l'humidité relative de l'air sont mesurés au niveau météorologique standard (2 m) respectivement par un anémomètre à coupelles et un capteur HMP35A de Vaisala comprenant un capteur capacitif et une thermistance, ce dernier étant placé dans un abri de type cheminée Cimel.

IV.1.5.2 Acquisition des données

La centrale d'acquisition (Micrologger CR7 de Campbell Scientific Ltd) assure le contrôle des séquences de mesure (mise en route des pompes, inversions), l'enregistrement et la conversion des données analogiques en données numériques, leur premier traitement (moyennes, cumul) et le stockage final. Les données sont ensuite périodiquement récupérées à l'aide d'un microordinateur portable.

L'intervalle de scrutation est de 5 secondes, les moyennes ou intégrations sont effectuées sur des intervalles de temps de 12 minutes. Pour les mesures nécessitant la prise en compte successive de deux niveaux pour un même capteur ("inversion"), la durée du prélèvement à un même niveau est de 3 minutes. Pendant la première minute s'effectue le renouvellement de l'air du dispositif (en fait, 40 s suffisent) et seules les deux dernières minutes sont effectivement utilisées pour les mesures. Les humidités relatives calculées sur les 12 minutes sont donc des moyennes effectuées à partir de 2 intervalles de 2 minutes d'enregistrement effectif. Le tableau IV.1 résume le déroulement des opérations pour un même capteur.

IV.1.5.3 Autres mesures utilisées

Nous avons la possibilité d'utiliser les données enregistrées par une station agrométéorologique automatique Cimel située à environ 100 m de la parcelle expérimentale. Les données disponibles avec cet équipement sont des moyennes ou intégrations sur des périodes de 3 heures.

Indépendamment des simples comparaisons permettant de vérifier nos données, ce site nous fournissait une mesure de rayonnement global nécessaire comme variable d'entrée du modèle.

IV.2 Données utilisées pour la mise en oeuvre du modèle

IV.2.1 Mesures disponibles

Les mesures utilisables sont comprises dans une période allant du 28 septembre 1990 au 6 novembre 1990. La disponibilité effective des différents paramètres est

Tableau IV.2 :
 Mesures utilisables à
 l'issue de l'expérimentation.

Quantième	Mesures site										Mesures météo.										Hum. sol.										Pluie > 4 mm										RG > 15MS											
	28 08	28 09	28 10	28 11	28 12	28 13	28 14	28 15	28 16	28 17	28 18	28 19	28 20	28 21	28 22	28 23	28 24	28 25	28 26	28 27	28 28	28 29	28 30	29 01	29 02	29 03	29 04	29 05	29 06	29 07	29 08	29 09	29 10	29 11	29 12	29 13	29 14	29 15	29 16	29 17	29 18	29 19	29 20	29 21	29 22	29 23	29 24	29 25	29 26	29 27	29 28	29 29
	[Horizontal bars]										[Horizontal bars]										[Horizontal bars]										[Horizontal bars]										[Horizontal bars]											

résumée dans le tableau IV.2. Nous avons aussi indiqué les journées pour lesquelles la pluviométrie dépassait l'évapotranspiration journalière et celles pour lesquelles le rayonnement global journalier était supérieur à la moyenne. Ces considérations nous permettront par la suite d'identifier les périodes intéressantes pour tester le fonctionnement du modèle.

IV.2.2 Paramètres du modèle

IV.2.2.1 Estimation de la conductivité thermique du sol

Contrairement aux autres paramètres que nous avons estimés à partir de mesures spécifiques ou de données bibliographiques, la conductivité thermique a été calculée à partir de cette expérimentation. Rappelons que nous avons choisi de modéliser l'évolution de la conductivité thermique réelle du sol en fonction de sa teneur en eau à partir d'une relation du type :

$$\lambda_s = A_s \theta + B_s \quad \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}$$

La méthode du stock thermique a été employée en utilisant une partie des données expérimentales. Le principe de la méthode est rappelé en annexe A3.

Le choix des données est guidé par plusieurs critères:

- Mesures indispensables :
 - Mesure des profils de température dans le sol permettant de calculer les flux de chaleur à différents niveaux
 - Mesure du rayonnement net permettant une évaluation directe du bilan d'énergie à la surface du sol
 - Mesure du profil de teneur en eau du sol
- Conditions favorables :
 - Sol humide, car on minimise ainsi les transferts de chaleur dus à la vapeur d'eau déjà prise en compte par ailleurs dans le modèle
 - Conditions nocturnes minimisant les échanges avec l'atmosphère et les variations brusques de teneur en eau

D'autre part, ces données doivent être indépendantes de celles utilisées ultérieurement pour le test du modèle complet. La période du 25 octobre au 6 novembre (jours 298 à 310) répond à ces critères.

La figure IV.5 représente les valeurs de λ_s obtenues en fonction des θ mesurés pour l'ensemble des données choisies. On remarque une forte dispersion des points. Ce comportement est malheureusement fréquents dans ces études de la conductivité thermique des sols *in situ* (Brunet 1984). Il nous faut bien cependant utiliser une première estimation de ce

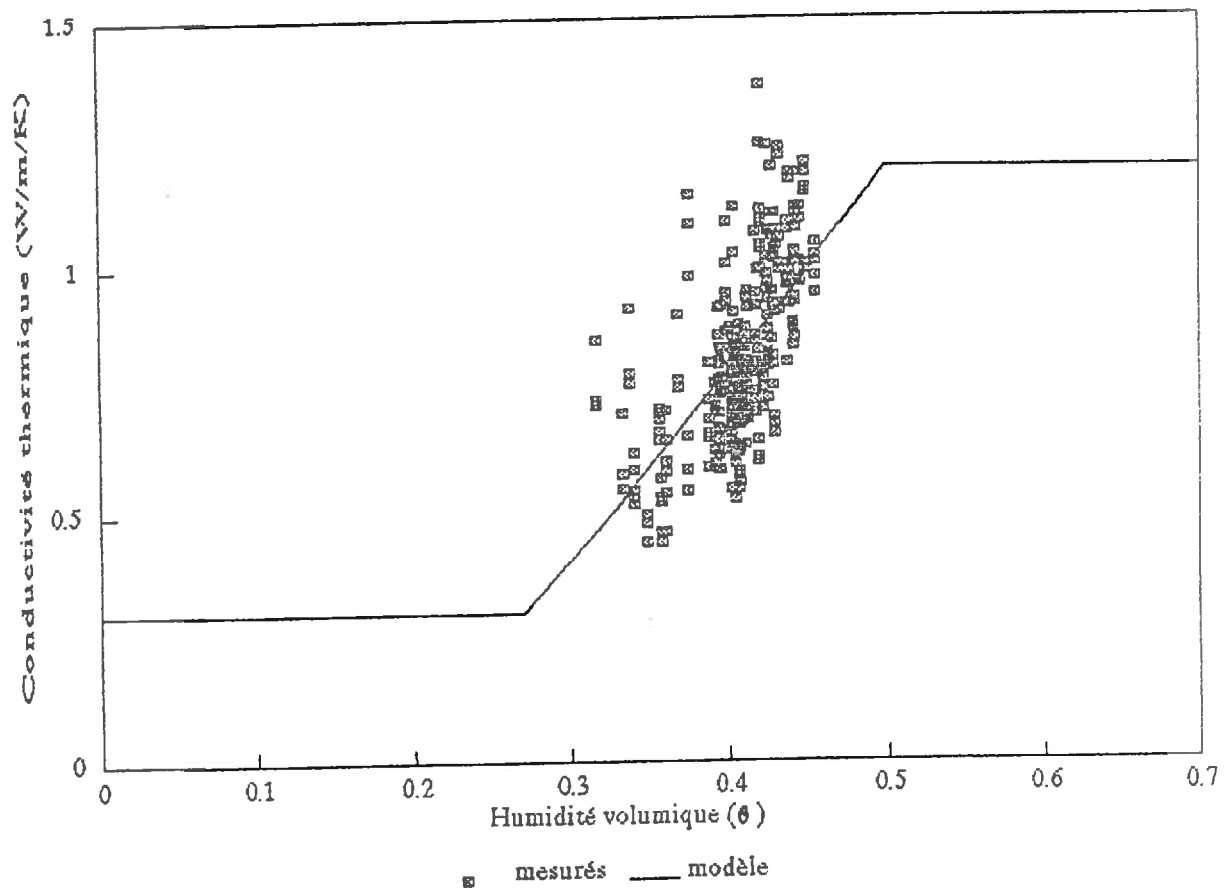


Figure IV.5 :
 Valeurs expérimentales de λ_s obtenues par la méthode du stock thermique et relation $\lambda_s(\theta)$ utilisée dans le modèle.

paramètre qu'il faut modifier par la suite au cours de la procédure de calage du modèle. La droite des moindres carrés pour l'ensemble de ces points a l'équation suivante :

$$\lambda_s = 3,88 \theta - 0,77 \quad (r^2 = 0,41 ; n = 310)$$

(± 0,29) (± 0,14)

C'est la relation que nous prendrons pour la zone correspondant aux moyennes teneurs en eau. Il reste à fixer les seuils θ_{\min} et θ_{\max} .

Pour θ_{\max} nous prendrons l'humidité correspondant à la conductivité maximale mesurée (1,2 W/m/K) et θ sera égal à l'humidité correspondant à la conductivité minimale pour ce type de sol (Brunet, 1984). En effet nous ne disposons pas d'estimations aux faibles teneurs en eau.

Finalement, la conductivité thermique sera modélisée ainsi (W/m/K) :

	θ	<	0,28		λ_s	= 3,88*0,28 - 0,77 = 0,3
0,28	<	θ	<	0,5	λ_s	= 3,88* θ - 0,77
0,50	<	θ			λ_s	= 3,88*0,5 - 0,77 = 1,2

IV.2.2.2 Valeurs des paramètres utilisées

Caractéristiques physiques:

- Mulch :

- Masse par unité de surface	= 1	kg/m ²	mesurée
- Epaisseur	= 0,1	m	mesurée
- Densité	$\rho_u = 20$	kg/m ³	mesurée
- Indice foliaire	F = 4		mesuré

- Sol :

- Densité de solide	$d_s = 2,75$		estimée
- Densité du sol	$d_g = 1,07$		mesurée

Propriétés radiatives :

– Courtes longueurs d'onde :

- Réflectance du sol $\rho_s = 0,07$ mesurée
- Réflectance globale du mulch $\text{albm} = 0,16$ calculée
- Coeff. ext. du ray. global $K_e = 0,92$ calculé

– Grandes longueurs d'onde :

- Emissivité du mulch (hypothèse) $\varepsilon_f = 1$ estimée
- Emissivité du sol (hypothèse) $\varepsilon_s = 1$ estimée

Propriétés thermiques :

- Capacité calorifique du mulch $C_{cu} = (1900 + (4,18 \cdot 10^3)\theta_u)\rho_u$ calculée
- Capacité calorifique du sol $C_{cs} = \rho_s (2,39 \cdot 10^6/2,75 + 4,18 \cdot 10^6\theta_s)$ calculée
- Conductivité thermique du mulch $\lambda_u = (\theta_u \cdot 0,3 \cdot 10^{-1}) + 0,1$ calculée
- Conductivité thermique du sol $\lambda_s = (\text{cf. IV.2.1})$ estimée

Propriétés hydriques

- Capacité de rétention du mulch = 5 mm/m² mesurée
- Conductivité hydraulique du sol $K_{ss} = 2$ cm/h mesurée
- Courbe de rétention du sol $\psi = 0.01 (\theta_s / 0.61)^{-11.1}$ mesuré
- "Courbe de rétention" du mulch $\theta_u = 0.064 (Hr^{-0.51} - 1)^{-0.42}$ bibliographie

Diffusivité de la vapeur d'eau

- Dans le sol $D_{sv} = 21,2 \cdot 10^{-6} (1 + 0,007T_c) \epsilon^{1,4}$ bibliographie
- Dans le mulch $D_{uv} = D_{uv}(0) \exp \{2,5 (z/epm - 1)\}$ bibliographie
(z : abscisse (+ vers le bas))

IV.2.3 Variables de forçage

IV.2.3.1 Calcul des données manquantes

Pour traiter les transferts radiatifs dans le mulch, il est nécessaire de connaître le rayonnement atmosphérique, RA et le rayonnement global RG et nous disposons de :

- une mesure de RN intégré sur 12 min (noté RN12)
- une mesure de RG intégré sur 3 h (noté RG3)

Nous allons utiliser ces deux données pour obtenir des estimations de RG et RA sur des pas de temps de 12 mn (resp. RG12 et RA12) en faisant l'hypothèse que les proportions respectives de RG et RN sont constantes en 3 heures.

- Calcul de RG12 :
 - Cumul des RN12 sur 3 h → RN3.
 - Calcul RG12 = (RG3/RN3) RN12
- Calcul de RA12 :

Plutôt que d'utiliser une estimation grossière de RA à cette échelle de temps (les formules permettant le calcul de RA à partir des conditions atmosphériques ne sont valables qu'à l'échelle de la journée), nous avons préféré le calculer à partir de nos mesures.

Nous utiliserons donc la mesure de RN12, le RG12, la valeur calculée de l'albédo du mulch ($albm$) et la température de surface mesurée (T_{om}) pour calculer les différents termes du bilan radiatif à la surface du mulch et calculer RA12 :

$$RA12 = RN12 - (1 - albm)RG12 + \epsilon\sigma T_{om}^4$$

IV.2.3.2 Variables mesurées

Ce sont les conditions aux limites imposées à chaque pas de temps au modèle et les paramètres dont dépendent les échanges avec l'atmosphère.

– limite supérieure du système (à 2m):

Valeurs des variables, qui sont la température et l'humidité relative à 2 m, T_a et Hr_a . Paramètre : u_a , vitesse du vent à 2m.

– limite inférieure (1m dans le sol) :

T_{100} : Température du sol

θ_{100} : 0,35 (capacité au champ mesurée), cette valeur est maintenue constante par hypothèse

IV.2.4 Sorties du modèle

Nous rappellerons ici les variables particulièrement intéressantes à suivre compte tenu des effets du mulch que nous voulons mettre en évidence :

- profil de température dans le sol et le mulch
- profil d'humidité dans le sol et le mulch
- flux énergétiques à la surface du système (sol ou mulch)

IV.3 Etude de sensibilité du modèle

Cette partie concerne les paramètres physiques caractéristiques du sol ou du mulch inclus dans le modèle. Nous allons dans un premier temps identifier les paramètres les plus sensibles puis, en fonction des résultats de cette étude, nous choisirons le ou les paramètres nécessitant un calage. Il faut limiter le nombre de paramètres à caler si l'on veut conserver un modèle opérationnel. Enfin, les résultats du modèle ainsi modifié seront comparés aux données expérimentales pour la validation au sens strict.

IV.3.1 Principe :

Il consiste à :

- 1 – faire une simulation de "référence" avec les valeurs initiales des paramètres (celles que nous avons énumérées précédemment)
- 2 – introduire une variation connue d'un paramètre
- 3 – comparer les sorties de cette simulation perturbée avec celles de la simulation de référence

IV.3.2 Choix des paramètres :

Nous utiliserons des données expérimentales comme variables de forçage de la simulation. Il faut choisir une période suffisamment longue pour que nos estimations ne soient plus trop dépendantes des conditions initiales. D'autre part, des journées à fort rayonnement maximisant les échanges et donc les risques d'erreur, sont nécessaires. Nous avons utilisé la période du 1er au 6 octobre, la simulation débutant le 1er à 10 heures (mesure du profil d'humidité) et se terminera le 6 à 24 heures. Les comparaisons porteront sur les valeurs obtenues pour la journée du 6.

Les paramètres testés ont des statuts bien différents puisque certains ont été mesurés et d'autres sont tirés de la bibliographie. Notons toutefois que, compte tenu de l'importante variabilité spatiale des milieux envisagés, même les paramètres que nous avons mesurés sont connus avec des intervalles de confiance très larges.

Les paramètres finalement retenus sont :

– pour le sol :

λ_s	:	conductivité thermique
D_{sv}	:	diffusivité de la vapeur d'eau
K_{ss}	:	conductivité hydraulique à saturation
ψ_e	:	potentiel d'entrée d'air

– pour le mulch :

z_m	:	hauteur de rugosité aérodynamique
X	:	coefficient d'atténuation de D_{uv}
λ_u	:	conductivité thermique du mulch

Il faut maintenant fixer la gamme de variations que nous allons imposer aux paramètres. D'après nos données expérimentales, ceux-ci sont connus avec des variabilités différentes. Ainsi, la conductivité thermique est connue à 10% près alors que les paramètres hydrodynamiques peuvent varier du simple au double. Ces gammes sont obtenues grâce à des expérimentations localisées et ne prétendent pas représenter la variabilité spatiale à l'échelle

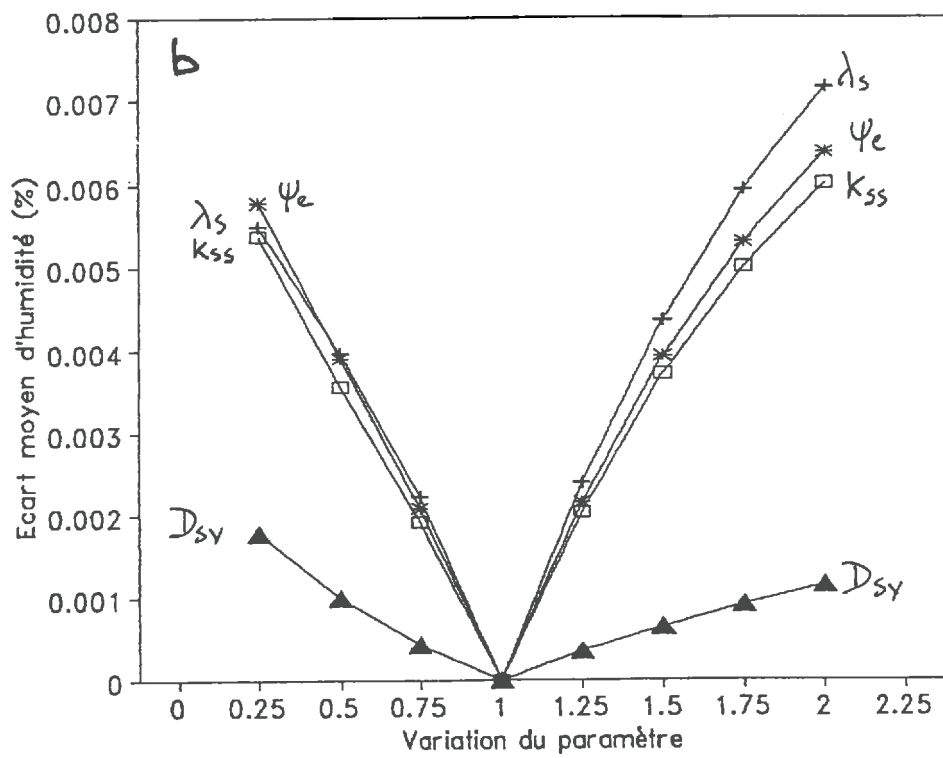
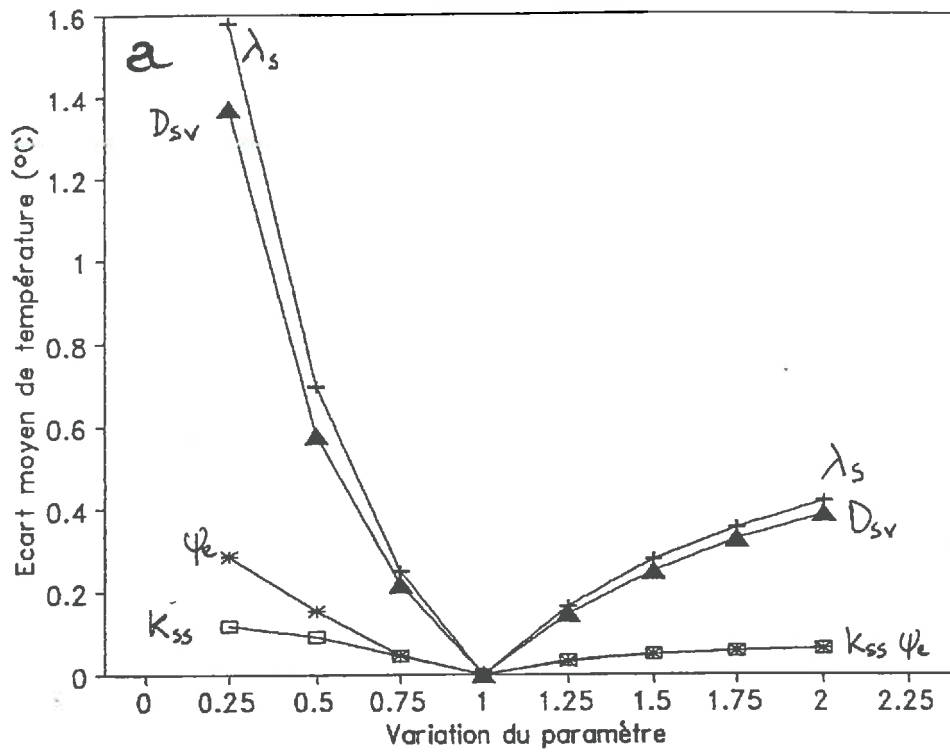


Figure IV.6 : Sensibilité du modèle aux paramètres du sol.

d'une parcelle. La situation idéale serait bien entendu de connaître cette variabilité pour l'ensemble des paramètres que nous voulons tester. Dans un premier temps, afin de pouvoir comparer ces paramètres, nous leur avons imposé des variations identiques allant du quart au double de la valeur initiale.

