

Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs

I. Aspects théoriques

H. Sinoquet

Station Agropédoclimatique, Unité de Bioclimatologie, INRA Antilles-Guyane, BP 1232, F-97184 Pointe-à-Pitre Cedex, (Antilles), France

(reçu le 19-11-1987, accepté le 2-12-1988)

Résumé — Un modèle de transferts radiatifs dans les cultures en rangs, utilisant une approche probabiliste, est développé. La structure géométrique du couvert est traduite en termes de facteurs de forme qui sont calculés à partir des lois classiques d'extinction du rayonnement dans la végétation. Cette procédure permet de réduire de manière importante les temps de calcul. Les rayonnements interceptés par la culture et le sol sont calculés en utilisant la méthode des radiosités, ce qui permet d'intégrer l'ensemble des rediffusions successives. L'isotropie des rayonnements rediffusés au niveau des feuilles est l'hypothèse la plus forte. La validité de la méthode utilisée est testée en comparant les résultats du modèle à ceux du modèle de Bonhomme et Varlet-Grancher, qui a été établi pour les couverts homogènes. Il est ensuite démontré que la méthode des radiosités est équivalente à celle des rediffusions successives.

approche probabiliste – facteurs de forme – méthode des radiosités – couvert hétérogène – réflexion – transmission

Summary — **Modeling of solar radiation interception in row crops. I. Theoretical considerations.** A radiative transfer model in row crops using a probabilistic approach is presented. The geometric structure of the canopy is expressed in terms of view factors, which are calculated from the classical extinction laws of radiation. This procedure reduces greatly the computing time. Radiation intercepted by the crops and the soil is calculated using the radiosity method; this enables the integration of multiple scattering with a simple formalism and without considering successive scattering. The isotropy of scattered radiation at leaf level is the main assumption. The validity of the method is tested by comparing the results with those obtained by the model of Bonhomme and Varlet-Grancher, which was developed for homogeneous canopies. It is then proven that the radiosity method is equivalent to that of successive scattering.

probabilistic approach – view factors – radiosity method – heterogeneous canopy – reflection – transmission

Introduction

Depuis les travaux précurseurs de Monsi et Saeki (1953), de nombreux auteurs cherchent à modéliser les transferts radiatifs dans les cultures. L'objectif de ces modèles est de simuler les interactions entre rayonnement et végétation, qui jouent un rôle déterminant pour la photosynthèse et la transpiration des couverts végétaux.

La plupart de ces modèles considère que les couverts végétaux sont homogènes dans le plan horizontal. Cela signifie que l'éclairement moyen d'un plan horizontal situé à un niveau donné est

le même en tout point de ce plan. Dans le cas des cultures en rangs, la liste d'exemples répertoriés par Ross (1981) montre que la densité de surface foliaire varie beaucoup dans le plan horizontal pour de nombreuses cultures (blé, maïs, tournesol, féverole); cette hypothèse est alors mise en défaut.

La structure horizontale du couvert a d'abord été prise en compte grâce à des modèles géométriques. Dans une première approche, les rangs étaient représentés par des parallélépipèdes longs, opaques et absorbants (Jackson et Palmer, 1972) ou non; dans ce cas, la densité de

feuillage était supposée uniforme (Mutsaers, 1980) ou fonction de la distance au centre du rang (Allen, 1974). Dans une autre approche, les plantes étaient schématisées par des ellipsoïdes à l'intérieur desquelles la densité de surface foliaire était supposée uniforme (Charles-Edwards et Thornley, 1973; Charles-Edwards et Thorpe, 1976; Norman et Welles, 1983) ou non (Mann *et al.*, 1979).

Une autre démarche a consisté à étendre les modèles statistiques établis pour les couverts homogènes à des couverts présentant une structure hétérogène selon une direction du plan horizontal (Fukai et Loomis, 1976; Fukai et Davison, 1977) ou deux (Kimes et Kirchner, 1982). D'autre part, Myneni et Impens (1985) ont développé une nouvelle approche dite procédurale, qui peut être appliquée à tout couvert, quelle que soit sa structure géométrique.

Parmi ces modèles, peu tiennent compte des rayonnements rediffusés par les plantes; c'est cependant le cas des modèles statistiques, dans lesquels les rayonnements rediffusés par les plantes sont calculés par itérations successives; ces modèles calculent d'abord les rayonnements solaires direct et diffus interceptés par la culture, puis les rayonnements interceptés à la 1^{re}, 2^e, ... *n*^{ième} rediffusion. En pratique, les calculs sont arrêtés lorsque les flux rediffusés deviennent négligeables.

La méthode des radiosités (Osizik, 1981) permet d'intégrer l'ensemble des rediffusions en utilisant un formalisme simple et sans avoir à envisager les rediffusions successives. Cette méthode a déjà été employée pour résoudre le bilan radiatif à l'intérieur de bâtiments (Neveu, 1984) et dans un modèle géométrique d'interception du rayonnement solaire (Sinoquet, 1985). Nous l'utilisons ici dans un modèle statistique de transfert radiatif appliqué à une culture en rangs.

Théorie

Méthode des radiosités

Considérons une enceinte fermée formée de *ns* surfaces opaques. La radiosité d'une surface *i* désigne le flux quittant la surface, somme du flux émis et des flux incidents qui sont réfléchis par la surface. Soient R_i , M_i , E_i les radiosité, flux émis et flux incident de la surface *i*; le bilan radiatif de cette surface s'écrit :

$$R_i = M_i + r_i \cdot E_i \quad (1)$$

où r_i est le facteur de réflexion hémisphérique de la surface *i*.

Le flux reçu par la surface *i* est la somme de

toutes les radiosités des surfaces *j* de l'enceinte à laquelle appartient cette surface, pondérées par les facteurs de forme $f(j,i)$:

$$E_i = \sum_{j=1}^{ns} f(j,i) \cdot R_j \quad (2)$$

Cette relation (2) découle de manière directe de la définition même de la radiosité et du facteur de forme; $f(j,i)$ est en effet la proportion de rayonnement quittant la surface *j* qui est reçu par la surface *i*.