Les variables de sortie (V_i) sont comparées aux valeurs obtenues par la simulation de référence (V_r) en calculant l'écart moyen :

$$1/n \sum_{i=1}^n (V_i - V_r)$$

Ces variables seront celles qui nous intéressent plus particulièrement dans l'objectif de cette étude :

- les températures dans le sol
- les humidités volumiques du sol

Rappelons enfin qu'une telle analyse ne tient pas compte des interactions éventuelles entre les différents paramètres.

IV.3.3 Résultats

La présentation des résultats adoptée est inspirée de Brunet (1984) (Figure IV.6 et IV.7) : en abscisse est portée la variation du paramètre en pourcentage et en ordonnée la moyenne des écarts. Les graphes présentés concernent les valeurs à cm de profondeur.

Pour l'estimation de la température dans le sol (figures IV.6a et IV.7a), les paramètres importants du sol sont comme l'on pouvait s'y attendre la conductivité thermique (λ_s) et la diffusivité de la vapeur (D_{sv}). Dans le mulch, ce sont la hauteur de rugosité (Z_m) et le coefficient d'atténuation exponentiel des diffusivités (X) qui sont les plus sensibles.

Le profil d'humidité du sol sera influencé de façon identique par les paramètres hydrodynamiques de celui-ci. Le paramètre du mulch sera encore le coefficient X , la hauteur de rugosité apparaissant moins sensible pour l'estimation de cette variable. IV.3.4 Choix de la procédure de calage

L'analyse de sensibilité a porté sur les paramètres dont l'estimation nous était apparue *a priori* incertaine.

Certains sont entièrement tirés de la bibliographie :

$$D_{sv}, X, \lambda_u, Z_m$$

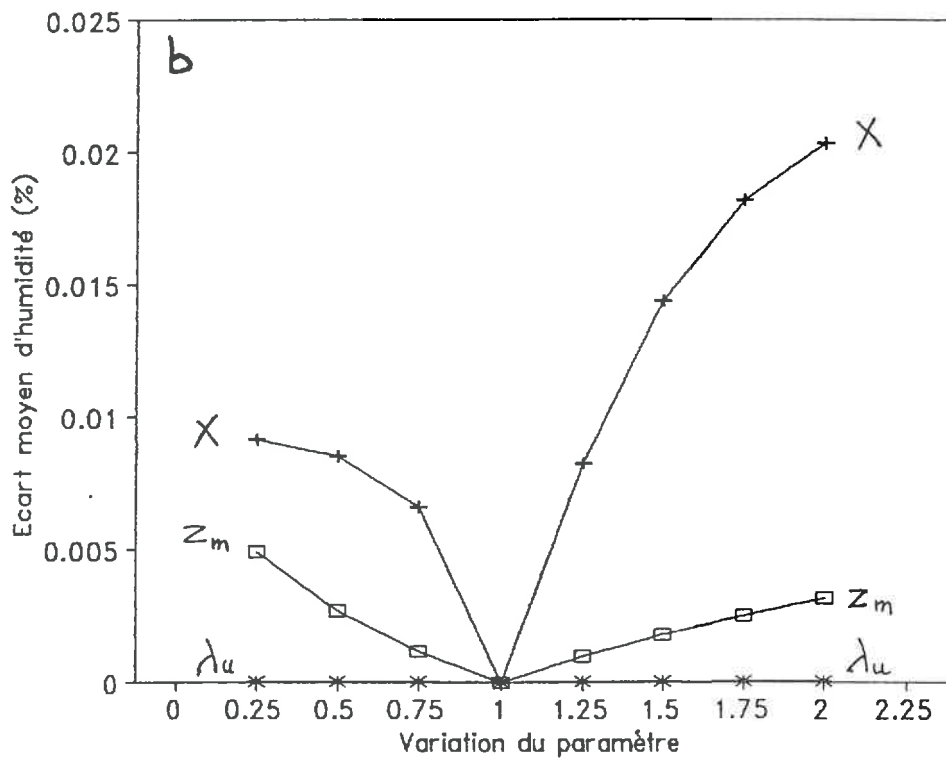
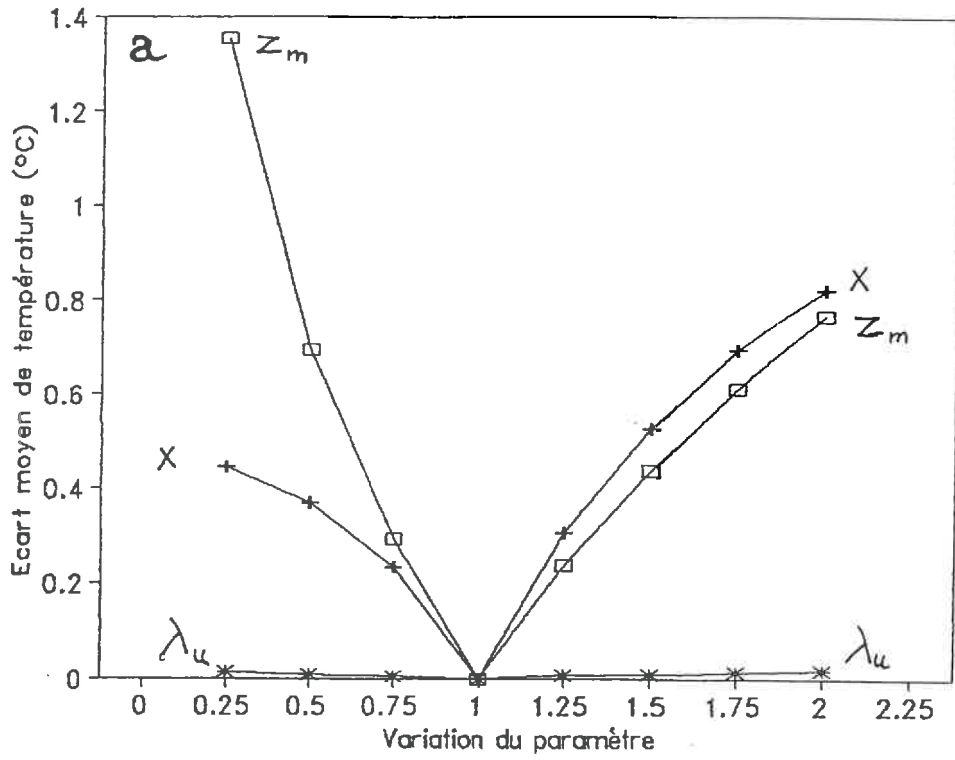


Figure IV.7 : Sensibilité du modèle aux paramètres du mulch.

D'autres ont été mesurés expérimentalement mais conservent une grande part d'incertitude :

$$\psi_e, \lambda_s, K_{ss} .$$

Le modèle semblant moins sensible à D_{sv} et λ_u , nous conserverons leurs valeurs bibliographiques d'origine.

Malgré une certaine sensibilité du modèle à z_m , nous conserverons là encore sa valeur d'origine, considérant que la relation $z_m = 0,13$ epm est effectivement applicable. Si l'on veut avoir un modèle opérationnel, le nombre de paramètres à caler doit être limité, nous nous sommes donc fixés 2 paramètres, un dans le sol et un dans le mulch. Finalement, comme nous ne désespérons pas d'obtenir des estimations fiables des paramètres hydrodynamiques du sol, nous effectuerons pour ce compartiment le calage sur la conductivité thermique. Dans le mulch, l'ensemble des coefficients de transfert reste à déterminer expérimentalement, ces mesures nécessitant d'ailleurs une méthodologie particulière. Nous effectuerons le calage sur un paramètre très mal connu et influant simultanément sur les transferts thermiques et hydriques : le coefficient d'affinité pour les diffusivités dans le mulch (X).

IV.4 Calage du modèle

IV.4.1 Choix de la période de calage

Les conditions nécessaires pour obtenir un bon calage du modèle sont :

- une gamme assez large d'évolution de l'humidité du sol nu pour l'ajustement de la conductivité thermique du sol
- des conditions de fort rayonnement pour obtenir des évolutions de température marquées au cours de la journée
- la présence de l'ensemble des données expérimentales (notamment pour avoir l'estimation de toutes les composantes du rayonnement incident)

La période du 12 au 14 octobre 1990 répond à ces exigences : elle suit une période de forte pluviométrie, les précipitations se terminant le 11 octobre à 20 heures avec notamment 160 mm pour cette dernière journée. Ce phénomène nous a permis de pallier l'absence de mesure du profil initial d'humidité du sol en considérant celui-ci comme saturé ($\theta = 0,61$) sur l'ensemble du profil. Le 14 octobre est une belle journée à fort rayonnement (22,8 MJ). La simulation continue jusqu'au 15 octobre à 10 heures afin de comparer les profils finaux d'humidité.

IV.4.2 Compartiment sol

IV.4.2.1 Comparaison initiale

IV.4.2.1.1 Profil d'humidité

Les profils d'humidité du sol entre 0 et 20 cm de profondeur sont représentés par la figure IV.8. On observe globalement un bon accord entre les valeurs prédites par le modèle et les mesures (les points expérimentaux sont présentés comme les moyennes des 5 prélèvements assorties de leurs écarts-types). Il semble qu'il y ait une surestimation par le modèle des teneurs en eau dans les 5 premiers centimètres et une sous-estimation en dessous, ceci est peut-être dû à l'estimation hypothétique du profil initial.

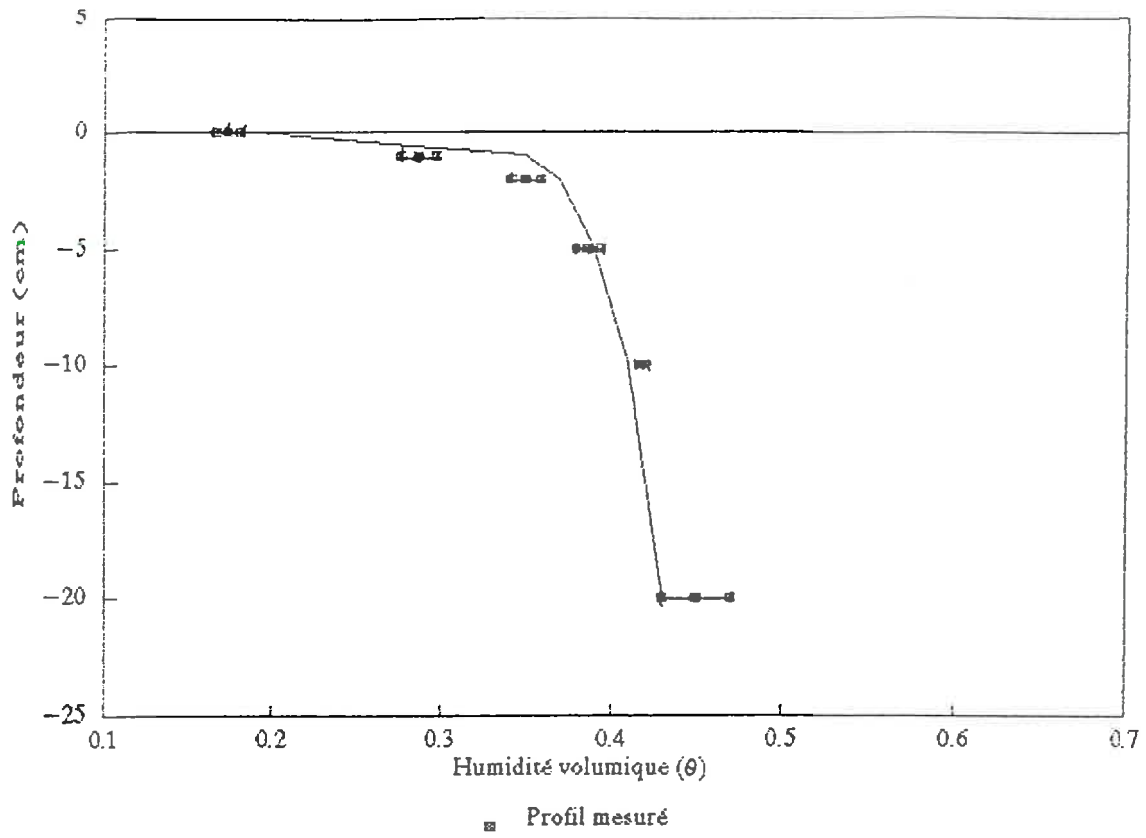


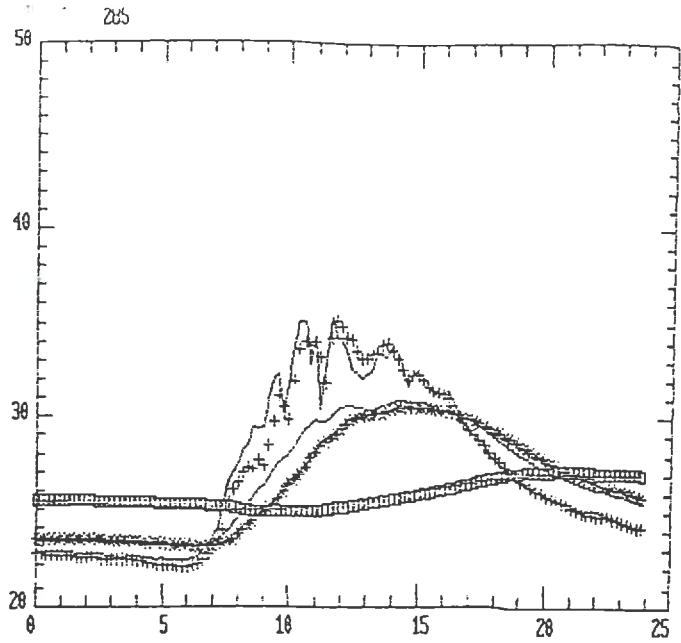
Figure IV.8 : Profil d'humidité du sol mesuré et calculé par le modèle avant calage (sol nu 15 octobre, 10h).

12 octobre

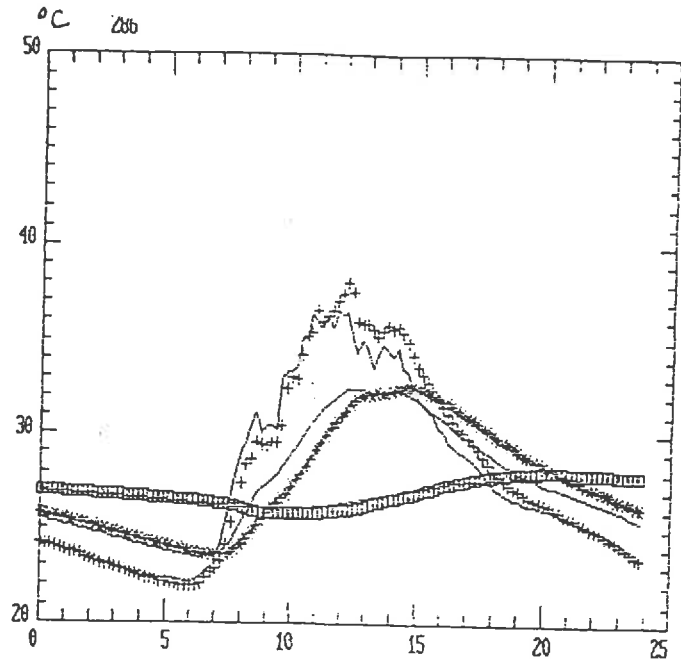
Mesures :

- + : température à 1 cm
- * : température à 5 cm
- : température à 20 cm

Modèle : —



13 octobre



14 octobre

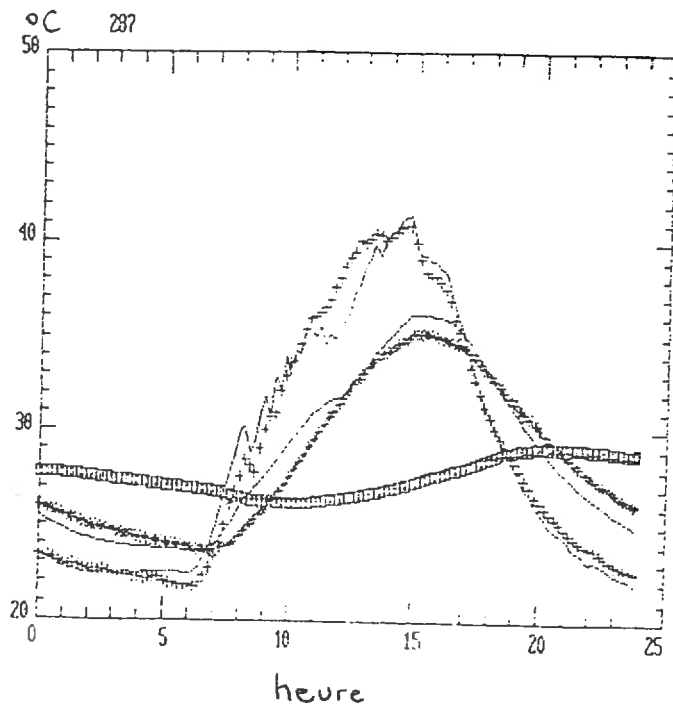
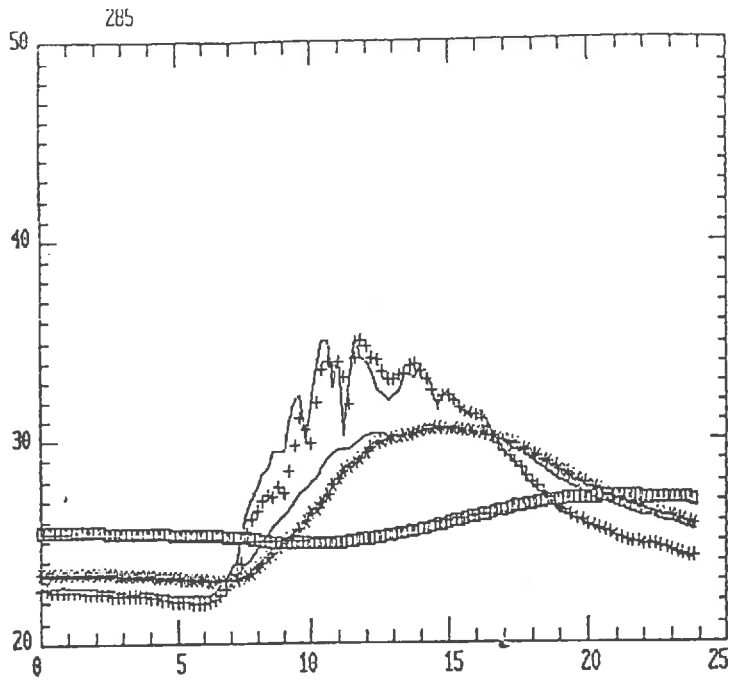


Figure IV.9 : Evolution des températures dans le sol nu mesurées et calculées. (avant calage).

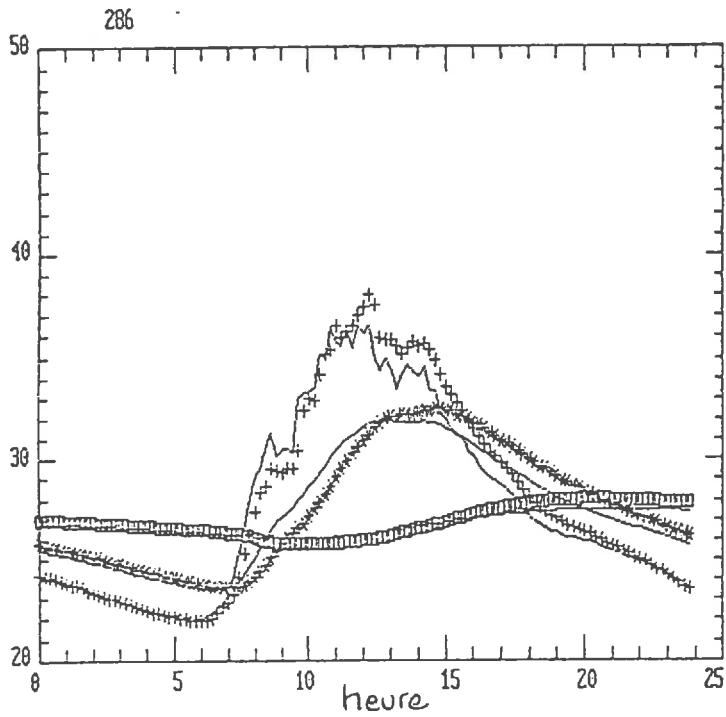


12 octobre

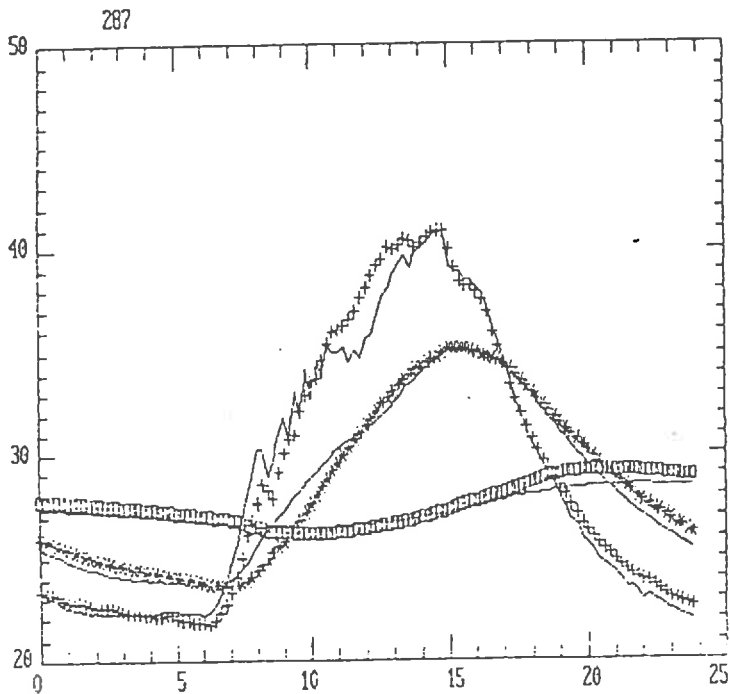
Mesures :

- + : température à 1 cm
- * : température à 5 cm
- : température à 20 cm

Modèle : —



13 octobre



14 octobre

Figure IV.10 : Evolution des températures dans le sol nu mesurées et calculées. (après calage).

Pour conclure, nous considérons que le modèle fonctionne correctement et que nous pouvons conserver les valeurs initiales des paramètres hydrodynamiques du sol comme cela était prévu. Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué, la simulation du comportement hydrique du sol doit pouvoir être améliorée avec une meilleure détermination expérimentale de ses paramètres.

IV.4.2.1.2 Evolution des températures

Nous avons seulement pris en considération les températures à 3 niveaux dans le sol : les deux profondeurs extrêmes (1 et 20 cm compte tenu des réserves émises sur la fiabilité de la mesure de la température de surface) et une profondeur intermédiaire, 5 cm.

Les résultats sont résumés dans la figure IV.9. Nous remarquons un bon comportement du modèle, l'écart maximum entre modèle et mesure est de 3 °C (le 14 octobre à 1 cm).

A 1 cm : il y a surestimation systématique du lever du jour jusque vers 10 heures puis une sous-estimation systématique plus marquée entre 10 et 13 heures le 14 octobre et qui dure jusqu'à 20 heures le 14 octobre.

A 5 cm : surestimation systématique du lever du jour à 12 heures puis une légère sous-estimation l'après-midi.

A 20 cm : l'estimation est à +/- 0,5 °C près, les variations simulées semblent un peu trop amorties.

En faisant varier la conductivité thermique, nous pouvons espérer diminuer certains écarts qui apparaissent en particulier lorsque le sol est plus sec (14 octobre de 12 h à 17 h à 5 cm).

La réduction des décalages observés avant midi nécessiterait des intégrations à des pas de temps plus fins. Toutefois, cela alourdirait les calculs même en utilisant un pas de temps variable. De telles modifications seraient disproportionnées compte tenu des simplifications réalisées par ailleurs et donc, en accord avec les objectifs de cette étude, nous en resterons là. Il est même plutôt rassurant de constater que cette partie du modèle pourrait être employée directement avec les valeurs d'origine des paramètres.

IV.4.2.2 Calage de la conductivité thermique

Le calage est donc effectué sur les 12, 13 et 14 octobre par comparaison graphique. Nous avons cherché en particulier à mieux restituer le comportement thermique lorsque le sol s'assèche (14 octobre 1 - 5 cm), les conductivités aux plus fortes teneur en eau (20 cm) semblant correctement évaluées.

L'évolution des températures, après calage, est présentée dans la figure IV.10. Il y a peu d'amélioration par rapport aux graphiques précédents. L'évolution de la température à 5 cm et, dans une moindre mesure, celle à 1 cm est légèrement plus proche de celle mesurée expérimentalement (13 et 14 octobre). La nouvelle valeur de conductivité thermique obtenue est donc peu différente de notre estimation initiale :

$$0,25 < \theta < 0,5 \quad \lambda_s = 4\theta - 0,8$$

Il n'y a pas eu, après calage de la conductivité thermique, de modification de l'estimation du profil d'humidité (cf. figure IV.8).

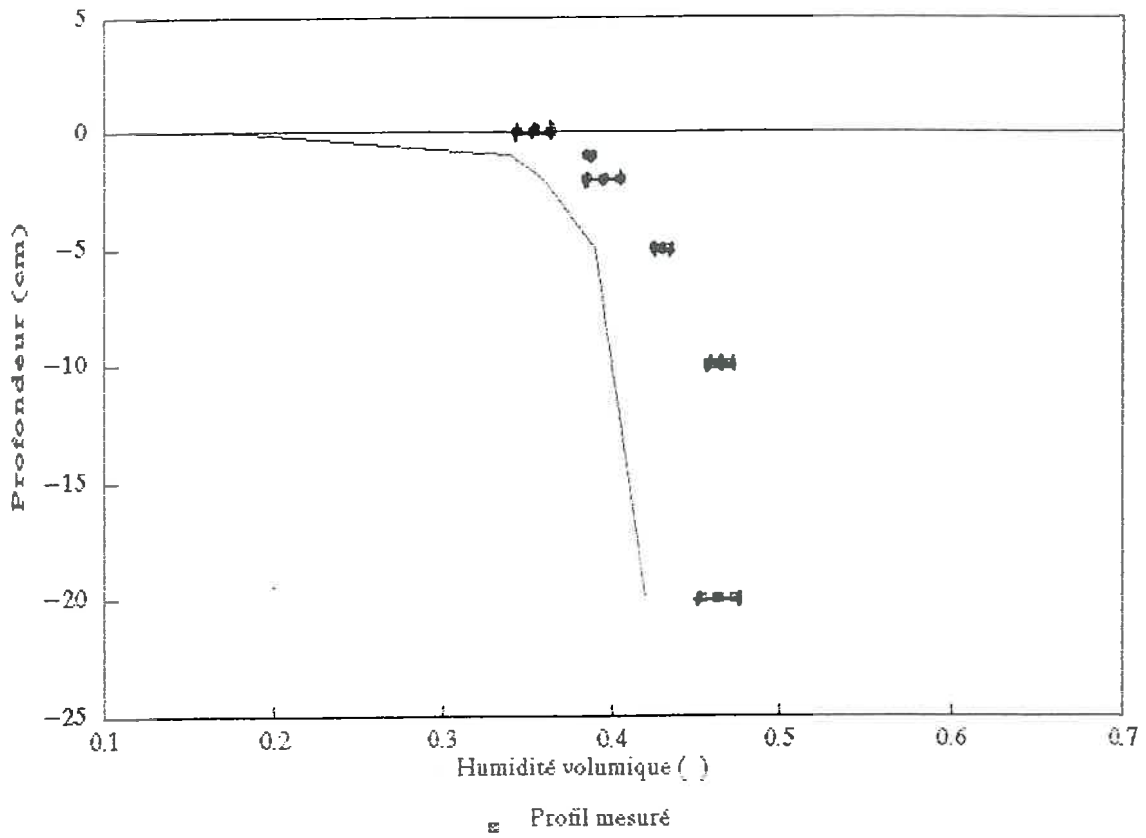


Figure IV.11 : Profil d'humidité du sol sous le mulch, mesuré et calculé par le modèle avant calage (15 octobre, 10h).

IV.4.3 Calage du modèle complet

IV.4.3.1 Comparaison initiale

IV.4.3.1.1 Profil d'humidité

Les hypothèses utilisées pour le calage du modèle complet sont les mêmes que celles employées pour le sol nu : mulch et sol sont saturés à la fin des pluies du 11 octobre.

Le profil d'humidité du sol mesuré et estimé le 15 octobre à 10 h sont représentés sur la figure IV.11, on remarque une importante sous-estimation par le modèle des teneurs en eau à toutes les profondeurs.

IV.4.3.1.2 Evolution des températures

Pour la même période, les évolutions des températures sont représentées en figure IV.13. Nous avons fait figurer les températures mesurées à la base du mulch et les deux extrêmes dans le sol : 1 cm et 10 cm de profondeur.

Le modèle surestime les températures à tous les niveaux, ce défaut va dans le même sens que celui observé pour l'estimation des teneurs en eau du sol : les coefficients de transfert dans le mulch sont trop importants.

IV.4.3.2 Calage des diffusivités dans le mulch

Le calage des diffusivités dans le mulch a été réalisé graphiquement à partir des profils de température, comme cela avait été fait pour la conductivité thermique du sol. Rappelons que le calage porte sur le paramètre X dans les expressions :

$$D_{uv}(z) = D_{uv}(0) \exp\{ X(z/0,1 - 1) \}$$

$$D_{uc}(z) = D_{uc}(0) \exp\{ X(z/0,1 - 1) \}$$

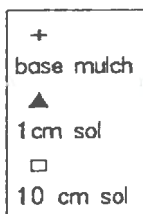
dont la valeur initiale est $X = 2,5$.

La figure IV.13 représente l'évolution des températures pour $X = 8$. Les transferts sont fortement réduits. Les températures maximales dans le sol sont correctement restituées ; par contre, on observe l'apparition d'un déphasage entre les températures mesurées et estimées qui s'amplifie du 12 au 14 octobre. Les températures nocturnes sont surestimées à 1 cm dans le sol alors qu'elle restent à un niveau correct à 10 cm.

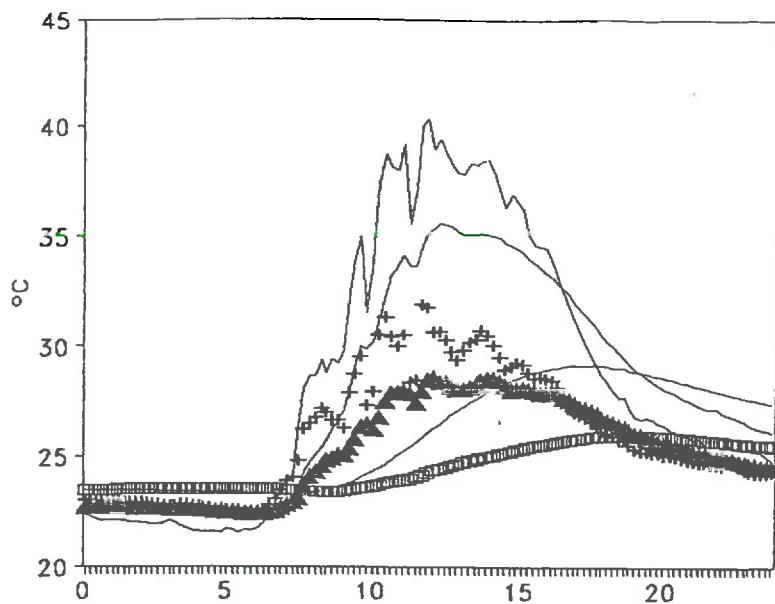
Cette dernière remarque pourrait suggérer que l'hypothèse selon laquelle les propriétés thermiques du sol sont identiques en sol nu et en sol mulché n'est pas valable et que la conductivité thermique calculée précédemment n'est pas utilisable en l'état pour le sol mulché. En effet, les surfaces de sol nu et protégées par le mulch subissent des contraintes différentes (précipitations, dessèchement). Nous pouvons ainsi craindre des évolutions structurales

12 octobre

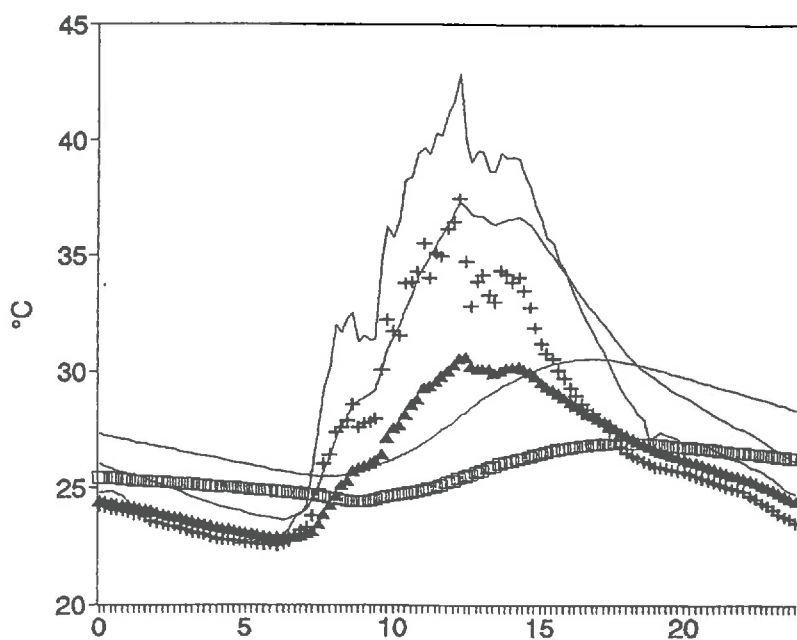
Mesures :



Modèle : —



13 octobre



14 octobre

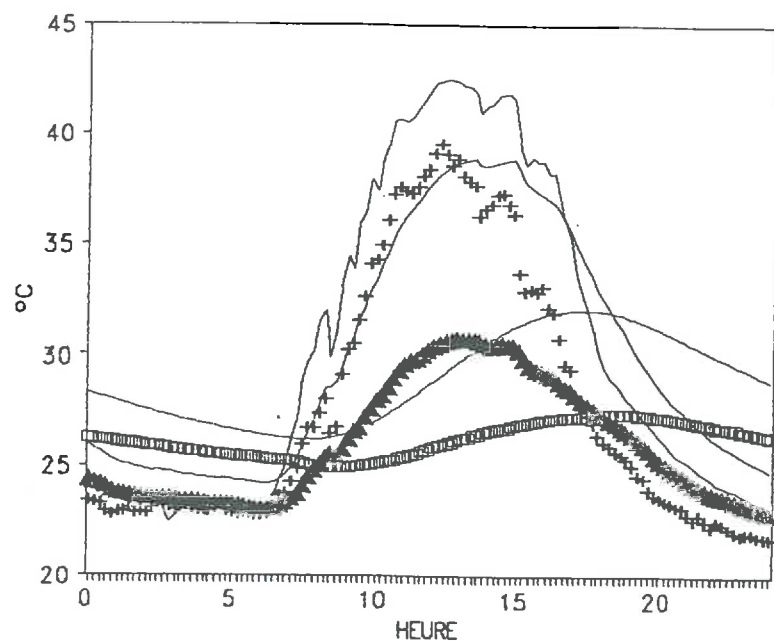
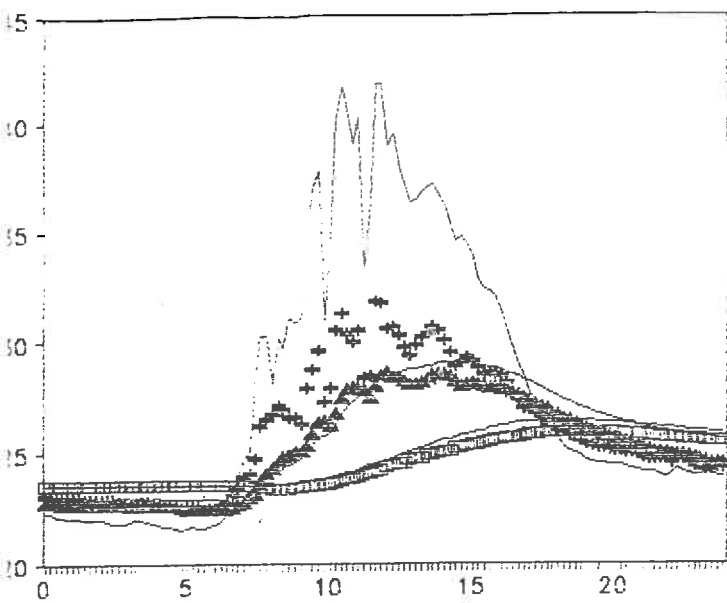
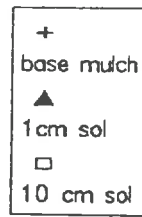


Figure IV.12 : Evolution des températures dans le mulch et dans le sol (avant calage).

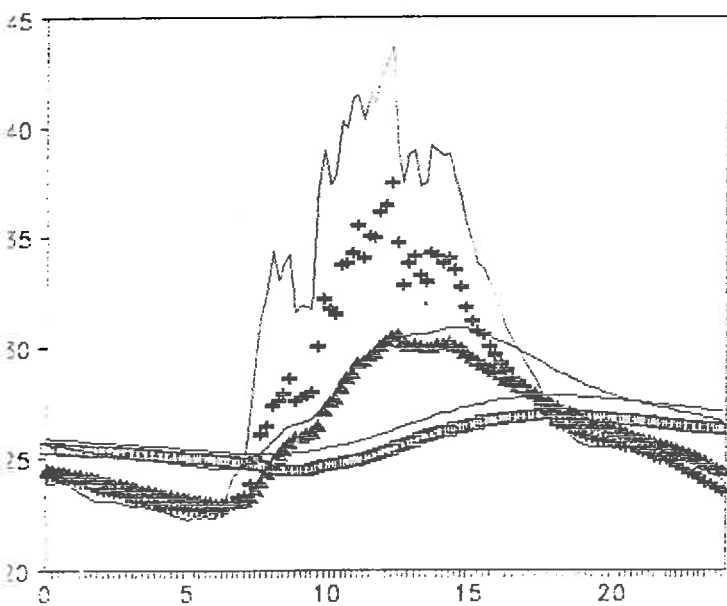


12 octobre

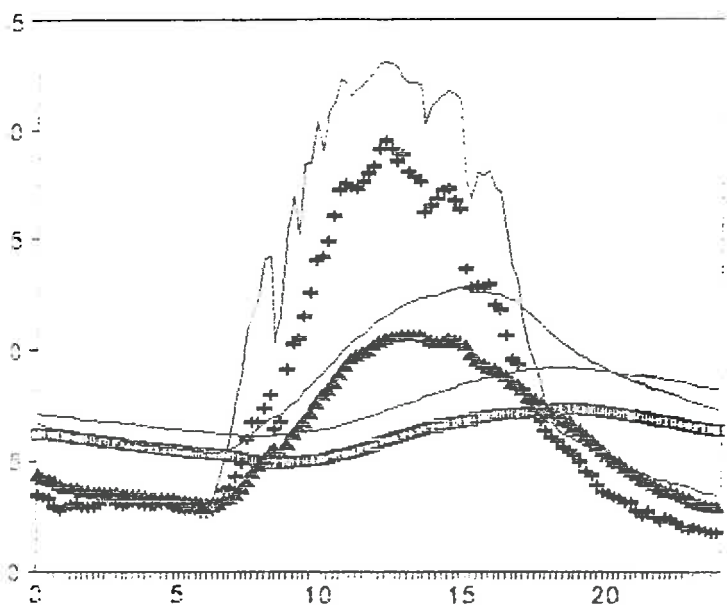
Mesures :



Modèle : —



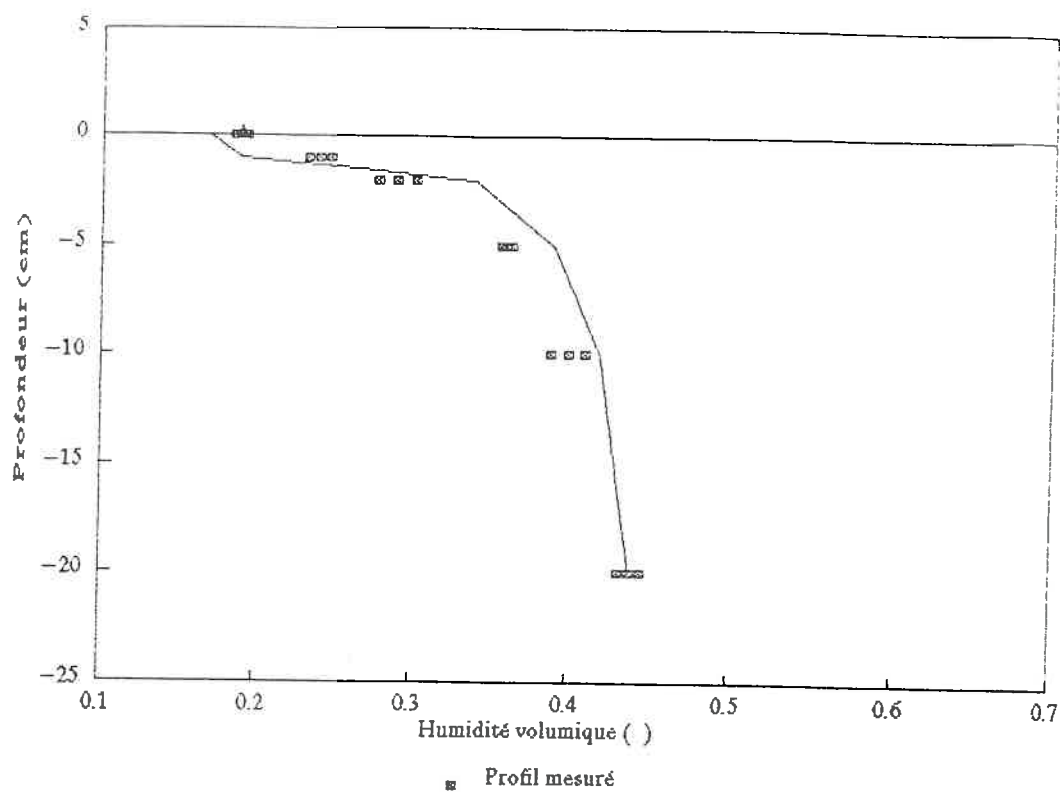
13 octobre



14 octobre

Figure IV.13 : Evolution des températures dans le mulch et dans le sol (après calage).