En substituant R_j par son expression (1) dans la relation (2), on obtient, pour chaque surface *i* de l'enceinte ($i=1, \dots, ns$) :

$$E_i = \sum_{j=1}^{ns} f(j,i) \cdot (M_j + r_j \cdot E_j) \quad (3)$$

L'ensemble de ces *ns* relations (3) constitue un système d'équations linéaires où les inconnues sont généralement les flux reçus E_i ; une telle formulation permet d'intégrer les rediffusions multiples qui ont lieu à l'intérieur de l'enceinte.

Application au couvert végétal

Dans le cas des modèles probabilistes appliqués aux couverts homogènes, la culture est représentée par des couches horizontales superposées à l'intérieur desquelles les propriétés géométriques du feuillage sont supposées homogènes (voir l'étude critique de Lemeur et Blad, 1974). Le même principe est appliqué à la culture en rangs en découpant la végétation d'une part en couches horizontales et d'autre part en tranches verticales parallèles à la direction du rang (Fukai et Davison, 1977). L'intersection d'une couche et d'une tranche définit ce qu'on peut appeler un tube dont la génératrice est parallèle à la direction du rang (Fig. 1). Chaque tube *k* est caractérisé par une densité de feuillage L_k (m^2 de surface foliaire par m^3) supposée homogène, et une distribution des inclinaisons $g_k(\alpha)$, $\alpha \in [0, \pi/2]$. Le couvert végétal est donc supposé être homogène dans la direction horizontale parallèle au rang; la succession des tranches verticales, qui définit aussi des bandes de sol, présente une évolution périodique de période égale à la distance entre deux rangs.

En ce qui concerne le rayonnement rediffusé par le feuillage et le sol, l'ensemble sol - végétation - ciel constitue un système fermé puisque tout rayonnement issu d'une bande de sol ou d'un tube de végétation est soit intercepté par des éléments de feuillage et/ou le sol, soit réfléchi vers le ciel. La méthode des radiosités est donc transposable au couvert végétal; les unités

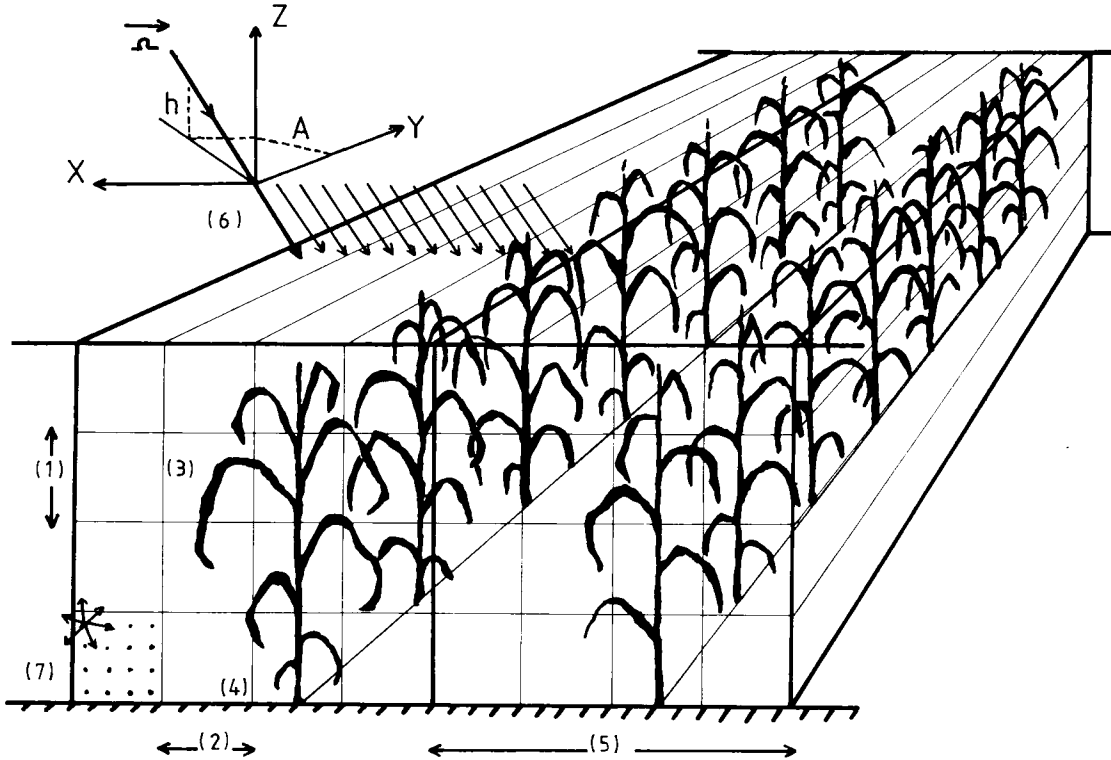


Fig. 1. Représentation schématique de la culture : coupe selon un plan vertical perpendiculaire à la direction des rangs. (1) : couche horizontale. (2) : tranche verticale. (3) : tube de végétation caractérisé par sa densité de surface foliaire et sa distribution d'inclinaisons. (4) : bande de sol. (5) : période d'évolution des tranches verticales. (6) : premier maillage, selon l'axe horizontal perpendiculaire aux rangs, utilisé pour l'interception des rayonnements issus du ciel. La direction du rayonnement incident est $\Omega (h,A)$. (7) : second maillage, sur la section du tube, utilisé pour la rediffusion du rayonnement.

qui échangent du rayonnement ne sont plus des surfaces opaques, mais des volumes de végétation (tubes) contenant des éléments de feuillage capables de rediffuser une partie du rayonnement reçu, par réflexion ou transmission. Le système est fermé, au niveau inférieur, par la surface du sol, opaque et réfléchissante. A la limite supérieure, il est bordé par le ciel, qui absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit.