16 octobre



17 octobre

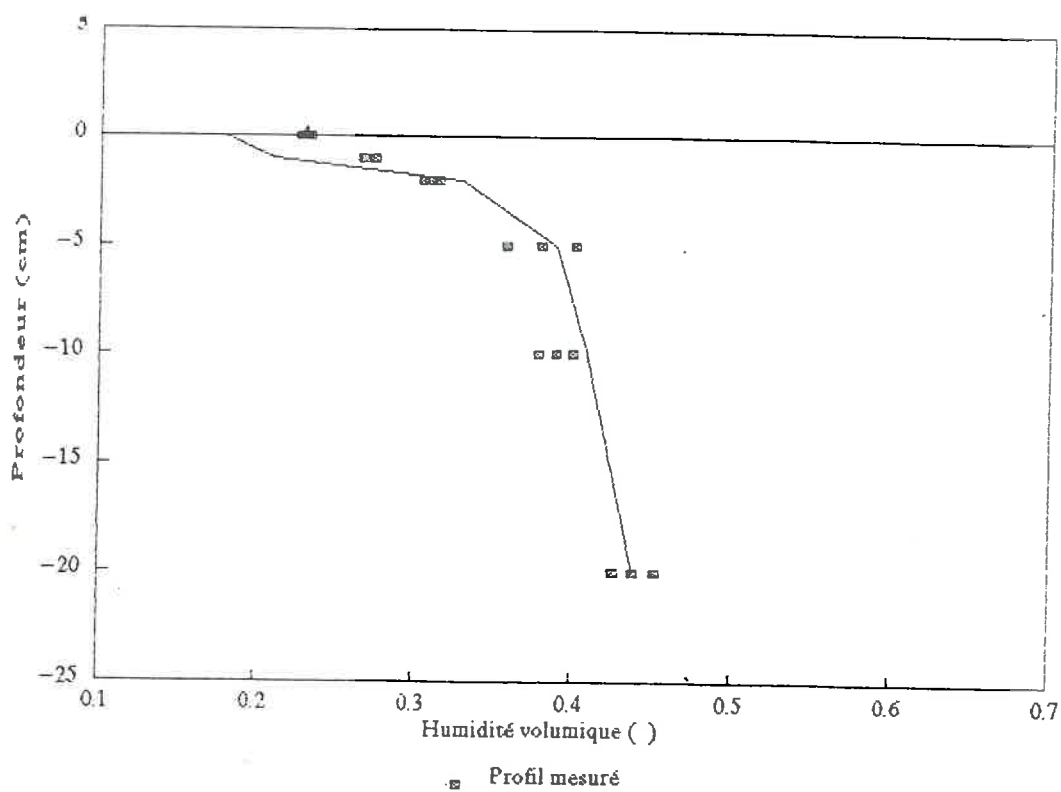
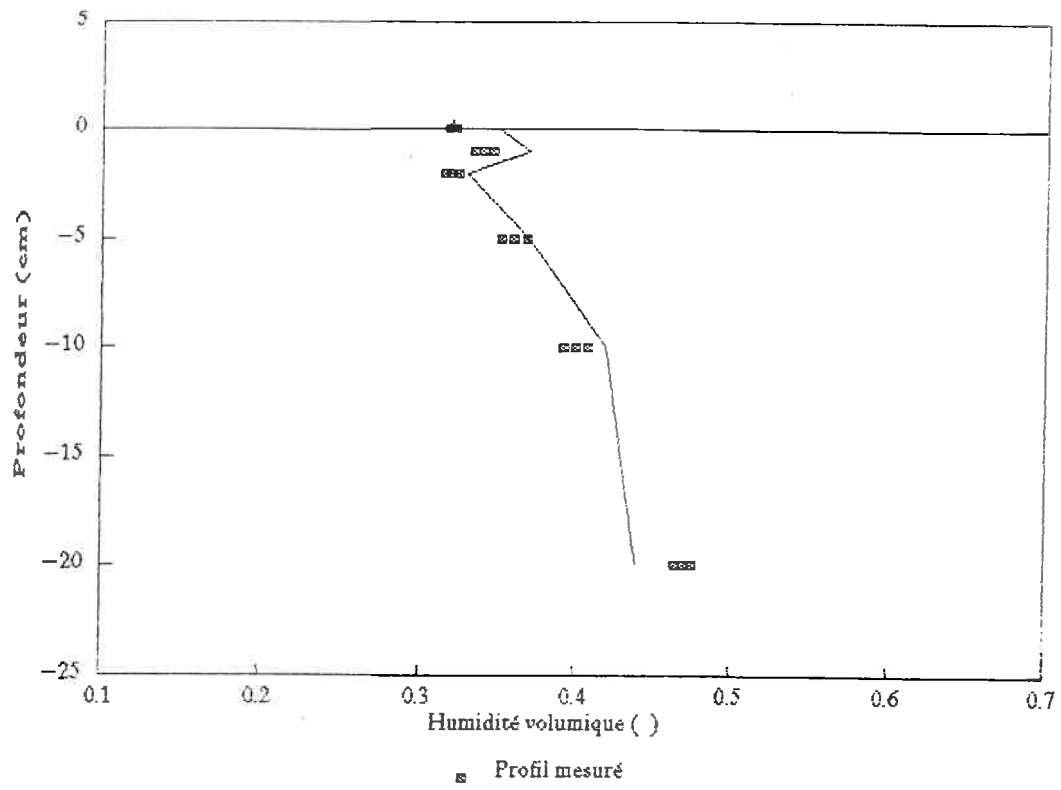
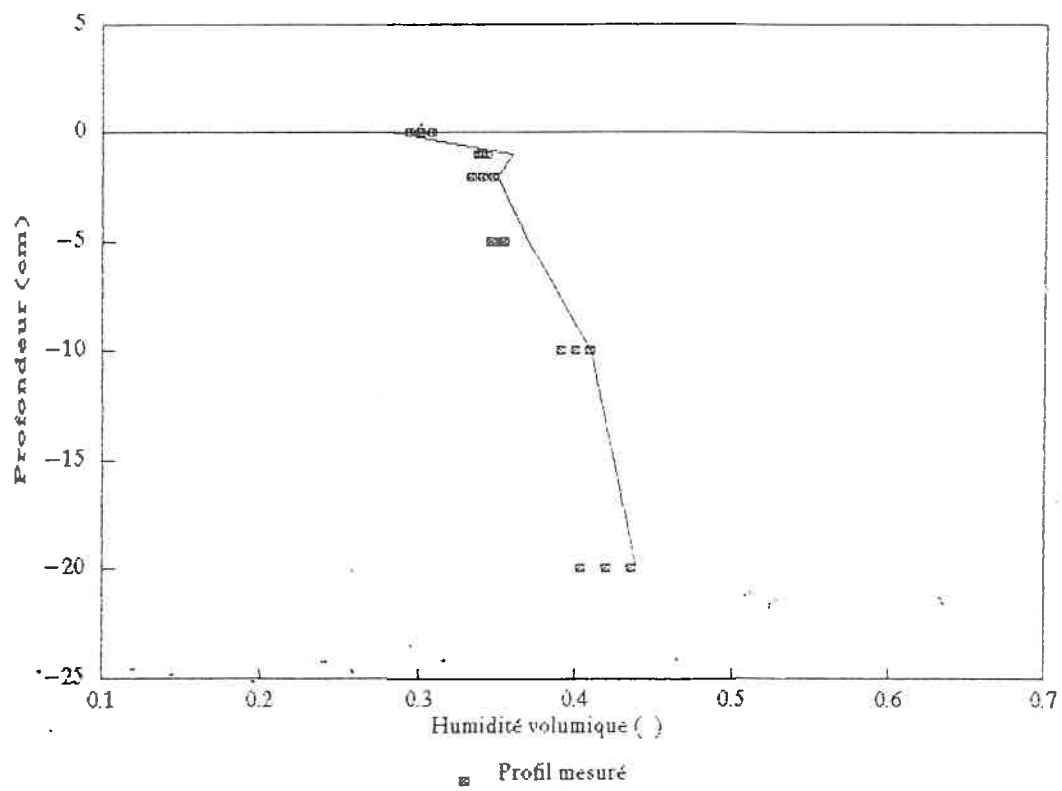


Figure IV.14 : Comparaison des profils de teneur en eau calculée et mesurés en sol nu à 10 h (validation).

18 octobre



19 octobre



Mesures :

- + : 1 cm
- * : 5 cm
- : 20 cm
- : modèle

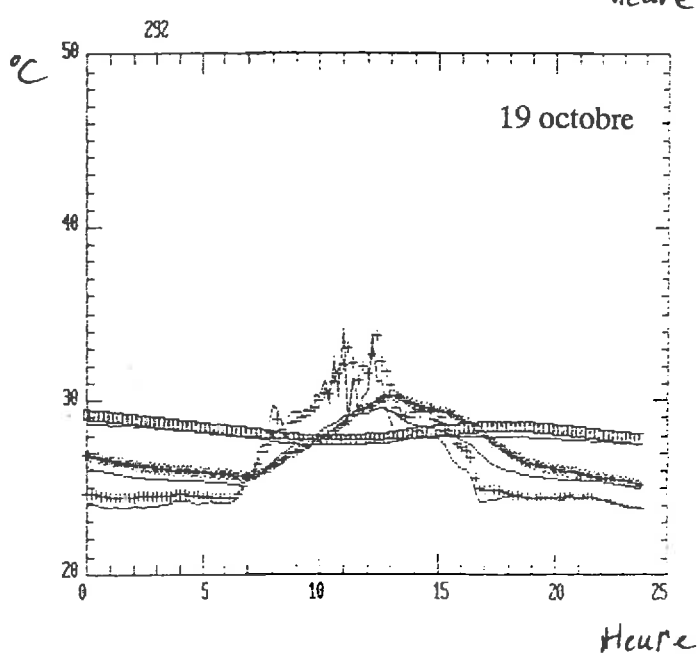
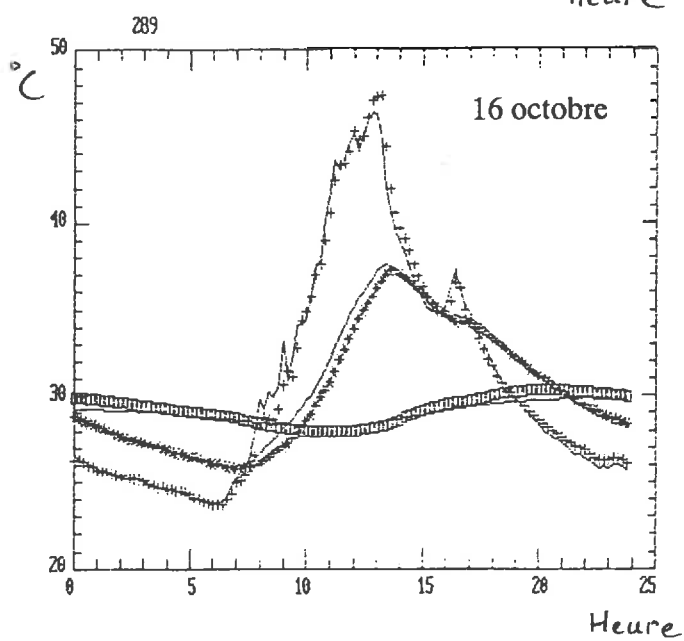
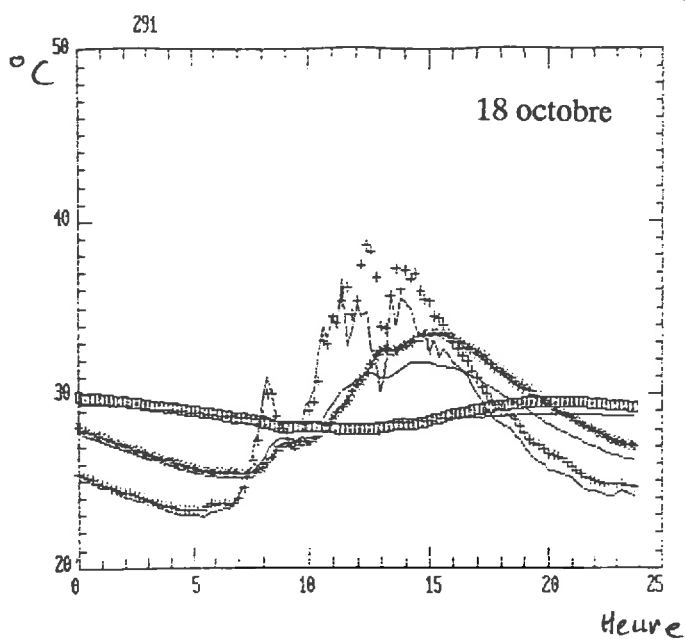
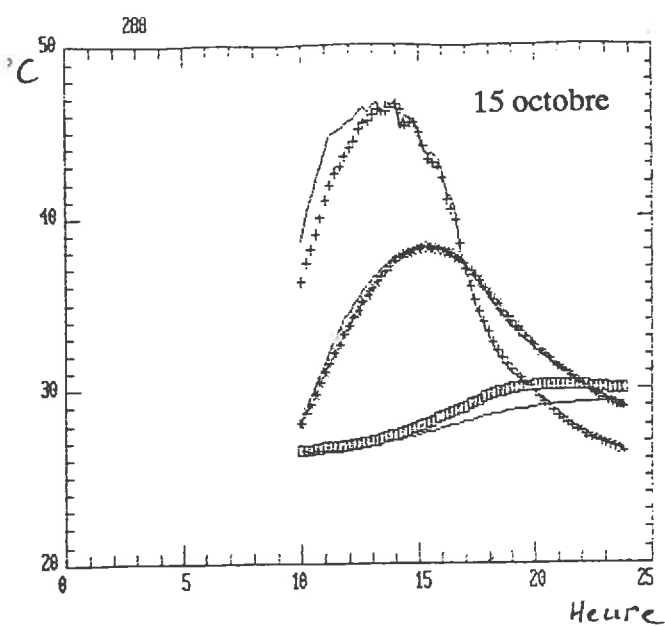
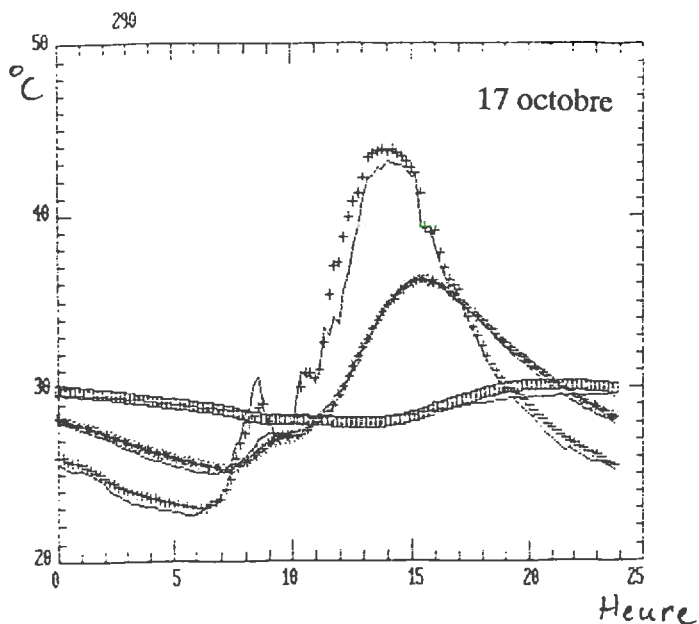


Figure IV.15 : Comparaison des évolutions journalières de température calculées et simulées a trois profondeurs en sol nu (validation).

différentes sur les deux parcelles entraînant une modification des propriétés thermiques de la couche superficielle du sol.

D'autre part, la conductivité thermique du mulch λ_m devient le coefficient de transfert prépondérant en dehors des transferts radiatifs et est probablement surévaluée (au moins près de l'interface mulch-atmosphère). En effet, les valeurs utilisées sont attribuées à des litières forestières certainement plus compactes que le mulch. Les transferts radiatifs, notamment dans l'infra-rouge thermique sont peut être surévalués.

Dans le mulch, où les températures sont surévaluées avant calage et sous-évaluées après, il subsiste un doute sur la validité de la mesure. En effet, elle a été réalisée à l'aide de 5 thermocouples placés en série dans l'air, sans ventilation qui, compte tenu de l'hétérogénéité spatiale du milieu, ne fournissent certainement pas un échantillonnage suffisant pour une mesure de température moyenne.

IV.5 Validation

IV.5.1 Choix de la période

Nous avons choisi une période qui, en plus de la totalité des mesures micrométéorologiques nécessaires pouvait nous fournir :

- un suivi régulier des profils d'humidité dans le sol
- des situations climatiques variées (belles journées ensoleillées et journées maussades avec éventuellement des précipitations)

La période du 15 au 19 octobre répond à ces critères :

Date	RG journalier MJ/jour	Précipitations mm/jour
15/10	22,9	0
16/10	16,6	0,5
17/10	17,6	0,5
18/10	15,6	5,5
19/10	8,2	22,5

Les simulations débuteront donc le 15 octobre 1990 à 10 heures et s'arrêteront le 19 octobre à 24 heures.

- + : rayonnement net
 - * : flux de chaleur latente
 - × : flux de chaleur dans le sol
 - : flux
- } mesurés
- calculés

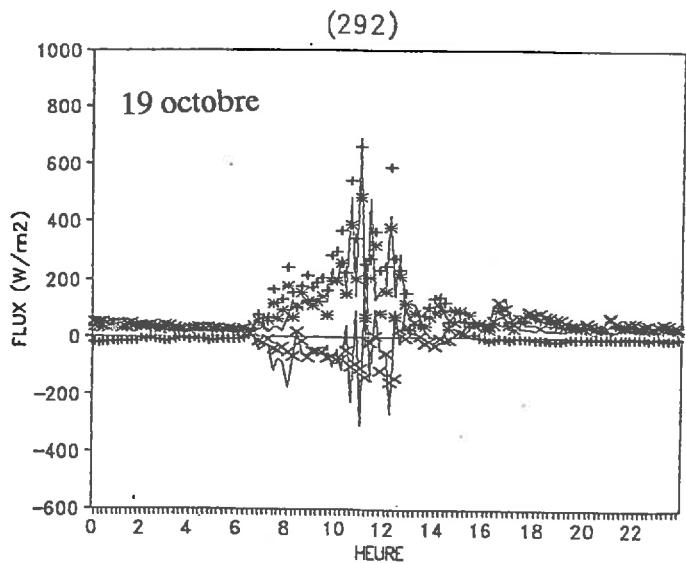
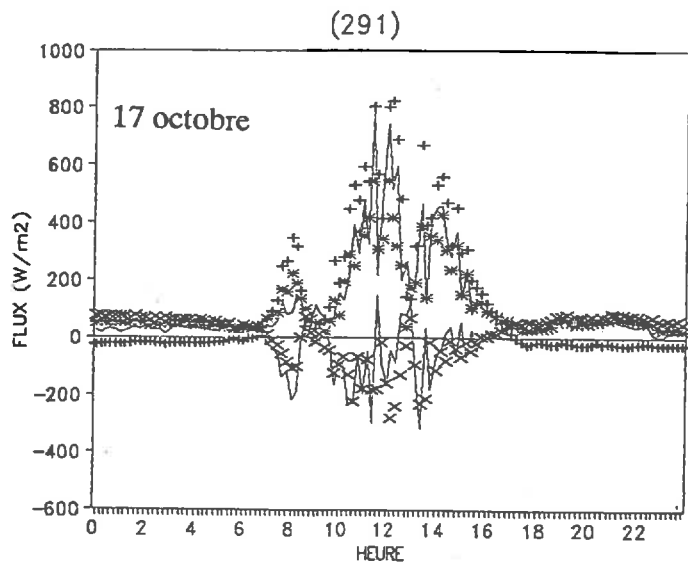
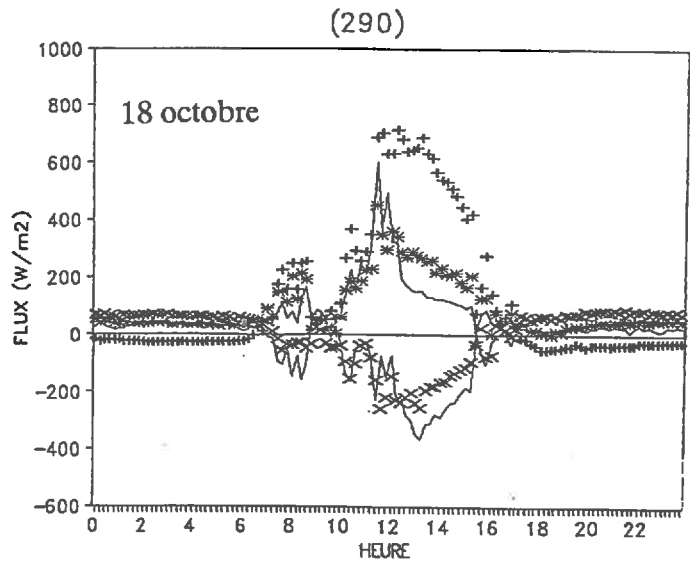
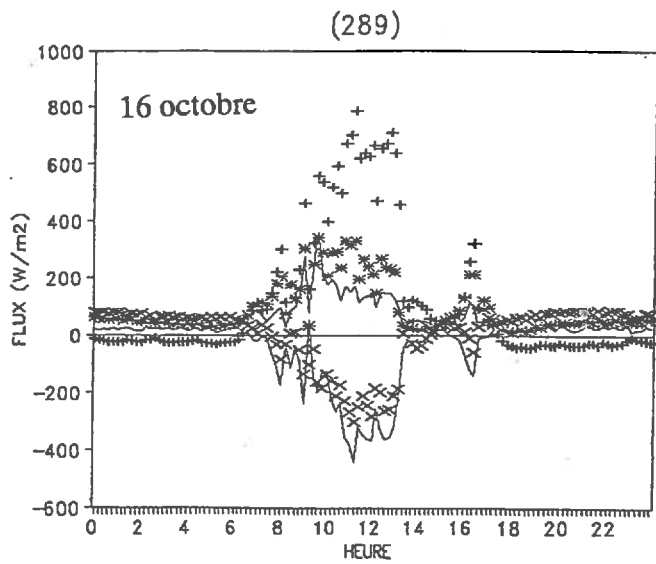


Figure IV.16 : Evolution journalière du rayonnement net mesuré et des flux de chaleur latente et de chaleur dans le sol calculés et mesurés sur sol nu.

IV.5.2 Sur sol nu

IV.5.2.1 Comparaison des profils d'humidité

Les profils d'humidité mesurés à 10 h, pour chaque jour de la simulation sont présentés sur la figure IV.14.

Pour les 16 et 17 octobre, les précipitations ont été négligeables, on observe une sous-estimation par le modèle des humidités de la couche superficielle du sol (entre 0 et 1,5 cm de profondeur environ). De même, le modèle surestime (au plus de 5 %) pendant les deux jours l'humidité entre 2 et 20 cm.

Cette tendance pourrait s'expliquer par le fait que l'on a une mauvaise estimation de la vitesse de diffusion de l'eau dans le sol avec le modèle : la surface n'est pas suffisamment réalimentée par les couches plus profondes.

Bien que peu variable, l'humidité à 20 cm est par contre bien estimée par le modèle ce qui tendrait à prouver que la condition à la limite inférieure ($\theta = 0,35$ soit $\psi_s = 1$ bar) simule correctement la réalité.

Les 18 et 19 octobre, des pluies ont réhumecté la surface (respectivement 3,5 et 1,5 mm) quelques heures avant la mesure. Dans les 2 premiers centimètres, le modèle restitue correctement l'allure générale du profil de teneur en eau, la valeur de l'humidité de surface est fortement surestimée le 18 octobre alors qu'elle semble correcte le 19. Le modèle surestime toujours les humidités en dessous de 5 cm de profondeur.

Pour l'ensemble des journées, l'allure générale du profil est bien représentée par le modèle.

La forte humidité mesurée à 20 cm le 18 octobre est surprenante (+ 0,05) et n'a pour le moment pas d'explication.

IV.5.2.2 Comparaison des évolutions de température

Les évolutions mesurées et estimées sont représentées pour chaque jour de la simulation (figure IV.15), on a globalement un bon accord entre le modèle et les mesures. Les écarts maximum (toujours lors de brusques variations de température) sont de 3°C.

Pour l'ensemble des journées, on a toujours une sous-estimation des amplitudes à 20 cm.

A 1 cm : on a une estimation correcte pendant les belles journées et une sous-estimation à partir de 12 h les 18 et 19 octobre. On remarque une tendance à la sous-estimation à partir de 12 h pour l'ensemble des journées (le décrochement est bien visible le 17 octobre). Cette tendance était déjà visible lors du calage, on peut là encore incriminer une mauvaise estimation de la conductivité thermique aux très faibles humidités (entre la surface et 1 cm de profondeur).

A 5 cm : les évolutions sont correctement modélisées les 3 premiers jours, mais on a par contre une sous-estimation systématique à partir de 12 h les 18 et 19 octobre.

Nous considérerons à l'issue de cette confrontation que le modèle restitue correctement les évolutions de température en sol nu.

- + : base du mulch
- * : 1 cm dans le mulch
- : 20 cm dans le mulch
- : modèle

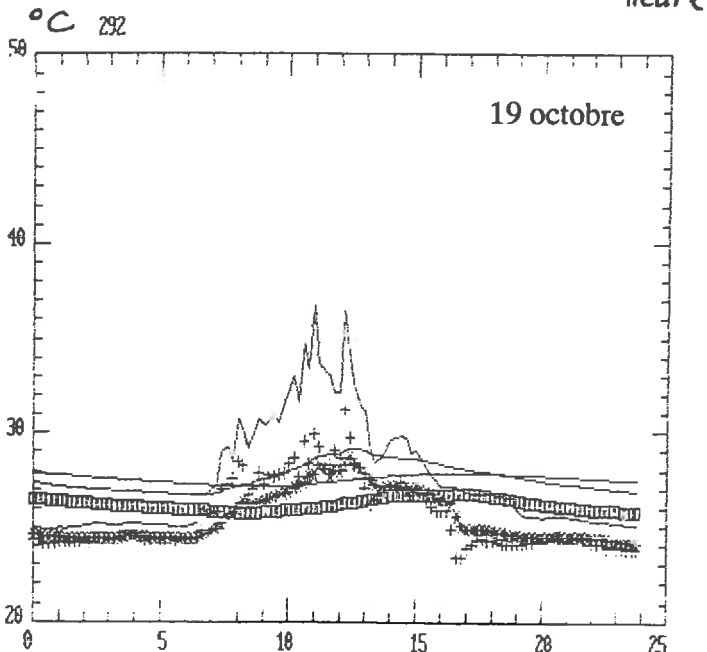
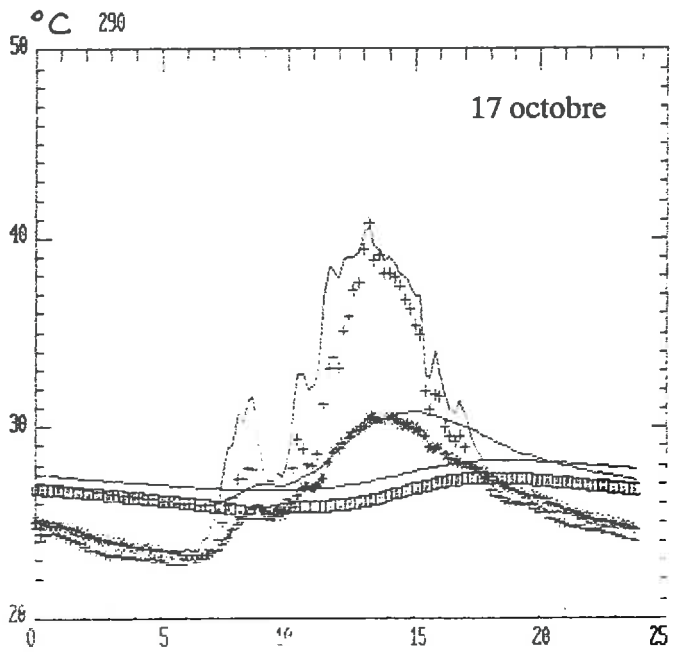
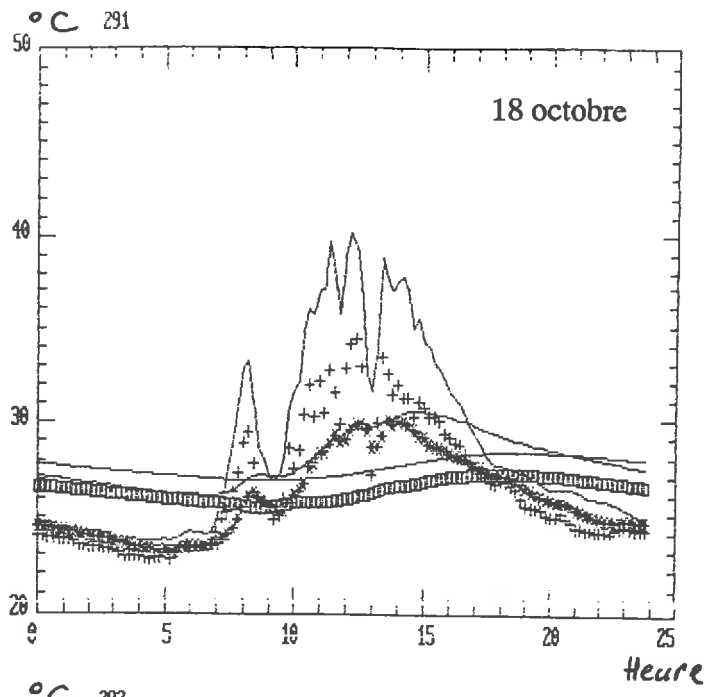
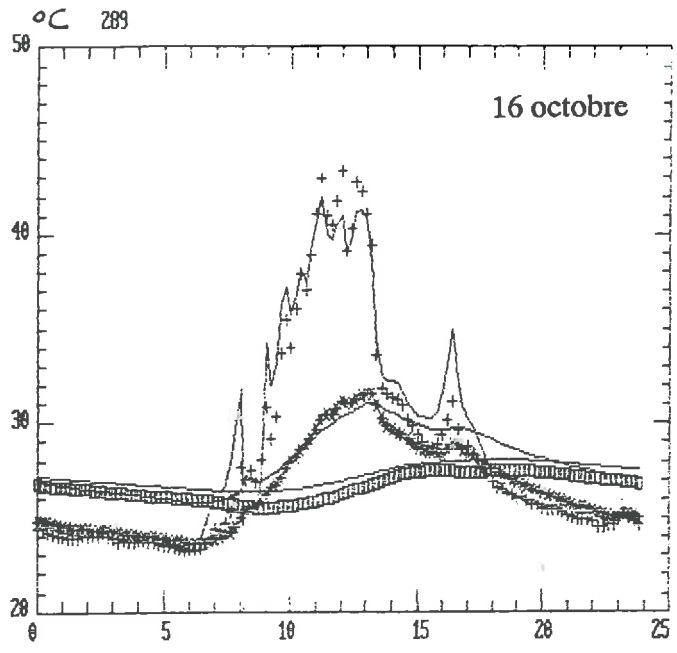
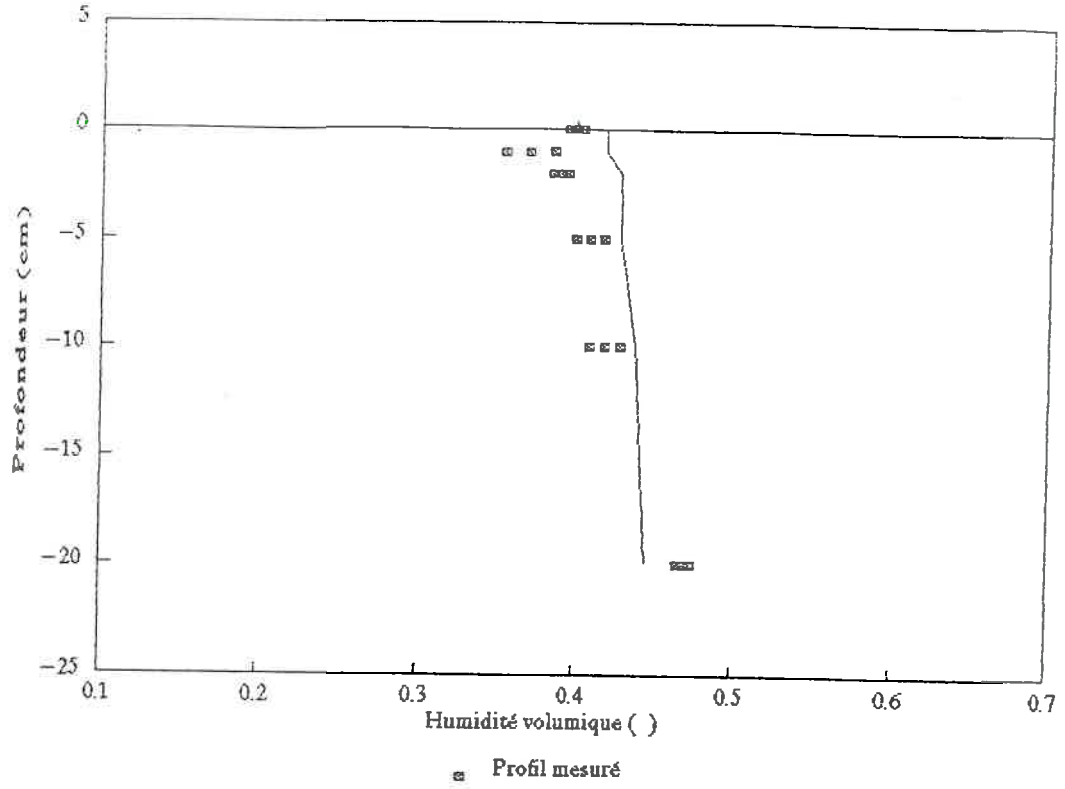


Figure IV.17 : Evolution journalière des températures mesurées et simulées dans le mulch et le sol.

18 octobre



19 octobre

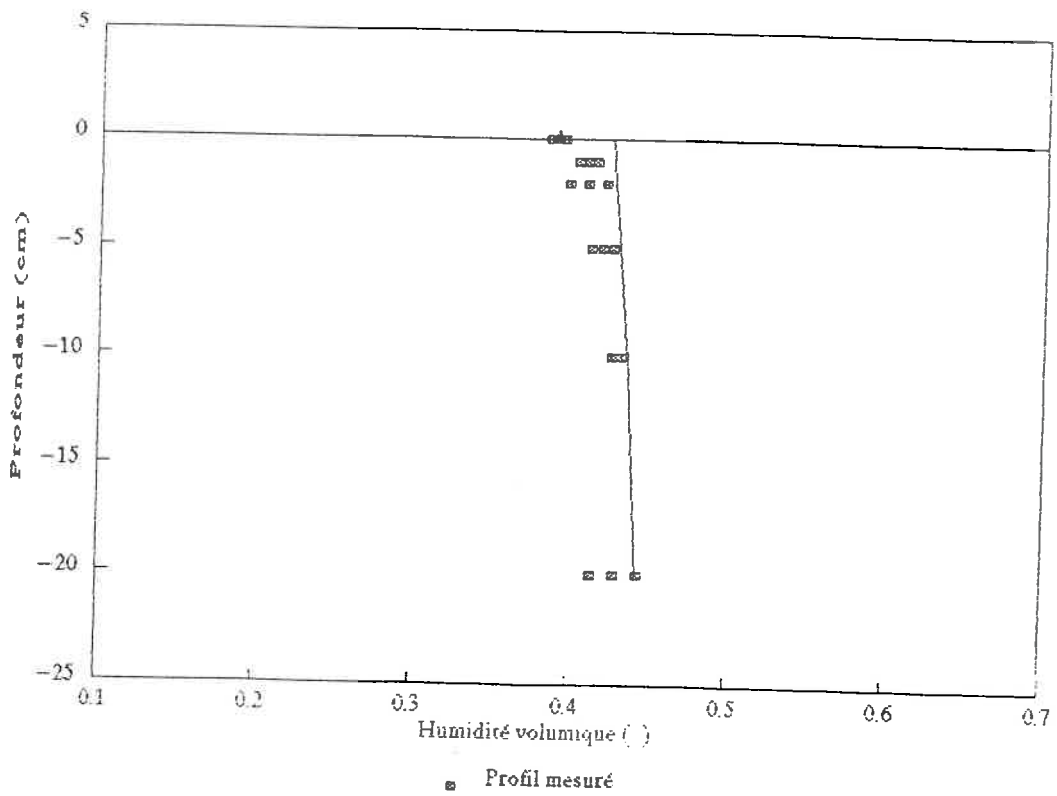


Figure IV.18 b Comparaison des profils d'humidité mesurés et calculé en sol mulché (suite).

IV.5.2.3 Comparaison des flux de chaleur latente

Les flux convectifs à la surface du sol ont été estimés par la méthode mixte décrite en annexe A3, la méthode du rapport de Bowen (décrite dans la même annexe) ayant donné parfois des résultats aberrants (flux de chaleur sensible supérieur au rayonnement net). Ces résultats ne sont pas surprenants compte tenu de la taille de nos parcelles et pour les mêmes raisons, il faudra interpréter avec prudence les résultats obtenus avec la méthode mixte.

Les graphiques représentent le rayonnement net mesuré, les flux de chaleur latente et de chaleur dans le sol, estimés et mesurés qui ont un intérêt particulier puisqu'ils correspondent à l'évaporation du sol qui est une sortie importante du modèle (figure IV.16).

Le 16 octobre, le flux de chaleur dans le sol, légèrement surestimé entraîne une sous-estimation du flux de chaleur latente. Le lendemain, un déséquilibre dans le même sens, encore plus important, s'installe l'après-midi.

Le 18 et le 19 octobre, les échanges énergétiques sont plus faibles. De brusques variations de rayonnement dues à des passages nuageux provoquent des variations importantes des flux. Globalement, l'accord est assez bon.

En admettant la validité de l'estimation expérimentale, la mauvaise prédiction du flux par le modèle est à rapprocher de la sous-estimation des humidités en surface à ces dates : le sol trop sec évapore moins.

Par contre, après réhumectations, les flux semblent être simulés correctement. Nous resterons cependant prudents quant à cette interprétation, car notre mesure de température assimilée à la température de surface est effectuée légèrement sous cette surface du sol. Une sous-estimation possible de la température entraînerait une sous-estimation du flux de chaleur sensible et une surestimation du flux de chaleur latente.

IV.5.3 Sur sol mulché

La figure IV.17 présente l'évolution des températures mesurées et simulées pendant la période de validation. Les défauts repérés après le calage persistent : mauvaise estimation des températures nocturnes près de la surface du sol (3°C de différence). L'estimation de la température à 20 cm de profondeur empire de jour en jour et il y a un déphasage entre les températures estimées et mesurées à 1 cm. Cette dégradation progressive peut venir d'une mauvaise simulation de l'évolution de la conductivité thermique du sol par le modèle.

Cette interprétation peut être confirmée par les profils hydriques représentés sur les figures IV.18.a et IV.18.b, l'humidité est surévaluée par le modèle près de la surface. Le profil hydrique, d'après le modèle, redevient uniforme ce qui caractérise bien l'arrêt de l'évaporation à la surface du sol.

IV.6 Comparaison modèle-mesure

IV.6.1 Prévision de l'humidité du sol

La figure IV.19 représente l'ensemble des points utilisés pour la validation du modèle, toutes profondeurs confondues, en sol nu. On retrouve les défauts

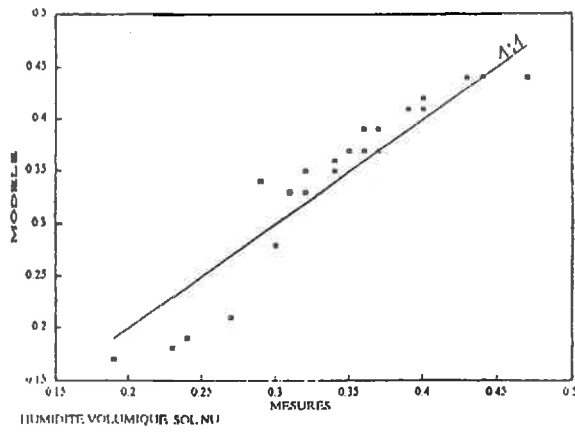


Figure IV.19 : Comparaison modèle-mesure en sol nu pour l'estimation de l'humidité du sol.

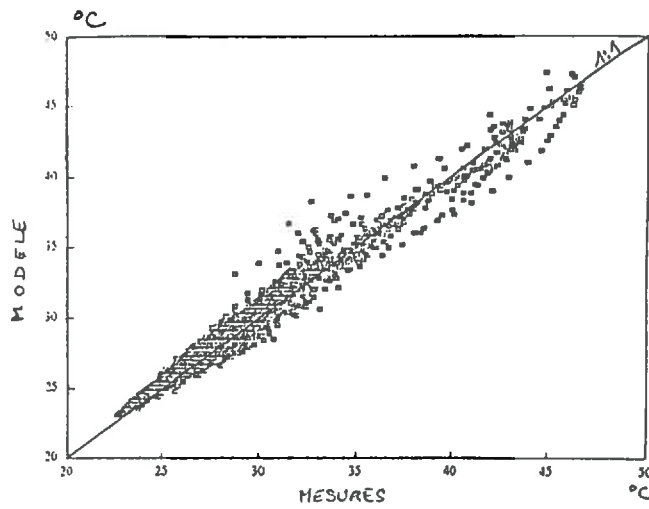


Figure IV.20 : Comparaison modèle-mesures en sol nu pour l'estimation des températures à tous les niveaux dans le sol.

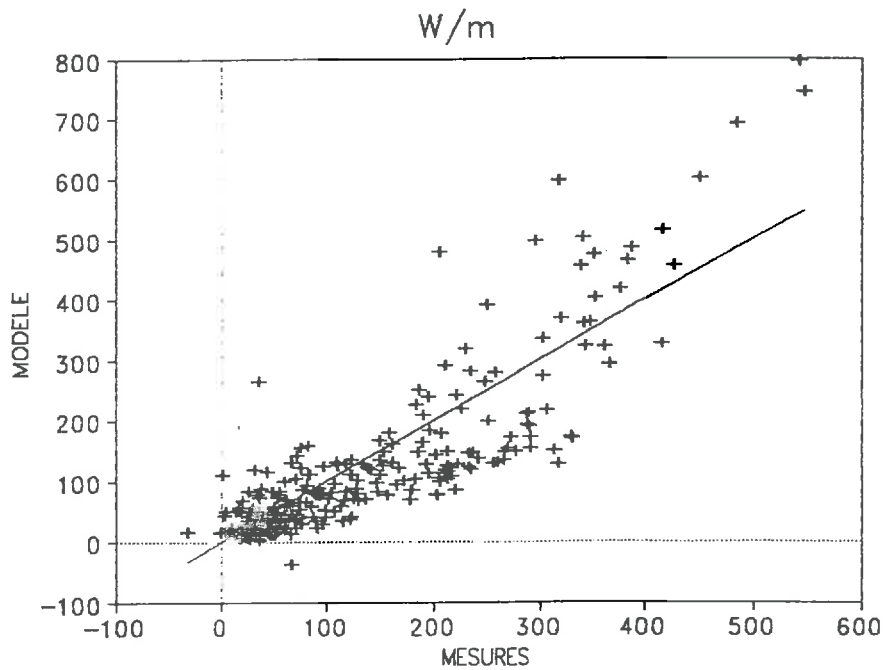


Figure IV.21 : Comparaison modèle-mesure en sol nu pour l'estimation des flux de chaleur latente.

signalés lors de la comparaison des profils : une sous-estimation systématique aux faibles humidités (inférieures à 0,3) et une surestimation au-delà.

IV.6.2 Prévision des températures dans le sol

La figure IV.20 confirme le bon accord entre les températures prévues par le modèle et celles qui ont été mesurées. La pente de la droite des moindres carrés (non représentée) est de 0,97 et non significativement différente de 1. On note une tendance à la surestimation entre 20 et 32 °C.