Par conséquent, dans la relation (3), les flux E_j sont remplacés par des flux interceptés I_m par les tubes de végétation ou bandes de sol (pour $m=1, \dots, nk$); et les facteurs de réflexion r_j sont remplacés par des coefficients de diffusion σ_m . Le flux émis est nul dans la gamme de longueur d'onde du rayonnement solaire. En tenant compte des flux solaires interceptés direct S_k et diffus D_k , le flux I_k intercepté par chaque tube (ou bande) k ($k=1, \dots, nk$), a pour expression :

$$I_k = S_k + D_k + \sum_{m=1}^{nk} f(m,k) \cdot (\sigma_m \cdot I_m) \quad (4)$$

soit encore,

$$\sum_{m=1}^{nk} [\delta_{km} - f(m,k) \cdot \sigma_m] \cdot I_m = S_k + D_k \quad (5)$$

où δ_{km} est le symbole de Kronecker (si $k = m$,

$$\delta_{km} = 1; \text{ si } k \neq m, \delta_{km} = 0).$$

Dans la relation (4), les termes S_k et D_k représentent le flux intercepté par le tube k lors de la 1^{re} interception, ou encore la source de rayonnement. Quant au 3^e terme, il correspond au rayonnement issu de la rediffusion par le sol et la végétation.

Cette formulation, dérivée de la méthode des radiosités, permet d'obtenir, dans un système de nk équations (5), les flux totaux interceptés par chacun des tubes k . Elle nécessite cependant la résolution d'un système de nk équations.

Interception des rayonnements solaires direct et diffus

L'interception des rayonnements diffus et direct est traitée comme dans le modèle de Fukai et Davison (1977). Pour chaque direction incidente Ω caractérisée par une hauteur h et un azimuth A (Fig. 1), le calcul consiste à suivre le chemin parcouru par un rayon lumineux, c'est-à-dire à déterminer la probabilité de son extinction au cours de son passage dans le couvert végétal. En pratique, le rayon est suivi jusqu'à ce qu'il atteigne le sol ou jusqu'à ce que l'énergie transportée devienne négligeable. Comme le chemin du

rayon dépend du point d'entrée dans la végétation, un maillage est réalisé selon l'axe perpendiculaire à la direction des rangs (Fig. 1). La succession des tubes parcourus par un rayon entrant dans le couvert en un nœud i et l'épaisseur de feuillage traversée dans chaque tube résultent d'un calcul de géométrie simple, qui dépend de la direction Ω du rayon, du point d'entrée dans la culture et de la dimension des tubes. L'extinction du rayonnement au cours de son passage dans un tube k est supposée suivre une loi exponentielle classique de la forme :

$$t_k = \exp [-K^*(k, \Omega) \cdot L_k \cdot \delta z] \quad (6)$$

où t_k est le rapport des flux entrant et sortant du tube, L_k est la densité de surface foliaire du tube et δz la hauteur traversée dans le tube. $L_k \cdot \delta z$ représente donc l'épaisseur de feuillage traversée par le rayon. $K^*(k, \Omega)$ est le coefficient d'extinction du tube k pour la direction Ω , qui a pour expression générale (Nilson, 1971) :

$$K^*(k, \Omega) = - (1/s_k) \cdot \text{Ln} [1 - s_k \cdot K[g_k(\alpha), \Omega] / \sin(h)] \quad (7)$$

où $K[g_k(\alpha), \Omega]$ est la projection de l'unité de surface foliaire, d'inclinaison $g_k(\alpha)$, perpendiculairement à la direction Ω . La détermination de $K[g_k(\alpha), \Omega]$ est décrite, entre autres, par Chartier (1966). s_k est un coefficient caractérisant l'agencement des éléments de feuillage : 1) agencement régulier : $s_k > 0$; 2) agencement aléatoire : $s_k = 0$; 3) agencement agrégatif : $s_k < 0$.

Le paramètre s_k est soit ajusté aux données expérimentales (par exemple, Cohen et Fuchs, 1987), soit utilisé comme paramètre de calage du modèle (par exemple, Fukai et Loomis, 1976). En pratique, deux méthodes de détermination de s_k sont possibles : 1) d'une part, l'utilisation de la méthode des points quadrats (Warren Wilson, 1960; 2) d'autre part, la mesure des fréquences de trous (*gap frequency*) associée à une méthode de détermination de la structure du couvert. C'est ainsi que Prévot (1985) a procédé, en évaluant les fréquences de trous à partir de photographies hémisphériques (Anderson, 1964; Bonhomme et Chartier, 1972), et en évaluant la structure géométrique grâce à la méthode des silhouettes (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978).

Chaque fois qu'un rayon (de direction Ω) issu d'un nœud i traverse un tube k , une partie $(1-t_k)$ du flux entrant est interceptée. Dans le cas du rayonnement direct, si les tubes k_1, k_2, \dots, k_n correspondent à la succession des tubes parcourus par le rayon, le flux intercepté par le tube k_j est :

$$S_{i\Omega s}(k_j) = S_o \cdot t_{k1} \cdot t_{k2} \cdot \dots \cdot t_{kj-1} \cdot (1 - t_{kj}) \quad (8)$$

où Ω_s désigne la direction du soleil, S_o le rayon-

nement solaire direct sur un plan horizontal au dessus de la végétation. Le flux solaire direct intercepté par chaque tube k a pour expression :

$$S_k = (1/n_i) \cdot \sum_{i=1}^{n_i} S_{i\Omega s}(k) \quad (9)$$

où n_i est le nombre de nœuds du maillage.