IV.6.3 Prévision du flux de chaleur latente

Les flux de chaleur latente calculés par la méthode mixte et le modèle sont présentés sur la figure IV.21. On observe une tendance à la sous-estimation dans la gamme 100–300 W/m². Les points pour lesquels le modèle surestime le flux correspondent aux brusques variations de rayonnement. Ce résultat confirme que le modèle n'est plus assez précis dans ces cas limites. Globalement, l'accord est assez bon, la sous-estimation est à rapprocher de celle que l'on observe aussi systématiquement pour les humidités de surface.

IV.7 Conclusion

Nous considérons que le modèle est validé en sol nu. L'amélioration de la partie concernant le mulch nécessite une réestimation des paramètres de transfert et du poids respectif de ceux-ci.

Les résultats obtenus sur sol nu, eux-mêmes perfectibles, (notamment dans l'estimation des propriétés hydrodynamiques) sont encourageants.

CONCLUSION

Comme les travaux publiés antérieurement, le formalisme adopté utilise des résultats classiques issus de la modélisation des transferts thermiques et hydriques en milieux poreux et à l'intérieur des couverts végétaux. Par ailleurs, la modélisation des transferts radiatifs à l'intérieur d'un mulch a fait l'objet d'une adaptation particulière.

Ce travail représente par contre la première confrontation entre des données expérimentales et des données simulées par un modèle de transferts de masse et d'énergie. Certes, la simple mesure des variables d'état au sein du mulch lui-même pose des problèmes méthodologiques mais les mesures effectuées ont permis le suivi des conséquences directes d'un point de vue thermique et hydrique de la présence d'un mulch sur le sol sous-jacent.

Des améliorations immédiates du modèle sont possibles, elles passent par une meilleure connaissance des propriétés hydriques du sol nécessitant un échantillonnage plus conséquent. Les propriétés hydriques du mulch (courbe de rétention) sont pour le moment tirées de la bibliographie, il serait souhaitable de les mesurer au laboratoire.

Des progrès sensibles doivent pouvoir être réalisés pour la modélisation de l'interception des précipitations par le mulch. Le dispositif de mesure de la pluie interceptée couplé avec un simulateur de pluie devrait permettre d'explorer en peu de temps de nombreuses situations pluviographiques. Il semble alors tout-à-fait envisageable de relier la capacité d'interception du mulch et son coefficient de transfert vers le sol à des paramètres physiques aisément mesurables (surface foliaire, densité).

Une meilleure modélisation des transferts de vapeur d'eau et de chaleur à travers le mulch nécessite par contre le développement technique permettant la mesure des coefficients concernés. Cet effort expérimental est nécessaire si l'on veut progresser dans la compréhension de ces phénomènes et aboutir là encore à une détermination des coefficients de transfert à partir de paramètres physiques aisément mesurables.

Le modèle doit être confronté à ceux tirés de la bibliographie, tant pour les transferts dans les sols que pour les premiers résultats concernant le mulch. Pour ces derniers, nous pouvons comparer les sorties du modèle à celles des simulations produites dans la littérature. Pour les sols, la comparaison peut s'effectuer avec des modèles validés expérimentalement sur des données de zones tempérées.

Bien entendu, l'utilisation du modèle pour des applications concrètes n'a de sens que si celui-ci est correctement validé. Dans ce cas, des utilisations possibles viennent immédiatement à l'esprit :

- Déterminer l'efficacité du mulch en fonction de son épaisseur et de son indice foliaire pour limiter l'évaporation. Une telle étude pourrait permettre d'une part d'optimiser la technique et d'autre part de chiffrer l'efficacité du mulch observé en plein champ à partir de mesures triviales.

- Préciser son rôle sur la modification du bilan hydrique du sol en fonction de l'intensité des précipitations à l'échelle de la décade ou du mois. Ce dernier point devrait nous permettre de savoir si la quantité d'eau interceptée par le mulch (donc perdue pour le sol) joue un rôle significatif dans le bilan hydrique de ce dernier.

BIBLIOGRAPHIE

- Acharya C.L., Prihar S.S.**, 1969. Vapor losses through soil mulch at different wind velocities. *Agronomy J.*, 61 : 666-669.
- Adeoya K.B.**, 1984. Influence of grass mulch on soil temperature, soil moisture and yield of maize and gero millet in a savanna zone soil. *Samaru J. Agric. Res.*, 2 (1-2) : 87-97.
- Aiyelaagbe I.O.O., Fawusi M.O.A.**, 1986. Growth and yield response of pepper to mulching. *Biotronics*, 15 : 25-29.
- Al-Darby A.M., Mustafa M.A., Al-Omran M.A., Mahjoub M.O.**, 1989. Effect of wheat residue and evaporative demands on intermittent evaporation. *Soil Tillage Res.*, 15 : 105-116.
- Aston A.R., Fischer R.A.**, 1986. The effect of conventional cultivation, direct drilling and crop residues on soil temperatures during the early growth of wheat at Murrumbateman, New South Wales. *Aust. J. Soil Res.*, 24 : 49-60.
- Bacon P.E.**, 1990. Effects of stubble and N fertilization management on N availability and uptake under successive rice (*Oryza sativa* L.) crops. *Plant and Soil*, 121 : 11-19.
- van Bavel C.H.M., Hillel D.I.**, 1975. A simulation study of soil heat and moisture dynamics as affected by a dry mulch. *Proc. Summer Computer Simulation Conf., San-Francisco*, 815-821.
- van Bavel C.H.M., Hillel D.I.**, 1976. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agric. Meteorol.*, 17 : 453-476.
- Berge H.F.M.**, 1990. Heat and water transfer in bare topsoil and the lower atmosphere. *Ed Wageningen Pudoc*.
- Bond J.J., Willis W.O.**, 1969. Soil water evaporation : surface residue rate and placement effects. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 445-448.
- Bonhomme R., Varlet-Grancher C.**, 1977. Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. *Ann. agron.*, 28 (6) : 567-582.
- Bristow K.L., Campbell G.S., Papendick R.I., Elliott L.F.**, 1986. Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue-soil system. *Agric. For. Meteorol.*, 36 : 193-214.
- Bruckler L., Bertuzzi P., Gaudu J.C., Brunet Y., Passerat de Silans A., Balabanis P., Thony J.L., Vauclin M.**, 1988. Transfert de masse et de chaleur entre le sol et l'atmosphère : comparaison entre modélisation et expérience *in situ*. *Ed Calvet R., INRA*, 362 pp, 21-70.
- Brun L.J., Enz J.W., Larsen J.K., Fanning C.**, 1986. Springtime evaporation from bare and stubble-covered soil. *J. Soil Water Cons.*, 41 (2) : 120-122.
- Brunet Y.**, 1984. Modélisation des échanges sol nu-atmosphère : essai de validation locale et influence de la variabilité spatiale du sol. *Thèse de Docteur Ingénieur*, 201 pp.
- Brunt D.**, 1932. Notes on radiation in the atmosphere. I - *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 58 : 389-420.
- Brutsaert W.**, 1975. On a derivable formula for long wave radiation from clear skies. *Water Resour. Res.*, 11 : 742-744.

- Budelman A.**, 1989. Effect of the application of the leaf mulch of *Gliricidia sepium* on early development, leaf nutrient contents and tuber yields of water yam (*Dioscorea alata*). *Agroforestry Systems*, 8 (3) : 243–256.
- Burgers M.S., Nel P.C.**, 1984. Potato irrigation scheduling and straw mulching. *S. Afr. Plant Soil*, 1 (4) : 111–116.
- Bussinger J.A.**, 1975. Aerodynamics of vegetated surfaces, in Heat and mass transfer in the biosphere I. *Transfer processes in plant environment*, ed D.A. de Vries and N.H. Afgan, 594 pp.
- Butler D.R., Huband N.D.S.**, 1985. Throughfall and stem-flow in wheat. *Agric. For. Meteorol.*, 35 : 329–338.
- Calheiros de Miranda R.A., Butler D.R.**, 1986. Interception of rainfall in a hedgerow apple orchard. *J. Hydrol.*, 87 : 245–253.
- Campbell G.S.**, 1977. An introduction to environmental biophysics. *Ed Springer-Verlag*, 159 pp.
- Campbell G.S.**, 1985. Soil Physics with Basic. *Ed Elsevier*, 150 pp.
- Carnahan B., Luther H.A., Wilken J.O.**, 1969. Applied Numerical Methods. *Ed John Wiley & Sons*, New-York, 604 pp.
- Cass A., Campbell G.S., Jones T.L.** 1984. Enhancement of thermal water diffusion in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 25–32.
- Chung S.O., Horton R.**, 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.*, 23 (12) : 2175–2186.
- Clapp R.B., Hornberger G.M.**, 1978. Empirical equations for some hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 14 (4) : 601–604.
- Couturier D.E., Ripley E.A.**, 1973. Rainfall interception in mixed grass prairie. *Can. J. Plant Sci.*, 53 : 659–663.
- Crockford R.H., Richardson D.P.**, 1990. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia – I
Throughfall measurement in a eucalypt forest : effect of method and species composition. *Hydrological processes*, 4 : 131–144.
- Dultra Cintra F.L., Borges A.L.**, 1988. Utilisation d'une légumineuse et d'une couverture morte dans les systèmes de production de bananiers. *Fruits*, 43 (4) : 211–217.
- Enz J.W., Brun L.J., Larsen J.K.**, 1988. Evaporation and energy balance for bare and stubble covered soil. *Agric. For. Meteorol.*, 43 : 59–70.
- Fuchs M., Tanner C.B.**, 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agron. J.*, 58 : 597–601.
- Fuchs M., Tanner C.B.**, 1968. Surface temperature measurements of bare soils. *J. appl. Meteorol.*, 7 : 303–305.
- Flerchinger G.N., Saxton K.E.**, 1989. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. Theory and Development. *Trans. of the ASAE*, 32 (2) : 565–571.

- Flerchinger G.N., Saxton K.E., 1989.** Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system II. Field Verification. *Trans. of the ASAE* 32 (2) : 573-578
- Hillel D.I., van Bavel C.H.M., Talpaz H., 1975.** Dynamic simulation of water storage in fallow soil as affected by mulch on hydrophobic aggregates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 826-833.
- Jackson R.D., Reginato R.J., Kimball B.A., Nakayama F.S., 1974.** Diurnal soil-water evaporation : comparison of measured and calculated soil-water fluxes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38 (6) : 861-866.
- Jiagang L., 1988.** A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 42 (2) : 111-123.
- Hulugalle N.R., Lal R., Opara-Nadi O.A., 1987.** Management of plant residue for cassava (*Manihot esculenta*) production on an acid ultisol in Southeastern Nigeria. *Field Crops Res.*, 16 (1) : 1-18.
- Kalburtzi K.L., Veresoglou D.S., Gerakis P.A., 1990.** Effects of burnt or unburnt straw on wheat and fababeans as influenced by N fertilisation. *Agric. Ecosystems & Env.*, 31 : 173-185.
- Ketchenson J.W., Beauchamp E.G., 1978.** Effects of corn stover, manure, and nitrogen on soil properties and crop yield. *Agron. J.*, 70 : 792-797.
- Ketchenson J.W., Groenevelt P.H., Kay B.D., Grant C.D., 1982.** Effect of tillage and stover management on soil temperature. *Proc. 9th Conf. int. Soil Tillage Res. Organization, Istro, Socialistic federal republic of Yugoslavia, Osijek*, 478-483.
- Kimball B.A., 1973.** Water vapor movement through mulches under field conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37 : 813-818.
- Kimball B.A., Lemon E.R., 1971.** Air turbulence effects upon soil gas exchange. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35 : 16-21.
- Lai S.H., Tiedje J.M., Erickson A.E., 1976.** *In situ* measurement of gas diffusion coefficient in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 40 : 3-6.
- Lal R., 1978.** Influence of within- and between-row mulching on soil temperature, soil moisture, root development and yield of maize (*Zea Mays* L.) in a tropical soil. *Field Crops Research*, 1 : 127-139.
- Legg B., Monteith J., 1975.** Heat and mass transfer within plant canopies in Heat and mass transfer in the biosphere I. Transfer processes in plant environment. *Ed D.A. de Vries and N.H. Afgan*, 594 pp.
- Manrique L.A., 1988.** Effect of rainfall and cover on soil temperatures of an isohyperthermic temperature regime in Panama. *Geoderma*, 42 (2) : 129-146.
- Midmore D.J., Berrios D., Roca J., 1986.** Potato (*Solanum* spp) in hot tropics II. Soil temperature and moisture modification by mulch in contrasting environments. *Field Crops Research*, 15 : 97-108.
- Monteith, J.L., 1973.** Principles of environmental physics. *Ed Edward Arnold American Elsevier*, New-York, 241 pp.

- Myneni R.B., Ross J., Asrar G.**, 1989. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agric. For. Meteorol.*, 45 (1-2) : 1-153.
- Myrold D.D., Elliott L.F., Papendick R.I., Campbell G.S.**, 1981. Water potential-water content characteristics of wheat straw. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 329-333.
- Nizinski J., Saugier B.**, 1988. Mesures et modélisation de l'interception nette dans une futaie de chênes. *Oecol. Plantar.*, 9 (3) : 311-329.
- Opara-Nadi O.A., Lal R.**, 1987. Influence of method of mulch application on growth and yield of tropical root crops in Southeastern Nigeria. *Soil Till. Res.*, 9 : 217-230.
- van Oort F.**, 1988. Présence et évolution des minéraux argileux accessoires de type 2 : 1 dans les sols ferrallitiques d'origine volcanique de la Guadeloupe. Conséquences physico-chimiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307 (II) : 1297-1302.
- Perrier A.**, 1970. Bilan hydrique de l'assolement blé-jachère et évaporation d'un sol nu, en région semi-aride. in : *Réponse des plantes aux facteurs climatiques*, Ed Unesco Actes Coll. Uppsala, 5 : 477-487.
- Paulson C.A.**, 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteorol.*, 9 : 857-861.
- Pellerin S.**, 1986. Etude d'une série chronologique de rendements en canne à sucre obtenus en Guadeloupe à partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique. *Agronomie*, 6 (1) : 91-98.
- Pennypacker S.P., Sopper W.E., Kardos L.T.**, 1975. Thermal conductivity of a red pine forest floor. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39 : 973-978.
- Pitman J.I.**, 1989. Rainfall interception by bracken litter - relationship between biomass, storage and drainage rate. *J. Hydrol.*, 111 : 281-291.
- Priestley C.H.B.**, 1955. Free and forced convection in the atmosphere near the ground. *Quat. J. R. Met. Soc.*, 81 (348) : 139-143.
- Purvis C.E., Jones G.P.D.**, 1990. Differential response of wheat to retained crop stubbles. II. Other factors influencing allelopathic potential ; intraspecific variation, soil type and stubble quantity. *Aust. J. Agric. Res.*, 41 (2) : 243-251.
- Riha S.J., Mac Innes K.J., Childs S.W., Campbell G.S.**, 1980. A finite element calculation for determining thermal conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44 : 1323-1325.
- Ross J.**, 1975. Radiative transfer in plant communities. *Ed Monteith J.L. Vegetation and the atmosphere I*, Academic press, New-York, 13-55.
- Ross P.J., Williams J., McCown R.L.**, 1985a. Soil temperature and the energy balance of vegetative mulch in the semi-arid tropics. I. Static analysis of the radiation balance. *Aust. J. Soil Res.*, 23 : 493-514.
- Ross P.J., Williams J., McCown R.L.**, 1985b. Soil temperature and the energy balance of vegetative mulch in the semi-arid tropics. II. Dynamic analysis of the total energy balance. *Aust. J. Soil Res.*, 23 : 515-532.
- Rutter A.J., Kershaw K.A., Robins P.C., Morton A.J.**, 1971. A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.*, 9 : 367-384.

- Sain P., Broadbent F.E.**, 1975. Moisture absorption, mold growth, and decomposition of rice straw at different relative humidities. *Agronomy Journal*, 67 : 759–762.
- Sallam A., Jury W.A., Letey J.**, 1984. Measurement of gas diffusion coefficient under relatively low air-filled porosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 3–6.
- SAS Institute Inc.**, 1987. SAS/STAT guide for personal computers version 6 edition. *SAS Institute Inc. Cary, NC, USA*, 1030 pp.
- Shen Y., Tanner C.B.**, 1990. Radiative and conductive transport of heat through flail-chopped corn residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 653–658.
- Simpson L.A., Gumbs F.A.**, 1986. A system of crop and soil management for the wet season production of food crops on a heavy clay soil in Guyana : 1. Effect of mulching and tillage on soil properties and crop yields. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 63 (4) : 305–310.
- Sinoquet H.**, 1988. Modélisation des échanges radiatifs de courte longueur d'onde dans certains couverts hétérogènes : -cultures en rangs -cultures associées en rangs alternés. *Thèse de Docteur Ingénieur, INA-PG*, 80 pp.
- Sisson J.B., Klittich W.M., Salem S.B.**, 1988. Comparison of two methods for summarizing hydraulic conductivities of a layered soil. *Water Resources Research*, 24 (8) : 1271–1276.
- Smika D.E.**, 1983. Soil water change as related to position of wheat straw mulch on the soil surface. *Soil Sci. Soc. Am., J.*, 47 : 988–991.
- Steiner J.L.**, 1989. Tillage and surface residue effects on evaporation from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 : 911–916.
- Stigter K.**, 1987. Puiser dans le savoir traditionnel. *Cérès*, 117 : 29–32.
- Stroo H.F., Bristow K.L., Elliott L.F., Papendick R.I., Campbell G.S.**, 1989. Predicting rates of wheat residue decomposition. *Soil Sci. Am. J.*, 53 91–99.
- Swinbank W.C.**, 1963. Longwave radiation from clear skies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 89 : 339–348.
- Tanner C.B., Shen Y.**, 1990a. Solar-radiation transmittance of flail-chopped corn residue layers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 650–652.
- Tanner C.B., Shen Y.**, 1990b. Water vapor transport through a flail-chopped corn residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 945–951.
- Thom, A.S.**, 1972. Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 98 : 124–134.
- Thompson N.**, 1981. Modelling the field drying of hay. *J. Agric. Sci. Camb.*, 97 : 241–260.
- Troeh F.R., Jabro J.D., Kirkham D.**, 1982. Gaseous diffusion equations for porous materials. *Geoderma*, 27 : 239–253.
- Tumuhairwe J.K., Gumbs F.A.**, 1983. Effect of mulches and irrigation on the production of cabbage (*Brassica oleracea*) in the dry season. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 60 (2) : 122–127.
- Unger P.W., Parker J.J.** 197. Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum, and cotton residues. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40 : 938–942.

de Vries D.A., 1963. Thermal properties of soils. in *Physics of plant environment*, ed Van Wijk, 382 pp.

Wade M.K., Sanchez P.A., 1983. Mulching and green manure applications for continuous crop production in the Amazon basin. *Agronomy Journal*, 75 : 39-45

Webb E.K., 1970. Profile relationships : the log-linear range and extension to strong stability. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 96 : 67-90.

Wesseling J., 1962. Some solutions of the steady state diffusion of carbon dioxide through soil. *Neth. J. Agric. Sci.*, 10 (2) : 109-117.

Wu J. 1990. Modelling the energy exchange processes between plant communities and environment. *Ecological Modelling*, 51 : 233-250.

ANNEXE A1

APPLICATIONS DU MODELE DE TRANSFERTS RADIATIFS DE BONHOMME ET VARLET-GRANCHER (1977) A UN PAILLIS DE FEUILLES SECHES

I. Hypothèses du modèle

Afin d'appliquer les lois de Kubelka et Munk aux couverts végétaux, les auteurs formulent six hypothèses que nous allons vérifier :

- H1** : Il n'y a pas d'azimuts de feuille privilégiés
- H2** : Il n'y a pas de superpositions privilégiées
- H3** : L'inclinaison est la même pour toutes les feuilles
- H4** : Le rayonnement diffus (D_i) subit une extinction exponentielle :

$$DI = DI_o \exp\{-K_d f\}$$

- DI_o : diffus incident
- K_d : coefficient d'extinction
- f : indice foliaire

- H5** : Les rayonnements interceptés et rediffusés par les feuilles (ascendants et descendants) sont isotropes à chaque niveau à l'intérieur du couvert.
- H6** : Le facteur de réflexion des feuilles (ρ) est égal au facteur de transmission (τ).

Dans le cas du mulch répandu mécaniquement ou manuellement à la surface du sol, nous ferons l'hypothèse que **H1** et **H2** sont vérifiées.

Pour les mêmes raisons, la plupart des feuilles (ou éléments de feuillage) d'un mulch sont disposés plutôt horizontalement sur le sol. Nous supposons donc que **H3** est vérifiée et que l'inclinaison moyenne des feuilles est nulle.

De ces trois hypothèses, on déduit que le coefficient d'extinction est égal à 1 quelle que soit la direction du rayonnement incident. **H4** et **H5** sont vérifiées

Dans ce cas, l'hypothèse **H4** est vérifiée avec $K_d=1$, ainsi que l'hypothèse **H5**.

Par contre rien ne nous permet de supposer que **H6** est vérifiée, nous devons donc conserver au cours des calculs : $\rho < \tau$.

II Expression des rayonnements ascendants et descendants

Les feuilles étant toutes horizontales, les coefficients d'extinction, pour les rayonnements direct et diffus, ainsi que pour les rayonnements rediffusés par les éléments de feuillage et le sol sont égaux à 1. Par conséquent, à un niveau quelconque dans le mulch, le rayonnement descendant D , inclut le rayonnement direct solaire, le rayonnement diffus solaire et le rayonnement rediffusé par le mulch.

Annexe A1

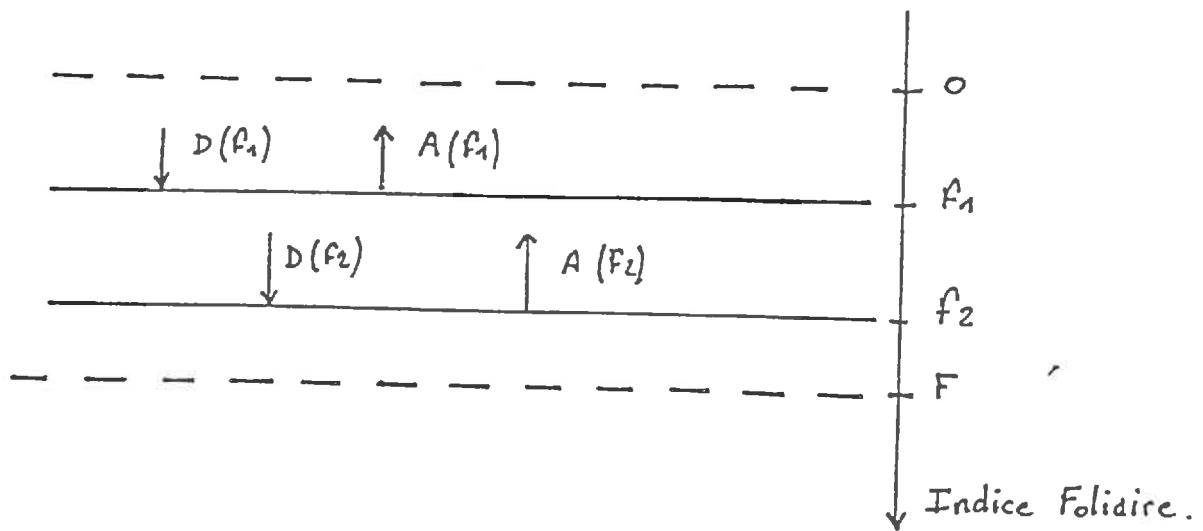


Figure 1 : Rayonnement solaire : rayonnements solaires reçus par une couche de mulch.

Un niveau quelconque à l'intérieur du mulch, est caractérisé par l'indice foliaire f cumulé depuis le sommet de la couverture.

Comme nous voulons utiliser ce modèle pour le rayonnement solaire et le rayonnement infra-rouge thermique, nous emploierons le même formalisme pour les deux gammes de longueur d'onde.

Bilan des rayonnements descendants :

$$dD = \begin{array}{ll} - D df & : \text{Descendant intercepté au niveau } f \\ + \tau D df & : \text{Descendant intercepté et rediffusé vers le bas} \\ + \rho A df & : \text{Ascendant intercepté et rediffusé vers le bas} \\ + E df & : \text{Rayonnement émis vers le bas} \end{array}$$

Bilan des rayonnements ascendants :

$$dA = \begin{array}{ll} + A df & : \text{Ascendant intercepté au niveau } f \\ - \tau A df & : \text{Ascendant intercepté et rediffusé vers le haut} \\ - \rho D df & : \text{Descendant intercepté et rediffusé vers le haut} \\ - E df & : \text{Emis vers le haut} \end{array}$$

III Résolution du système dans le cas général

$$\frac{dD}{df} = -(1-\tau) D + \rho A + E \quad (1)$$

$$\frac{dA}{df} = (1-\tau) A - \rho D - E \quad (2)$$

Par substitution (D et dD/df extraits de (2)), on obtient :

$$\frac{d^2D}{df^2} - \alpha^2 D = -\beta E \quad (3)$$

$$\frac{d^2A}{df^2} - \alpha^2 A = -\beta E \quad (4)$$

avec
$$\alpha = \sqrt{(1-\tau)^2 - \rho^2}$$

$$\beta = 1 - \tau + \rho R$$

Les équations sans second membre ont pour solution générale :

$$D = C_1 \exp\{+\alpha f\} + C_2 \exp\{-\alpha f\} \quad (5)$$

$$A = C_3 \exp\{+\alpha f\} + C_4 \exp\{-\alpha f\} \quad (6)$$

Ces deux égalités doivent vérifier (1) et (2) pour tout f, on trouve alors les relations :

$$C_1 = C_5 (\beta - \alpha) \quad C_2 = C_6 (\beta + \alpha)$$

$$C_3 = C_5 (\beta + \alpha) \quad C_4 = C_6 (\beta - \alpha)$$

Et les solutions générales des équations (3) et (4) sont donc :

$$D = C_5 (\beta - \alpha) \exp\{+\alpha f\} + C_6 (\beta + \alpha) \exp\{-\alpha f\} + \beta E / \alpha^2 \quad (7)$$

$$A = C_5 (\beta + \alpha) \exp\{+\alpha f\} + C_6 (\beta - \alpha) \exp\{-\alpha f\} + \beta E / \alpha^2 \quad (8)$$

Enfin, pour déterminer les coefficients C_5 et C_6 , considérons les conditions aux limites à la surface du mulch et à l'interface sol-mulch :

$$\begin{aligned} f = 0 & \quad D = R_i \\ f = F & \quad A = \rho_s D + E_s \end{aligned}$$

R_i : rayonnement incident
 ρ_s : coefficient de réflexion du sol
 E_s : rayonnement émis par le sol
 F : indice foliaire total du mulch

On obtient alors le système suivant, d'inconnues C_5 et C_6 :

$$C_5 (\beta - \alpha) + C_6 (\beta + \alpha) = R_i - \beta E / \alpha^2 \quad (9)$$

$$C_5 [(\beta + \alpha) - \rho_s (\beta - \alpha)] \exp\{+\alpha F\} + C_6 [(\beta - \alpha) - \rho_s (\beta + \alpha)] \exp\{-\alpha F\} = E_s - (1 - \rho_s) \beta E / \alpha^2 \quad (10)$$

Finalement, avec :

$$\Delta = \exp\{-\alpha F\} [(\beta-\alpha)^2 - \rho_s(\beta+\alpha)(\beta-\alpha)] - \exp\{+\alpha F\} [(\beta+\alpha)^2 - \rho_s(\beta+\alpha)(\beta-\alpha)]$$

Les coefficients prennent les valeurs suivantes :

$$C_5 = \frac{1}{\Delta} \left[(R_i - \beta E / \alpha^2) [(\beta-\alpha) - \rho_s(\beta+\alpha)] \exp\{-\alpha F\} - [E_s - (1-\rho_s)\beta E / \alpha^2](\beta+\alpha) \right]$$

$$C_6 = \frac{1}{\Delta} \left[[E_s - (1-\rho_s)\beta E / \alpha^2](\beta-\alpha) - (R_i - \beta E / \alpha^2) [(\beta+\alpha) - \rho_s(\beta-\alpha)] \exp\{+\alpha F\} \right]$$

IV Dans le cas du rayonnement solaire

IV.1 Modèle complet

$$R_i = RG \quad (RG : \text{Rayonnement global})$$

$$E = 0$$

$$E_s = 0$$

Les flux descendant (D) et ascendant (A) prendront alors les valeurs suivantes :

$$D = C_1 \exp\{+\alpha f\} + C_2 \exp\{-\alpha f\}$$

$$A = C_3 \exp\{+\alpha f\} + C_4 \exp\{-\alpha f\}$$

avec

$$C_1 = \frac{(\beta-\alpha)}{\Delta} \left[RG \exp\{-\alpha F\} [(\beta-\alpha) - \rho_s(\beta+\alpha)] \right]$$

$$C_2 = \frac{(\beta+\alpha)}{\Delta} \left[-RG \exp\{+\alpha F\} [(\beta+\alpha) - \rho_s(\beta-\alpha)] \right]$$

$$C_3 = \frac{(\beta+\alpha)}{(\beta-\alpha)} C_1$$

$$C_4 = \frac{(\beta-\alpha)}{(\beta+\alpha)} C_2$$

Comme nous nous intéressons aux transferts d'énergie, nous aurons besoin de l'expression du rayonnement absorbé (R_{abs}) par une épaisseur de mulch compris entre f_1 et f_2 (Figure 1) :

$$R_{abs} = D(f_1) - A(f_1) - D(f_2) + A(f_2)$$

$$R_{abs} = (C_1 - C_3) (\exp\{+\alpha f_1\} - \exp\{+\alpha f_2\}) + (C_2 - C_4) (\exp\{-\alpha f_1\} - \exp\{-\alpha f_2\})$$

IV.2 Expression simplifiée

L'expression précédente étant un peu lourde à manipuler, nous allons déduire du modèle complet une expression simplifiée. Par analogie avec une expression classique du transfert du rayonnement solaire dans la végétation (Ross 1975), supposant une extinction exponentielle du rayonnement global, nous allons poser, pour une épaisseur de mulch f :

$$B_f = B_0 \exp\{-K_e f\}$$

avec

$$B_f = D(f) - A(f)$$

$$B_0 = D(0) - A(0)$$

B_0 : Bilan radiatif à la surface du mulch

B_f : Bilan radiatif en f

f : "Épaisseur" du mulch (indice foliaire)

K_e : Coefficient d'extinction apparent ajusté à partir du modèle complet.

V Dans le cas du rayonnement infra-rouge thermique

V.1 Modèle complet

$$R_i = RA \quad RA : \text{rayonnement atmosphérique}$$

$$E = \varepsilon_f \sigma T_f^4 \quad T_f, \varepsilon_f : \text{température, émissivité des feuilles}$$

σ : constante de Stephan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

$$E_s = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad T_s, \varepsilon_s : \text{température, émissivité du sol}$$

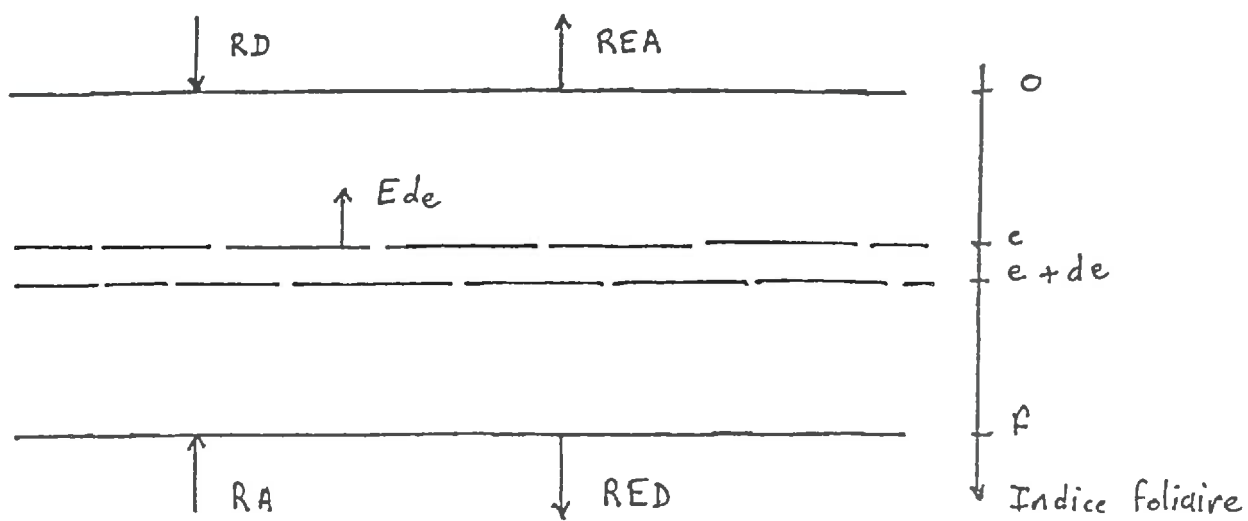


Figure 2 : Rayonnement infra-rouge thermique.
 Simplification n°1 : pas de rediffusions des rayonnements interceptés.

Les flux descendants (D) et ascendants (A) prennent les valeurs suivantes :

$$D = C_1 \exp\{+\alpha f\} + C_2 \exp\{-\alpha f\} + \beta E/\alpha^2$$

$$A = C_3 \exp\{+\alpha f\} + C_4 \exp\{-\alpha f\} + \beta E/\alpha^2$$

avec les constantes :

$$C_1 = \frac{(\beta-\alpha)}{\Delta} \left[(RA-\beta E/\alpha^2) [(\beta-\alpha)-\rho_s(\beta+\alpha)] \exp\{-\alpha F\} - [E_s-(1-\rho_s)\beta E/\alpha^2] (\beta+\alpha) \right]$$

$$C_2 = \frac{(\beta-\alpha)}{\Delta} \left[[E_s-(1-\rho_s)\beta E/\alpha^2] (\beta-\alpha) - (RA-\beta E/\alpha^2) [(\beta+\alpha)-\rho_s(\beta-\alpha)] \exp\{\alpha F\} \right]$$

$$C_3 = \frac{(\beta+\alpha)}{(\beta-\alpha)} C_1$$

$$C_4 = \frac{(\beta-\alpha)}{(\beta+\alpha)} C_2$$

V.2 Expression simplifiée

Comme pour le transfert du rayonnement solaire, nous allons essayer de simplifier la modélisation concernant le rayonnement infra-rouge, le modèle complet étant utilisé pour valider la formulation simplifiée.

V.2.1 Simplification n°1 : Il n'y a pas de rediffusions dans le mulch

On considère un tapis de mulch d'"épaisseur" f , recevant les énergies incidentes RD (descendante) et RA (ascendante), (Figure 2). Nous allons calculer les rayonnements sortants REA et RED émis respectivement vers le haut et vers le bas par ce milieu d'épaisseur non négligeable.

Une fine couche de mulch, située entre e et $e+de$, émet une quantité de rayonnement Ede . Ce rayonnement va ressortir au sommet de la couche de feuillage en ayant subi une extinction. Le rayonnement émis par la couche sera alors: (E étant le flux émis par la surface foliaire)

$$E \exp\{-e\} de$$

L'intégration sur toute l'épaisseur de feuillage, soit pour e variant entre 0 et f , nous donne :

$$REA = \int_0^f E \exp\{-e\} de = E (1 - \exp\{-f\})$$

Par symétrie du système, $RED = E (1 - \exp\{-f\})$

On peut alors écrire le bilan radiatif du mulch :

Rayonnement ascendant sortant :

$$AS = E (1 - \exp\{-f\}) + A \exp\{-f\}$$

Rayonnement descendant sortant :

$$DS = E (1 - \exp\{-f\}) + D \exp\{-f\}$$

Bilan de la couche (Rayonnement absorbé : R_{abs}) :

$$R_{abs} = A + D - AS - DS$$

$$R_{abs} = (A + D - 2E) (1 - \exp\{-f\})$$

V.2.2 Simplification n°2 : La couche de mulch d'épaisseur f est considérée comme une "feuille" de température uniforme.

L'hypothèse que nous introduisons maintenant simplifie encore plus les expressions, le tapis de mulch d'épaisseur f du paragraphe précédent est considéré comme une feuille homogène recevant et émettant les mêmes quantités de rayonnement.

$$REA = RED = E$$

Bilan de la couche :

$$R_{abs} = A + D - 2E$$

V.2.3 Simplification n°3 : Les feuilles se comportent comme des corps noirs.

Nous venons de voir deux expressions simplifiées du rayonnement absorbé par une couche de mulch, ayant pour hypothèse commune l'absence de rediffusion à l'intérieur du mulch. Cela revient à considérer que les feuilles ont des facteurs de réflexion et

de transmission négligeables ($\rho \approx \tau \approx 0$) et se comportent comme des corps noirs ($\epsilon=1$) d'un niveau à un autre.

Pour les deux modèles simplifiés, nous testerons donc l'hypothèse $\epsilon=1$ dans l'expression du rayonnement émis E :

$$E = \epsilon\sigma T^4$$

Ces expressions simplificatrices seront testées par rapport au modèle complet, la plus proche de celui-ci sera retenue.

ANNEXE A2

ALGORITHMES NUMERIQUES UTILISES

I Schémas aux différences finies

I.1 Généralités

Nous rappelons ici rapidement le principe de cette méthode permettant de résoudre un système d'équation aux dérivées partielles. Elle consiste à :

- 1 - Remplacer les dérivées des fonctions par les premiers termes du développement de celles-ci en série de Taylor.
- 2 - Discrétiser l'espace et le temps en un nombre fini de points (constituant un "maillage") pour lesquels les valeurs des fonctions seront calculées.

Cette méthode permet donc le calcul de valeurs approchées des variables (à cause des erreurs systématiques de troncature et d'arrondis).

I.1.1. Développement en série de Taylor

Le développement en série de Taylor d'une fonction f quelconque infiniment dérivable s'écrit :

$$f\{z+\Delta z\} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} \frac{\partial^n f}{\partial z^n}$$

d'où l'on tire :

$$\frac{\partial f}{\partial z} = [f\{z+\Delta z\} - f\{z\}] / \Delta z + \varepsilon\{\Delta z\}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = [f\{z+\Delta z\} - 2f\{z\} + f\{z-\Delta z\}] / \Delta z^2 + \varepsilon'\{\Delta z^2\}$$

I.1.2 Discrétisation

Δz représente le pas d'espace et Δt le pas de temps. Dans le cas général, on considère le pas de temps intermédiaire δt (avec $0 \leq \delta \leq 1$). Nous adopterons la notation à deux indices :

$$f_i^n = f \text{ au pas d'espace } i \text{ et au pas de temps } n.$$

Une solution exacte de l'équation de diffusion, $\partial f / \partial t = \partial^2 f / \partial z^2$ au point $i, n+\delta$, est :

$$[f_i^{n+1} - f_i^n] / \Delta t = \delta [f_{i+1}^{n+1} - 2f_i^{n+1} + f_{i-1}^{n+1}] / \Delta z^2 + (1-\delta) [f_{i+1}^n - 2f_i^n + f_{i-1}^n] / \Delta z^2 + \pi_i^{n+\delta}$$

Annexe A2

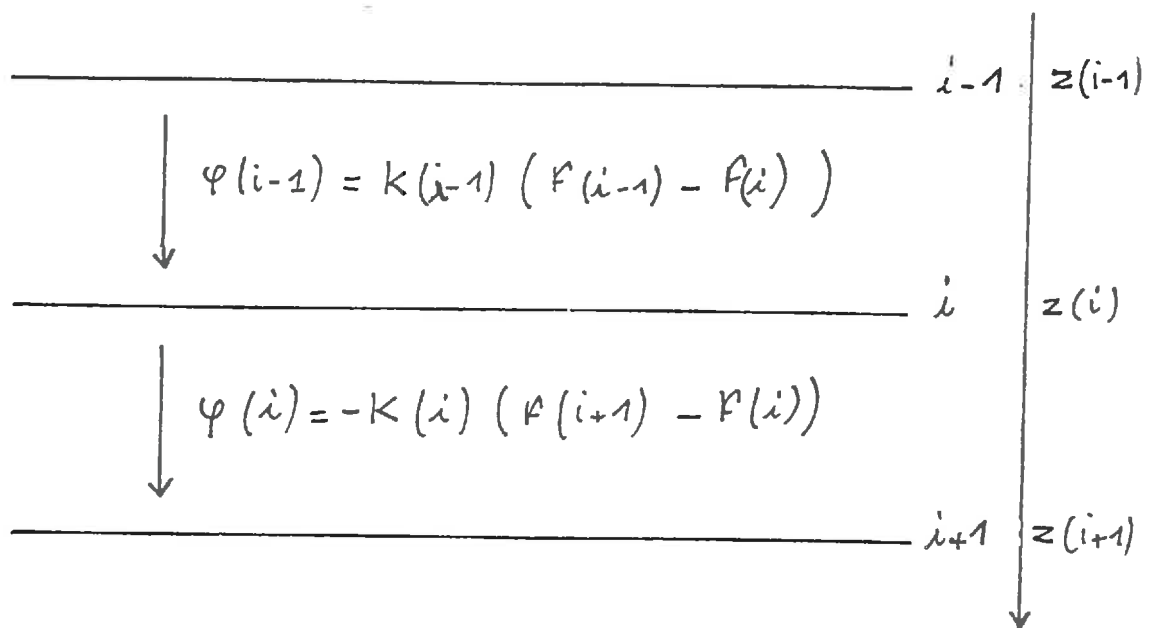


Figure 1 : Bilan local au noeud i .

$\pi_i^{n+\delta}$ étant le reste du développement en série tendant vers une valeur finie quand Δz et Δt tendent vers 0.

– Pour $\delta = 0$, Le schéma est dit explicite. Lorsque les équations formées sont linéaires, il est stable seulement lorsque $\Delta t/\Delta z^2 < 0,5$.

– Pour $\delta < 0$, Le schéma est dit implicite, inconditionnellement stable, les deux valeurs les plus utilisées sont :

$\delta = 1$: Schéma implicite pur

$\delta = 1/2$: Schéma de Crank–Nicholson supérieur d'un ordre en Δz .

Dans notre cas d'équations de transfert fortement non–linéaires, bien que le schéma de Crank–Nicholson soit plus précis que le schéma implicite pur, l'estimation des coefficients à chaque pas de temps rend le calcul très lourd (Brunet 1984). Nous choisirons donc un schéma implicite, nécessitant des temps de calcul moindre au prix d'une perte de précision négligeable.

I.2 Application à l'équation de diffusion

I.2.1 Etablissement des équations

Dans tout ce qui va suivre, les calculs seront développés pour un schéma implicite pur.

Prenons comme exemple, le cas simple de l'équation de diffusion :

$$C \partial f/\partial t = \partial/\partial z (K \partial f/\partial z)$$

Afin d'écrire l'équation discrétisée au noeud i , utilisons la méthode du bilan local. L'équation de conservation est écrite en i , employant l'expression des flux entre $i+1$ et i et entre $i-1$ et i , les coefficients de diffusion étant respectivement K_i et K_{i-1} (Figure 1). On écrit que la variation de stock au noeud i est égale à la somme algébrique des flux.