Dans le cas de l'interception du rayonnement diffus, la voûte céleste est divisée en secteurs d'angle solide $\delta\Gamma$ compris entre les hauteurs h et $h + \delta h$ et les azimuts A et $A + \delta A$. Pour chaque direction Ω , le flux diffus entrant dans la végétation en un nœud i , qui est intercepté par un tube k_j se trouvant sur le chemin du rayon a une expression similaire à la relation (8) :

$$D_{i\Omega}(k_j) = D_\Omega \cdot t_{k1} \cdot t_{k2} \cdot \dots \cdot t_{kj-1} \cdot (1 - t_{kj}) \quad (10)$$

D_Ω correspond à la part de rayonnement diffus D_o sur le plan horizontal au dessus de la végétation, qui est issue de la direction Ω :

$$D_\Omega = (L_\Omega \cdot \sin h \cdot \delta\Gamma) / D_o \quad (11)$$

$$(\delta\Gamma = \cos h \cdot \delta h \cdot \delta A)$$

où L_Ω est la luminance du ciel dans la direction Ω , et h la hauteur correspondant à Ω . Les lois de répartition des luminances du ciel classiquement utilisées sont :

d'une part, la loi UOC (*uniform overcast sky*) :

$$L_\Omega = D_o / \pi \quad (\text{Walsh, 1961})$$

d'autre part, la loi SOC (*standard overcast sky*) :

$$L_\Omega = (D_o \pi) \cdot (3/7) \cdot (1 + 2 \cdot \sin h) \quad (\text{Moon \& Spencer, 1942})$$

Le flux diffus intercepté par chaque tube k est :

$$D_k = (1/n_i) \cdot D_o \cdot \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{\Omega=1}^{n_\Omega} D_{i\Omega}(k) = D_o \cdot f(C, k) \quad (12)$$

où $f(C, k)$ est le facteur de forme entre la voûte céleste et le tube k .

Calcul des facteurs de forme entre tubes

La notion de facteur de forme a déjà été appliquée aux échanges radiatifs dans les couverts végétaux homogènes par Kimes (1980) et Prévot (1985). Les facteurs de forme entre couches horizontales ont alors, pour une direction donnée, une expression analytique assez simple qui est fonction des fréquences de trous de chaque couche dans la direction considérée. Dans le cas d'une description de la culture en deux dimensions, seule une approche numérique permet de calculer les facteurs de forme entre tubes.

Compte tenu de l'hypothèse d'homogénéité de

la densité de surface foliaire à l'intérieur des tubes, on suppose que le rayonnement rediffusé par les plantes est issu de manière uniforme de chaque point du tube. Un second maillage est donc défini sur la section du tube (Fig. 1) et une même quantité de rayonnement est supposée être rediffusée à partir de chacun des nœuds. Cette hypothèse n'est pas très forte dans la mesure où l'on considère par la suite la moyenne des flux sur le tube.

La seconde hypothèse concerne l'isotropie des rayonnements rediffusés; nous supposons, d'une part, que les éléments de feuillage se comportent comme des surfaces lambertiennes pour la réflexion et la transmission et, d'autre part, que les facteurs de réflexion et de transmission sont égaux.

Dans ces conditions, les éléments de feuillage se comportent comme des diffuseurs parfaits : la luminance du rayonnement rediffusé est identique pour toutes les directions émergentes, quelle que soit la direction du rayonnement incident. Par conséquent, la part de rayonnement rediffusée dans une direction Ω ne dépend que de l'angle formé par la normale des éléments de surface des feuilles et la direction Ω . Plus précisément, elle ne dépend que du cosinus de cet angle, qui compte tenu de la distribution d'inclinaison $g_k(\alpha)$, n'est autre que le coefficient $K[g_k(\alpha); \Omega]$: projection de l'unité de surface foliaire perpendiculairement à la direction Ω . Autre conséquence, le coefficient de diffusion σ_m est alors égal à 2 r_f , r_f étant le facteur de réflexion des feuilles.

Comme dans le cas de l'interception du rayonnement diffus, les hémisphères supérieur et inférieur sont découpés en secteurs d'angle solide $\delta\Gamma$. Pour chaque direction Ω , le principe consiste, de façon analogue, à suivre le chemin parcouru par un rayon issu de chaque nœud i , jusqu'à ce qu'il sorte de la végétation (vers le ciel ou vers le sol).

La part de rayonnement rediffusé issu d'un tube m (et d'un nœud i) dans une direction Ω et qui est interceptée par un tube k_j situé sur le chemin du rayon à une expression analogue à la relation (8) :

$$Rm_{i\Omega}(k_j) = Rm_{i\Omega} \cdot t_{k1} \cdot t_{k2} \cdot \dots \cdot t_{kj-1} \cdot (1 - t_{kj}) \quad (13)$$

où $Rm_{i\Omega}$ est la part de flux quittant le tube source du nœud i dans la direction Ω ; compte tenu des hypothèses d'homogénéité et d'isotropie, on a (Sinoquet, 1988) :

$$Rm_{i\Omega} = (1/2\pi) \cdot K[g_m(\alpha), \Omega] \cdot \delta\Gamma \quad (14)$$

Le facteur de forme entre un tube m et un tube k a finalement pour expression :

$$f(m, k) = (1/n_i) \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{\Omega=1}^{n\Omega} Rm_{i\Omega}(k) \quad (15)$$

n_i étant le nombre de nœuds du second maillage.

Le cas des bandes de sol et du ciel (qui reçoit le rayonnement réfléchi) est traité de manière similaire; le rayonnement est supposé être rediffusé par le sol de façon lambertienne et homogène sur la largeur de la bande. Les facteurs de forme entre tubes de végétation et bandes de sol représentent la part de rayonnement rediffusé par le feuillage, qui est interceptée par le sol. De même, les facteurs de forme entre tubes et ciel permettent de calculer le rayonnement réfléchi : ils expriment la part de rayonnement ascendant, qui n'est pas interceptée au cours de son passage dans le couvert.

Déroulement pratique des calculs

Les calculs ont lieu en 4 étapes : 1) calcul des coefficients d'extinction des tubes de végétation pour chaque direction Ω : $K^*(k, \Omega)$; 2) calcul des facteurs de forme entre le ciel et chaque tube k : $f(C, k)$; 3) calcul des facteurs de forme entre tubes : $f(m, k)$; 4) calcul, pour une situation particulière, des rayonnements réfléchi vers le ciel et interceptés (ou absorbés) par chaque tube de végétation et chaque bande de sol.

Chaque situation particulière correspond à : 1) une position du soleil, définie par la latitude du lieu, la date et l'heure; 2) une orientation des rangs de la culture; 3) une longueur d'onde ou un domaine de longueurs d'onde dans lequel les propriétés radiatives des feuilles et du sol peuvent être supposées constantes; 4) un rayonnement direct S_o et un rayonnement diffus D_o incidents.

La 4^e étape commence par le calcul des flux directs interceptés S_k . Tous les éléments nécessaires à la résolution du système des radiosités sont alors présents. Le flux radiatif absorbé par chaque tube de végétation k est alors :

$$A_k = (1 - \sigma_k) \cdot I_k \quad (16)$$

Le rayonnement transmis au niveau d'une bande de sol ks est simplement I_{ks} . Quant au rayonnement réfléchi vers le ciel, il a pour expression :

$$I_c = \sum_{m=1}^{nk} f(m, c) \cdot \sigma_m \cdot I_m \quad (17)$$

Rappelons que les flux calculés sont des flux hémisphériques, rapportés à l'unité de surface de sol.

Cette procédure permet de réduire le temps d'exécution des calculs sur ordinateur. Les 3

premières étapes ne dépendent que de la structure géométrique du couvert, qui est en fait caractérisée par les facteurs de forme entre ciel et tubes et entre tubes. Lorsque la structure géométrique de la culture est traduite en termes de facteurs de forme, il suffit de répéter seulement la 4^e étape pour suivre l'évolution du bilan radiatif de la culture au cours de la journée pour différents domaines de longueur d'onde. C'est à notre avis un des grands intérêts de la démarche.

Pratiquement, le modèle est implanté sur un ordinateur DPS 8/62 sous système Multics (CII Honeywell Bull). Il est constitué de 6 programmes écrit en FORTRAN 77, correspondant à 400 lignes d'instructions. Les programmes sont liés entre eux et interfacés avec le logiciel de gestion de données Consistent System (Renaissance Computing, Inc.), qui permet de traiter facilement les tableaux de résultats bruts. La simulation complète du bilan radiatif de la culture pour une journée (soit 10 pas de temps) et pour 2 domaines de longueur d'onde (visible et proche infrarouge) utilise 65 secondes de CPU. Une fois les facteurs de forme calculés, le temps d'exécution est réduit à 25 sec d'unité centrale.

Application du modèle aux couverts homogènes

Dans une première étape, nous avons effectué une comparaison de ce modèle à celui de Bonhomme et Varlet-Grancher (1977). Ce dernier basé sur les lois de transferts radiatifs en milieu diffusant de Kubelka et Munk (1931), permet d'obtenir une solution analytique pour le rayonnement absorbé par la culture, et cela, en tenant compte des rediffusions multiples à l'intérieur du couvert. La comparaison des deux modèles permet de tester la méthode des radiosités et la méthode de discrétisation utilisée pour décrire la culture. Dans l'application aux couverts homogènes, tous les tubes de végétation sont supposés posséder les mêmes caractéristiques L_k et $g_k(\alpha)$.

Les deux modèles ne s'appliquent théoriquement qu'à des rayonnements monochromatiques puisque les propriétés optiques des feuilles et du sol dépendent de la longueur d'onde. Dans le domaine spectral du rayonnement solaire, les mesures de Knipling (1970) montrent qu'on peut distinguer 2 zones où les propriétés optiques des feuilles peuvent, en première approximation, être considérées comme constantes : le visible (400–700 nm), le proche infrarouge (700–1300 nm). L'énergie de longueur d'onde supérieure à 1300 nm représente une faible part de l'énergie solaire incidente et le rayonnement au dessus de

la végétation se décompose, en première approximation, en 50% d'énergie appartenant au visible et 50% au proche infrarouge (Varlet-Grancher, 1975). Pour calculer l'interception du rayonnement solaire, 2 simulations sont donc nécessaires, avec les paramètres optiques correspondant à chacune des bandes spectrales.

Comparaison des albédos

Le modèle a été testé à partir d'un jeu de données fourni par Bonhomme et Varlet-Grancher (1977). Les mesures d'albédo ont été effectuées sur une culture de maïs, caractérisée par une inclinaison moyenne des feuilles égale à 55°. Les facteurs de réflexion des feuilles et du sol étaient respectivement 0,10 et 0,15 pour le visible, et 0,40 et 0,15 pour le proche infrarouge. Pour la variation de l'albédo en fonction de l'indice foliaire, les 2 modèles donnent des résultats similaires, qui s'ajustent bien aux mesures (Fig. 2). On remarque cependant une sous-estimation de l'albédo pour les indices foliaires supérieurs à 1,5; elle peut être attribuée à des variations des conditions de ciel, supposé couvert dans les simulations. Les écarts entre le modèle (M_1) et celui de Bonhomme et Varlet-Grancher (M_2), varient, avec les indices foliaires croissants, de - 0,001 à - 0,004 pour le rayonnement visible, de + 0,002 à - 0,018 pour l'infrarouge et de 0 à - 0,011 pour l'ensemble du rayonnement solaire.

La Fig. 3 montre l'évolution de la réflectance du couvert en fonction de la hauteur du soleil pour un indice foliaire de 2,5. La concordance entre les 2 modèles est encore bonne et les valeurs calculées sont toujours comprises dans l'intervalle de confiance des mesures. Les écarts maximaux entre les deux modèles ont lieu pour les faibles hauteurs du soleil; ils sont de - 0,013 pour le visible et - 0,031 pour l'infrarouge. En pratique, ces écarts sont peu importants, car ils correspondent à des heures où le rayonnement incident est faible; ils peuvent cependant être expliqués par une hypothèse simplificatrice du modèle M_1 : le coefficient d'extinction du rayonnement direct (de direction Ω_s), est le coefficient moyen de l'angle solide $\delta\Gamma$ auquel appartient la direction Ω_s .

Comparaison des efficacités d'absorption de la culture

L'efficacité d'interception est calculée en faisant la somme des flux absorbés par chaque tube de végétation, et en la rapportant au rayonnement incident.