On pose pour faciliter l'écriture:

$$K_i = K_i / (z(i+1) - z(i))$$

$$C_i (z_{i+1} - z_{i-1}) (f_i^{n+1} - f_i^n) / 2\Delta t = K_i (f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) - K_{i-1} (f_i^{n+1} - f_{i-1}^{n+1})$$

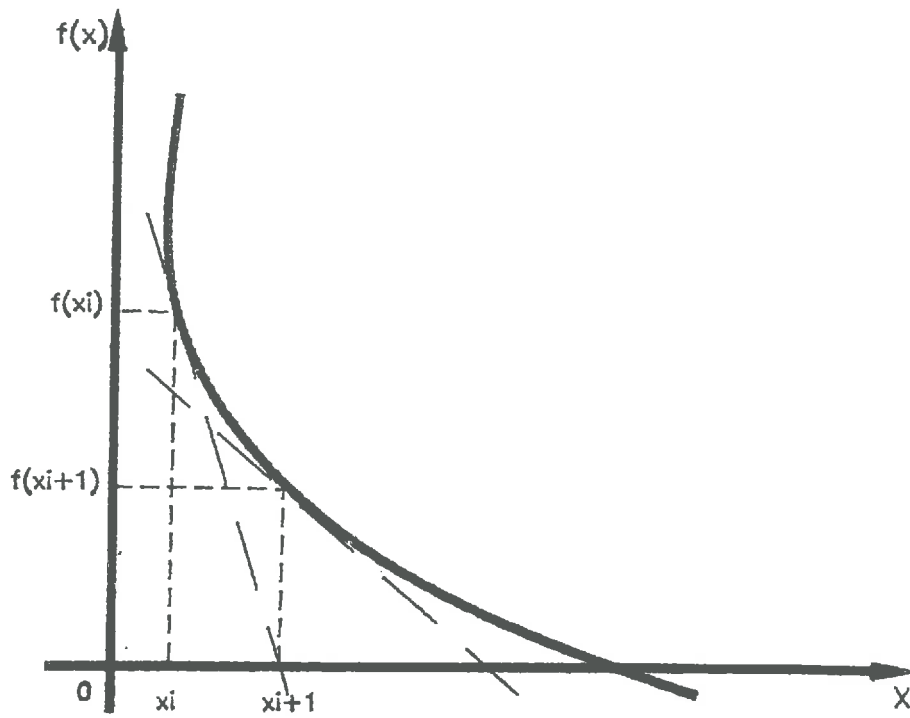


Figure 2 : Représentation graphique de deux approximations successives avec la méthode de Newton-Raphson.

alors, les solutions $E(i)$ du système seront :

$$E(im) = \Gamma(im)$$

$$im-1 \geq i \geq 1$$

$$E(i) = \Gamma(i) - C(i) E(i+1) / \beta(i)$$

Cette méthode est utilisée pour la résolution de tous les systèmes d'équations différentielles du modèle : bilans de masse et d'énergie dans le sol et dans le mulch.

II Méthode de Newton-Raphson :

Cette méthode peut s'appliquer à toute fonction continue et partiellement dérivable, $f(x)$.

On cherche à résoudre : $f(x) = 0$.

La méthode étant itérative, on va noter x^i la i ème approximation de la variable x .

Si x^i et $f(x^i)$ sont connus, on cherche x^{i+1} tel que :

$$\frac{\partial f(x^i)}{\partial x} (x^i - x^{i+1}) = f(x^i)$$

$\frac{\partial f(x^i)}{\partial x}$: Valeur de $\partial f / \partial x$ en x^i

La valeur de x^{i+1} calculée permettra de la même façon, de calculer une nouvelle estimation, x^{i+2} , telle que $|f(x^{i+2})| < |f(x^{i+1})|$ si la première estimation, x^1 est suffisamment proche de la valeur réelle de la racine (Figure 2).

Dans le cas d'un système d'équations (résolution de $f(x) = 0$ pour chaque noeud), la notation est similaire, en utilisant la matrice Jacobienne composée des dérivées partielles des f_j par rapport à chacune des variables x_k : $\partial f_j / \partial x_k$.

Cette méthode va nous servir à calculer le bilan de masse dans le sol. En effet, du fait de sa forte linéarité, même après la transformation intégrale, cette équation serait difficile à résoudre par la méthode des différences finies.

ANNEXE A3

METHODES CLASSIQUES DE CALCUL DE DIFFERENTS PARAMETRES UTILISES POUR LA VALIDATION DU MODELE

I Méthode du stock thermique

I.1 But

Cette méthode permet de calculer, à partir des mesures de profils de température dans le sol et des teneurs en eau, d'une part le flux de chaleur dans le sol, d'autre part la conductivité thermique d'une ou de plusieurs couches de sol.

I.2 Principe

On calcule la variation de "stock thermique" d'une couche de sol comprise entre z_1 et z_2 entre les instants t_1 et t_2 ($t_2 > t_1$).

Si l'on note :

$G(z,t)$ = flux de chaleur conductif au niveau z et à l'instant t

$T(z,t)$ = température du sol " " "

$C_{sc}(\theta)$ = capacité calorifique du sol pour une teneur en eau θ et une masse volumique ρ_s .

Entre deux niveaux, z_1 et z_2 :

$$G(z_1,t_2) - G(z_2,t_2) = C_{sc}(\theta) (T(z_1,t_1) - T(z_2,t_2)) (z_2 - z_1) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Par définition,

$$G(z_2,t) \approx - \lambda_s(\theta) (T(z_2,t) - T(z_1,t)) / (z_2 - z_1) \quad (2)$$

$\lambda_s(\theta)$: conductivité thermique du sol

I.3 Estimation du flux de chaleur conductif à la surface du sol

Si n est le noeud à la base du profil, nous calculons la variation de stock thermique entre 0 et $n-1$ d'abscisse z_0 et z_{n-1} , respectivement, l'application de (1) à chaque tranche de sol nous permet d'écrire :

$$G(z_0,t_2) - G(z_{n-1},t_2) = \sum_{i=1}^{n-1} C_{sc}(\theta_i) (T(z_i,t_1) - T(z_i,t_2)) (z_{i-1} - z_i) / (t_2 - t_1)$$

Les capacités calorifiques $C_{sc}(\theta_i)$ sont calculées à partir du modèle de de Vries (1963), avec les teneurs en eau mesurées expérimentalement.

$G(z_{n-1}, t_2)$ est estimé en supposant que λ_{sn} varie peu au cours du temps (car la teneur en eau varie peu au cours de la journée à cette profondeur) :

$$G(z_{n-1}, t_2) = - \lambda_{sn} (T(z_{n-1}, t_2) - T(z_n, t_2)) / (z_{n-1} - z_n)$$

I.3 Estimation de la conductivité thermique

On utilise le profil de température mesuré entre 1 cm (la mesure de la température à la surface du sol n'étant pas fiable) et 1 m de profondeur. Nous appliquons l'équation (1) pour calculer les

$$G(z_i, t_2) \quad 0 < i < n$$

Ensuite, l'équation (2) permet de calculer les $\lambda_{si}(\theta_i)$.

II Estimation des flux convectifs dans l'atmosphère

II.1 Méthode du rapport de Bowen

Cette méthode permet, avec certaines contraintes expérimentales qui sont discutées dans le texte, de calculer les flux convectifs à la surface du sol. Elle nécessite la connaissance de RN (Rayonnement net), de G (flux de chaleur dans le sol), des gradients de température ($T_1 - T_2$) et d'humidité dans l'air ($P_{v1} - P_{v2}$).

Supposant l'égalité des coefficients d'échange pour les flux de chaleur sensible et de chaleur latente, on pose :

$$\beta = \gamma (T_1 - T_2) / (P_{v1} - P_{v2}) = H / LE$$

avec:

T_1, T_2	: températures aux niveaux 1 et 2	(K)
P_{v1}, P_{v2}	: pressions partielles de vapeur d'eau	(Pa)
γ	: constante psychrométrique	(Pa/K)
β	: rapport de Bowen.	
H	: flux de chaleur sensible	(W/m ²)
LE	: flux de chaleur latente	(W/m ²)

Nous avons alors:

$$H = \beta / (1 + \beta) (RN - G)$$

$$LE = 1 / (1 + \beta) (RN - G)$$

Le rayonnement net est mesuré et le flux de chaleur dans le sol (mulché ou non) est estimé à par la méthode du stock thermique. Les valeurs des T_1 , T_2 et P_{v1} , P_{v2} sont mesurées (cf IV.1).

II.2 Méthode mixte

Cette méthode permet de calculer les flux convectifs à la surface du sol. Elle utilise, comme la méthode du rapport de Bowen, le calcul du bilan d'énergie, la mesure d'un gradient de température et une estimation du coefficient d'échange convectif pour le calcul du flux de chaleur sensible (cf II.1.2.1.2).

- Calcul de h_c (coefficient d'échange convectif pour la chaleur) :

Identique à celui effectué dans le modèle.

on pose alors :

$$H = -h_c (T_s - T_1)$$

avec

T_s : température de la surface (mesurée sur sol nu comme sur mulch)
 T_1 : température de l'air mesurée au niveau le plus bas

ANNEXE A4

LISTE DES SYMBOLES EMPLOYES

a	: (indice) paramètre thermique concernant l'air	
a_u	: coefficient ajusté, courbe de rétention du mulch	
albm	: albédo du mulch	
A_i	: coefficient d'ajustement de la conductivité thermique du composant i	
$A(f)$: rayonnement ascendant arrivant au niveau f	(W/m ²)
AS	: rayonnement ascendant sortant	(W/m ²)
b	: paramètre d'ajustement de la courbe de rétention du sol	
b_u	: coefficient ajusté, courbe de rétention du mulch	
B_i	: coefficient d'ajustement de la conductivité thermique du composant i	
B_o	: bilan radiatif à la surface du mulch	
B_f	: bilan radiatif en f	
C	: coefficient expérimental pour le calcul des diffusivités dans le mulch	
c_p	: chaleur massique de l'air	(J/kg/K)
Cc_i	: capacité calorifique volumique du constituant i	(J/m ³ /K)
C_d	: capacité de stockage de la pluie par le mulch	(mm)
C_i	: ($i < 0 < 6$) coefficients, transferts radiatifs	
C_{sc}	: capacité calorifique du sol	(J/m ³ /K)
C_{sm}	: ($= \partial\theta / \partial\psi$) capacité hydrique du sol	(kg/J)
C_{uc}	: capacité calorifique du mulch	(J/m ² /K)
C_{um}	: capacité "hydrique" du mulch	(kg/J)
CLO	: rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par une couche de mulch	(W/m ²)
d	: hauteur de déplacement	(m)
d_s	: densité de solide du sol	
d_g	: densité globale du sol	
$D(f)$: rayonnement descendant arrivant au niveau f	(W/m ²)
D_{ac}	: diffusivité de la chaleur dans l'air	(m ² /s)
D_{av}	: diffusivité de la vapeur dans l'air	(m ² /s)
D_{oc}	: diffusivité de la chaleur dans l'air à 0 °C	(m ² /s)
D_{ov}	: diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air à 0 °C	(m ² /s)
DS	: rayonnement descendant sortant	(W/m ²)
D_{sv}	: diffusivité de la vapeur d'eau dans le sol	(m ² /s)
D_{svT}	: ($= D_{sv} \partial\rho_v / \partial T$) diffusivité de la vapeur d'eau dans le sol, due au gradient de température	(m ² /s)
$D_{sv\psi}$: ($= D_{sv} \partial\rho_v / \partial\psi$) diffusivité de la vapeur d'eau due au gradient de potentiel	(m ² /s)
$D_{sv\phi}$: diffusivité de la vapeur d'eau due au gradient de potentiel matriciel	(m ² /s)
D_{uc}	: diffusivité turbulente de la chaleur	(m ² /s)
D_{uv}	: diffusivité turbulente de la vapeur d'eau dans le mulch	(m ² /s)
DI	: rayonnement diffus	(W/m ²)
DI_o	: rayonnement diffus incident	(W/m ²)
e	: (indice) paramètre thermique concernant l'eau	
E	: rayonnement émis par le mulch (grande longueur d'onde)	(W/m ²)
E_s	: rayonnement émis par le sol	(W/m ²)
E_v	: densité de flux de vapeur d'eau	(kg/m ² /s)
epm	: épaisseur du mulch	(m)

EV	: évaporation à la surface du sol	
f	: indice foliaire cumulé au niveau z	(kg/m ² /s)
F	: indice foliaire total du mulch	
g	: accélération de la pesanteur (= 9,81)	
GLO	: rayonnement de grande longueur d'onde absorbé par une couche de mulch	(m/s ²)
H	: densité de flux de chaleur sensible	(W/m ²)
Hr	: humidité relative	(W/m ²)
Hra	: humidité relative de l'air (limite supérieure du système)	
J _{sc}	: densité de flux de chaleur conductif	(W/m ²)
J _{sco}	: densité de flux de chaleur latente	(W/m ²)
J _{sl}	: densité de flux d'eau sous forme liquide	(kg/m ² /s)
J _{slT}	: densité de flux d'eau liquide liée au gradient de température	(kg/m ² /s)
J _{shψ}	: densité de flux d'eau liquide liée au gradient de potentiel	(kg/m ² /s)
J _{sm}	: densité de flux de masse d'eau dans le sol	(kg/m ² /s)
J _{sv}	: densité de flux de vapeur d'eau dans le sol	(kg/m ² /s)
J _{svT}	: densité de flux de vapeur d'eau liée au gradient de température	(kg/m ² /s)
J _{svψ}	: densité de flux de vapeur d'eau liée au gradient de potentiel	(kg/m ² /s)
J _{uc}	: densité de flux de chaleur conductif dans le mulch	(kg/m ² /s)
J _{uco}	: densité de flux de chaleur convectif dans le mulch	(W/m ²)
J _{uv}	: densité de flux de vapeur d'eau dans le mulch	(W/m ²)
k	: constante de Von Karman (= 0,4)	(kg/m ²)
K	: coefficient d'interception de la pluie	
K _d	: coefficient d'extinction du rayonnement diffus	
K _e	: coefficient d'extinction apparent pour le rayonnement global	
K _{sl}	: conductivité hydraulique du sol	
K _{shψ}	: conductivité hydraulique du sol, liée au gradient de potentiel	(kg s / m ³)
K _{slΦ}	: conductivité hydraulique du sol, liée au gradient de potentiel matriciel	(kg s / m ³)
K _{ss}	: conductivité hydraulique à saturation	(kg s / m ³)
L	: longueur de Monin-Obukhov	(kg s / m ³)
L _v	: chaleur latente de vaporisation de l'eau	(m)
LH	: bilan des transferts de chaleur latente due au gradient de masse	(J/kg)
m	: paramètre concernant les éléments de mulch	(W/m ²)
M _v	: masse molaire de la vapeur d'eau	
MT	: transfert de vapeur dû aux gradients de température	(kg/mol)
P	: intensité de la pluie	(kg/m ²)
P'	: pente de la courbe de pression de vapeur saturante	(mm/s)
P _v	: pression partielle de vapeur d'eau	(Pa/K)
P _{vs}	: pression de vapeur saturante	(Pa)
Q	: quantité d'eau de pluie stockée par le mulch	(Pa)
R	: constante des gaz parfaits	(mm)
Ri	: rayonnement incident	(J/mol/K)
Rt	: rayonnement transmis	(W/m ²)
R _{abs}	: rayonnement absorbé par le mulch	(W/m ²)
RA	: rayonnement atmosphérique	(W/m ²)
RE _{clo}	: rayonnement de courte longueur d'onde issu du système	(W/m ²)
RE _{glo}	: rayonnement de grande longueur d'onde issu du système	(W/m ²)
REA	: rayonnement émis ascendant	(W/m ²)
RED	: rayonnement émis descendant	(W/m ²)
RG	: rayonnement global	(W/m ²)
RN	: rayonnement net	(W/m ²)

s	: (indice) paramètre concernant le sol	
Sc	: terme source de chaleur dans le sol	(W/m ²)
t	: temps	(s)
T	: température	(K)
T _a	: température de l'air (limite supérieure du système)	(K)
T _c	: température en °C	(°C)
T _f	: température des feuilles au niveau f	(K)
T _o	: température de surface	(K)
T _s	: température du sol	(K)
T ₁₀₀	: température du sol à 1 m de profondeur	(K)
u	: (indice) paramètre concernant le mulch	
u	: vitesse du vent	(m/s)
u _a	: vitesse du vent à la limite supérieure du système	(m/s)
u*	: vitesse de frottement	(m/s)
U	: constante (coefficient expérimental)	
V	: constante (coefficient expérimental)	
x _i	: teneur volumique en constituant i (volume de i / volume total)	
X	: coefficient expérimental d'atténuation de la diffusivité turbulente à l'intérieur du mulch	
z	: coordonnée suivant un axe vertical	(m)
z _m	: hauteur de rugosité pour le flux de quantité de mouvement	(m)
z _h	: hauteur de rugosité pour le flux de chaleur sensible	(m)
z _v	: hauteur de rugosité pour le flux de vapeur d'eau	(m)

SYMBOLES GRECS

α	: coefficient constant	
β	: coefficient constant	
Δ	: coefficient constant	
ε	: porosité	
ε_f	: émissivité des feuilles	
ε_s	: émissivité du sol	
σ	: constante de Stephan-Boltzmann (5,67.10 ⁻⁸)	(W m ⁻² K ⁻⁴)
Γ	: densité de flux de quantité de mouvement	(N/m ²)
λ_s	: conductivité thermique du sol	(W/m/K)
λ_u	: conductivité thermique du mulch	(W/m/K)
θ	: humidité volumique du sol	(m ³ /m ³)
θ_s	: humidité volumique du sol à saturation	(m ³ /m ³)
θ_u	: humidité pondérale du mulch	(kg/kg)
θ_{100}	: humidité volumique du sol à 1 m de profondeur	
ρ	: réflectance des éléments du mulch	
ρ_a	: masse volumique de l'air	(kg /m ³)
ρ_c	: masse volumique de l'eau	(kg/m ³)
ρ_m	: masse volumique des éléments de mulch	(kg/m ³)
ρ_u	: masse volumique du mulch	(kg/m ³)
ρ_s	: réflectance du sol nu	
ρ_v	: masse volumique de la vapeur d'eau en z	(kg /m ³)
ρ_{vo}	: masse volumique de la vapeur d'eau en surface	(kg /m ³)
ρ_{vs}	: masse volumique de la vapeur d'eau à saturation	(kg/m ³)
τ	: transmittance des éléments de mulch	
ξ	: paramètre de stabilité de l'atmosphère	
ψ	: potentiel de l'eau dans le sol	(J/kg)
ψ_e	: potentiel d'entrée d'air	(J/kg)
ψ_m	: fonction de stabilité pour le flux de quantité de mouvement	
ψ_h	: fonction de stabilité pour le flux de chaleur sensible	
ψ_u	: potentiel de l'eau dans le mulch	(J/kg)

ψ_v : fonction de stabilité pour le flux de vapeur d'eau
 Φ : potentiel matriciel de l'eau dans le sol

(Pa)

**TRANSFERTS THERMIQUES ET HYDRIQUES DANS LE CONTINUUM
SOL-MULCH VEGETAL-ATMOSPHERE :
MODELISATION ET PREMIERE VALIDATION EXPERIMENTALE.**

RESUME :

Une modélisation mécaniste des transferts couplés de chaleur et de masse d'eau entre le sol recouvert d'un mulch (résidus végétaux) et l'atmosphère est présentée. Le compartiment sol est traité avec un formalisme classique des transferts en milieu poreux. Les transferts conductifs et convectifs dans le mulch sont pris en compte. Les transferts convectifs vers l'atmosphère utilisent les équations classiques mises au point pour les couverts végétaux homogènes. Les transferts radiatifs dans le mulch (assimilé à un couvert végétal dont les feuilles sont horizontales) et l'interception de la pluie par celui-ci sont également traités. Les équations de transfert sont résolues numériquement par un schéma aux différences finies.

Les expériences de validation ont été effectuées en milieu tropical (Guadeloupe, 16°15 N, 61°40 W) pour un mulch de canne à sucre sur un sol ferrallitique. Les modules traitant de l'interception de la pluie et du rayonnement solaire sont validés individuellement à l'aide d'expérimentations spécifiques. Puis les paramètres microclimatiques ont été mesurés simultanément sur sol nu et sol mulché.

Le modèle est validé sur sol nu. Une validation complète sur mulch nécessite un effort méthodologique concernant la mesure des paramètres de transfert à l'intérieur de celui-ci.

HEAT AND MOISTURE TRANSFERS
IN THE SOIL VEGETATIVE-MULCH ATMOSPHERE SYSTEM :
MODELLING AND PREVIOUS EXPERIMENTAL VALIDATIONS;

SUMMARY :

A mechanistic model of coupled heat and moisture transfer between vegetative-mulch covered soil and the atmosphere was developed. A classical formalism was employed for the soil section. Conductive and convective transport inside the mulch were considered. We used a classical parametrization of the exchanges between an homogeneous canopy and the atmosphere. Radiation transfer and rainfall interception through the mulch, considered as a canopy with horizontal leaves were modelled. Conservation laws in these porous media are solved with a finit differences scheme.

Experimentations were made in tropical zone (Guadeloupe, 16°15 N, 61°40 W, FWI) with sugar cane leaves mulch over a ferrallitic soil. Specific validations are presented for rainfall and solar radiation interception. Then, an experiment using simultaneous microclimatic measurements on a bare and mulched soil was performed.

The whole model was validated with the bare soil data. Validation on the mulched part needs further methodological investigations in order to estimate transport coefficients into the mulches.