Le jeu de données utilisé est issu de mesures effectuées sur des cultures de canne à sucre

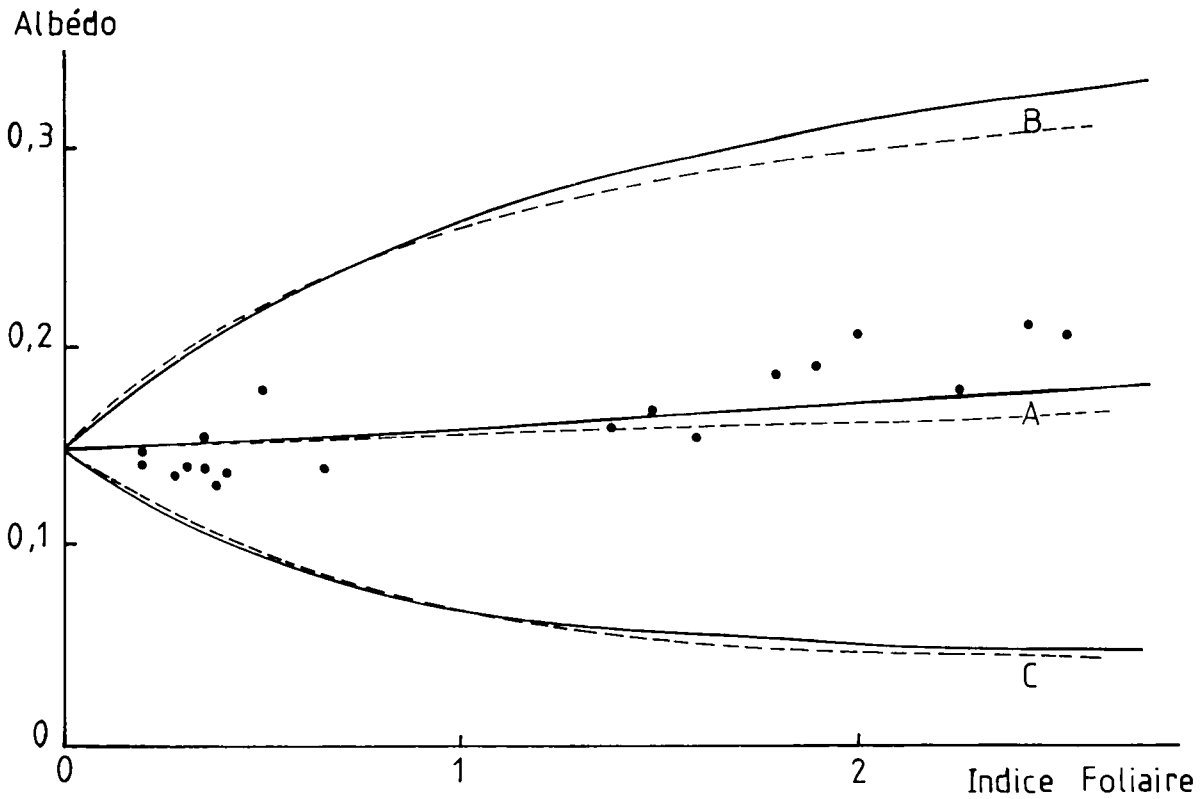


Fig. 2. Evolution de l'albédo d'une culture de maïs en fonction de l'indice foliaire de la culture; ciel couvert. **A** : évolution calculée pour le rayonnement global. **B** : évolution calculée pour le rayonnement proche infrarouge. **C** : évolution calculée pour le rayonnement visible. — : modèle de Bonhomme et Varlet-Grancher (1977). - - : modèle testé. • : mesures (valeurs journalières; d'après Bonhomme et Varlet-Grancher, 1977).

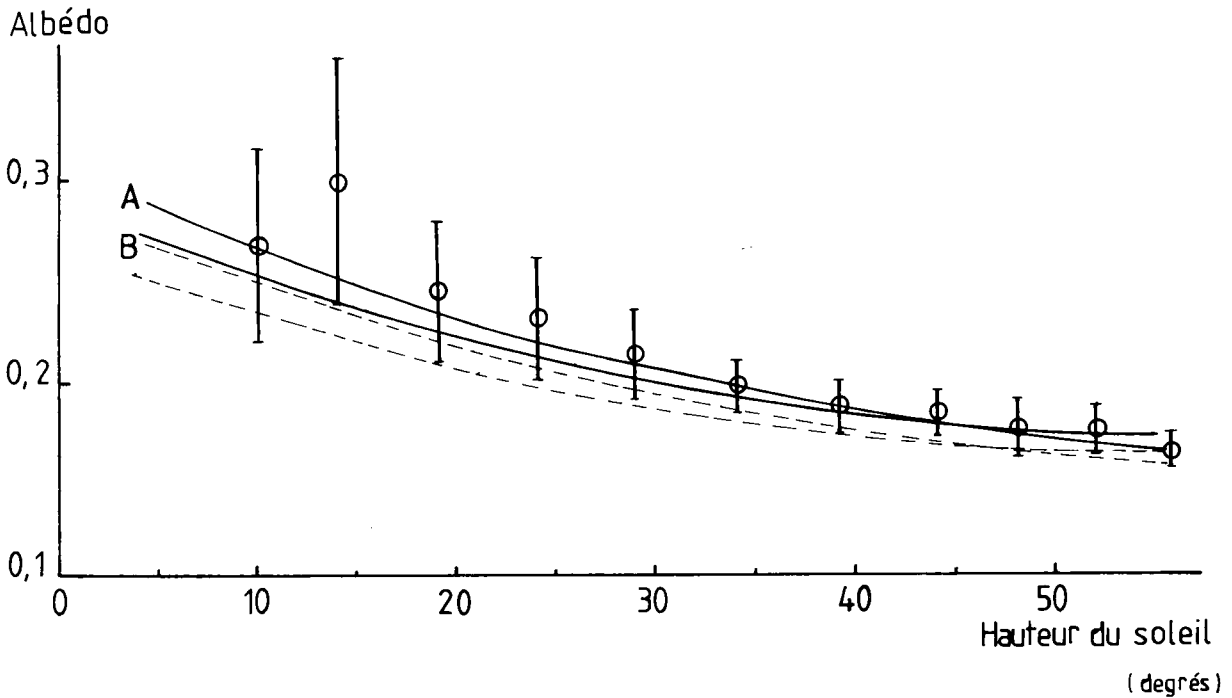


Fig. 3. Variation de l'albédo d'une culture de maïs en fonction de la hauteur du soleil. **A** : albédo calculé pour $D_0 / G_0 = 0,10$. **B** : albédo calculé pour $D_0 / G_0 = 0,25$. — : modèle de Bonhomme et Varlet-Grancher (1977). - - : modèle testé. Φ : mesures (avec les intervalles de confiance; d'après Bonhomme et Varlet-Grancher, 1977).

(Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979), caractérisées par une inclinaison moyenne de 65° . Les absorbances simulées par les modèles M_1 et M_2 sont très proches (Fig. 4a et b) et les relations de régression entre les deux modèles sont excellentes :

$$\varepsilon_{\text{vis}}(M_1) = 1,001 \varepsilon_{\text{vis}}(M_2) + 0,004 \quad (r^2 = 0,999)$$

$$\varepsilon_{\text{tot}}(M_1) = 1,001 \varepsilon_{\text{tot}}(M_2) + 0,010 \quad (r^2 = 0,999).$$

Les écarts entre les deux modèles sont maximaux pour les faibles indices foliaires (0,010 pour ε_{vis} et 0,017 pour ε_{tot}); ils diminuent progressivement et sont pratiquement nuls (0,003) pour les grands indices foliaires.

Les 2 modèles fournissent donc des résultats assez proches. Les différences peuvent s'expliquer par la discrétisation plus ou moins arbi-

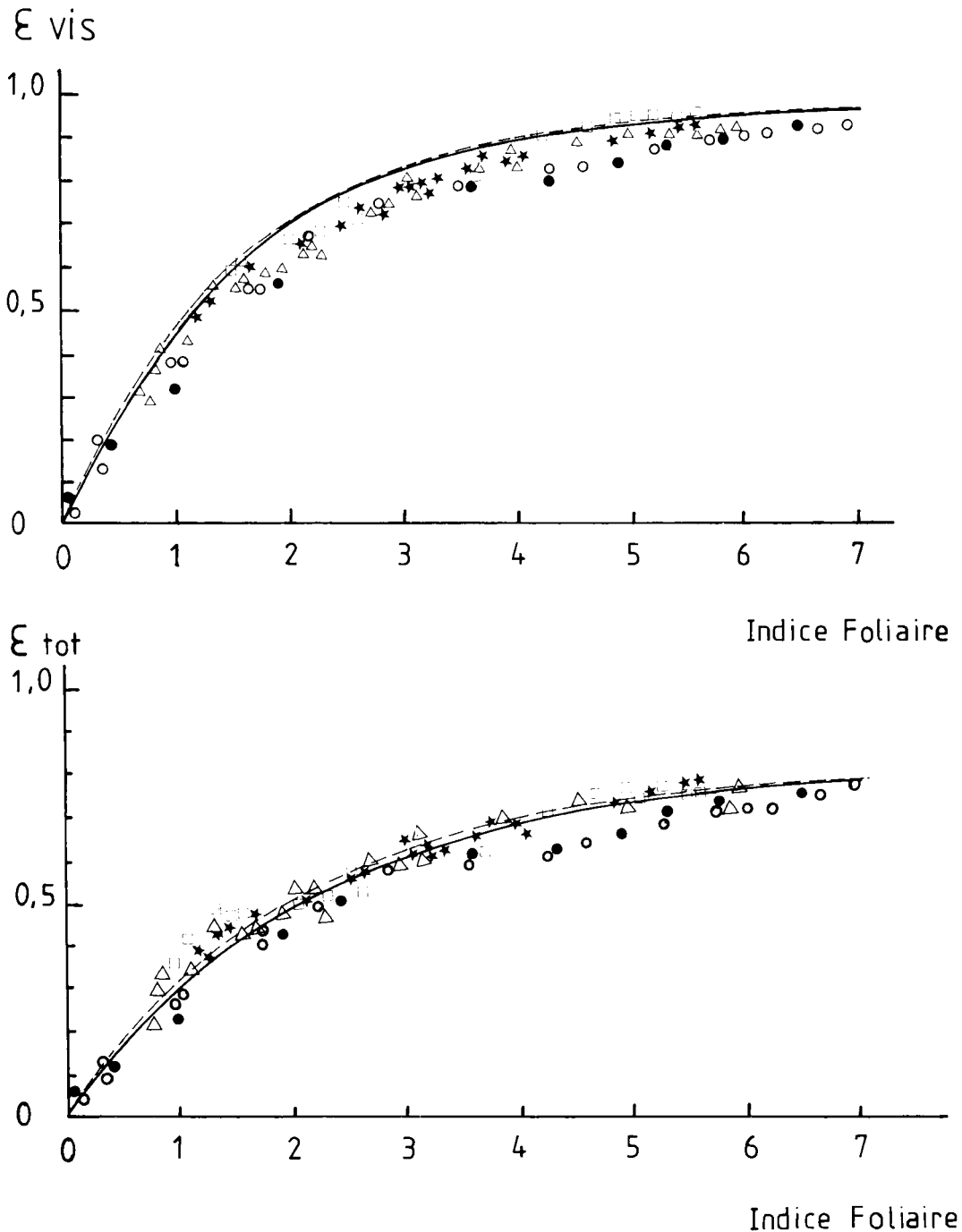


Fig. 4. Evolution des valeurs journalières de ε_{vis} et ε_{tot} de cultures de canne à sucre en fonction de l'indice foliaire; ciel couvert. Mesures (d'après Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979). \circ : variété PR1059 année 1973-1974; \bullet : variété PR1059 année 1974-1975; \star : variété PR1059 année 1975-1976; Δ : variété HJ5764 année 1975-1976; \square : variété B 64277 année 1975-1976; — : modèle de Bonhomme et Varlet-Grancher (1977); - - - : modèle testé. **a** • ε_{vis} calculée avec : inclinaison des feuilles : 65° ; facteur de réflexion des feuilles (domaine visible) : 0,075; facteur de réflexion du sol (domaine visible) : 0,070. **b** • ε_{tot} calculée avec les mêmes valeurs et : facteur de réflexion des feuilles (domaine proche infrarouge) : 0,40; facteur de réflexion du sol (domaine proche infra-rouge) : 0,080.

traire qui est faite dans le modèle M_1 ou par les hypothèses simplificatrices utilisées dans le modèle M_2 pour les flux rediffusés par les plantes.

En revanche, les calculs ne sont pas toujours très bien ajustés aux mesures. Dans le domaine visible, l'efficacité d'interception est surestimée, et l'ajustement correct pour le rayonnement global permet de supposer une sous-estimation de l'efficacité dans la gamme de longueur d'onde du proche infrarouge. Diverses hypothèses adoptées dans le modèle M_2 , ou communes aux deux modèles permettent d'expliquer ces écarts : 1) assimilation de la géométrie de la culture à la seule inclinaison moyenne (M_2); 2) agencement des éléments de feuillage supposé aléatoire (M_2); 3) effet de l'orientation des rangs négligé (M_2); 4) non-prise en compte des tiges dans l'indice foliaire (M_1 et M_2); 5) réflectance et transmittance des feuilles égales (M_1 et M_2); 6) comportement lambertien des feuilles (M_1 et M_2); 7) mauvaise estimation du rapport des flux incidents diffus et direct.

Il est cependant assez difficile d'estimer le poids respectif de chacune d'entre elles. Les hypothèses spécifiques du modèle M_2 pourront être testées à partir du modèle M_1 ; celles qui concernent les deux modèles pourraient être évaluées par comparaison à un modèle traitant de façon plus précise la rediffusion des rayonnements (par exemple, le modèle de Prévot, 1985).

Discussion

Comparaison de la méthode itérative et de la méthode des radiosités

La méthode itérative consiste à calculer les flux interceptés par chaque tube à chaque rediffusion par les feuilles et le sol, et cela jusqu'à ce que les rayonnements rediffusés deviennent négligeables. En utilisant les facteurs de forme, le flux intercepté à la n^e rediffusion par chaque tube k a pour expression :

$$I_k(n) = \sum_{m=1}^{nk} f(m,k) \cdot \sigma_m \cdot I_m(n-1) \quad (18)$$

$I_k(0)$ est le flux radiatif intercepté à la 1^{re} interception; $I_k(0)$ correspond donc à l'interception des rayonnements solaires direct et diffus :

$$I_k(0) = S_k + D_k \quad (19)$$

Le flux total intercepté I_k correspond à la somme des flux interceptés à la première interception et à chaque rediffusion :

$$I_k = \sum_{n=0}^{\infty} I_k(n) \quad (20)$$

On montre facilement que la méthode itérative et celle des radiosités aboutissent à des résultats identiques. Il suffit de faire la somme membre à membre de la relation (19) avec les relations (18) pour $n = 1, \dots, \infty$:

$$\sum_{n=0}^{\infty} I_k(n) = S_k + D_k + \sum_{m=1}^{nk} f(m,k) \cdot \sigma_m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} I_m(n) \quad (21)$$

Compte tenu de la relation (20), les relations (21) et (4) sont équivalentes. D'un point de vue théorique, il semble préférable d'utiliser un formalisme conduisant à une solution exacte et permettant de prendre en compte l'ensemble des rediffusions en une seule relation, plutôt que de chercher à calculer de manière directe une somme infinie. Il faut cependant noter que, dans le cas extrême où les facteurs d'absorption des feuilles et du sol sont nuls, la quasi-totalité du rayonnement incident est réfléchi vers le ciel après 6 rediffusions (Myneni *et al.*, 1987).

Inversement, la méthode itérative peut être considérée comme une des méthodes numériques possibles de résolution du système des radiosités; elle ressemble beaucoup à la méthode de Jacobi (décrite, entre autres, par Nougier, 1985). La condition sur la matrice des coefficients du système, qui traduit la convergence vers 0 des $I_k(n)$ quand n tend vers l'infini, est la même. Dans ce cas, la programmation des calculs devient absolument identique pour les deux méthodes.

Discussion de l'hypothèse d'isotropie

L'hypothèse d'isotropie des rayonnements rediffusés est très utile car elle permet de simplifier les calculs, notamment en évitant de considérer les flux directionnels. Elle est en fait la conséquence de deux hypothèses sous-jacentes, qui sont d'une part l'égalité de la réflectance et de la transmittance des feuilles et, d'autre part, le comportement isotrope de la réflexion et de la transmission au niveau des feuilles.

La première hypothèse, introduite dans de nombreux modèles de transferts radiatifs, n'est pas toujours très bien vérifiée, même si les spectres de réflectance et de transmittance des feuilles évoluent de façon analogue (Knipling, 1970). Quant à la seconde, les travaux de Breece et Holmes (1971), sur des feuilles de soja et maïs, montrent en effet que la transmittance suit assez bien la loi de Lambert, quelle que soit la

direction du rayonnement incident. Par contre, la réflectance est d'autant plus spéculaire que l'angle d'incidence est important, mais cette tendance est d'autant moins marquée que l'absorption est faible (domaine spectral du proche infrarouge).

La suppression de cette hypothèse impliquerait l'introduction de facteurs de forme directionnels (entre voûte céleste et tubes, et entre tubes) et d'une fonction de phase $P_k(\Omega', \Omega)$ pour chaque tube k . La fonction de phase (Hopf, 1934) représente la probabilité qu'un rayonnement incident de direction Ω' soit rediffusé dans la direction Ω . Dans le cas des tubes de végétation, la fonction $P_k(\Omega', \Omega)$ dépend de la distribution des inclinaisons $g_k(\alpha)$ et des propriétés optiques directionnelles des éléments de feuillage.

La prise en compte de la non-isotropie des rayonnements rediffusés n'est pas incluse dans les calculs informatiques actuels. Elle pourra cependant faire l'objet d'un développement ultérieur du modèle, tout en permettant de continuer à utiliser la méthode des radiosités. L'état actuel du modèle correspond donc à un compromis, dont l'enjeu est la lourdeur des calculs : la simplification effectuée au niveau du champ de rayonnement rediffusé permet en effet de prendre en compte une structure du couvert bidimensionnelle.

Conclusion

L'intérêt d'un tel modèle réside dans l'utilisation de la notion de facteur de forme et dans l'extension de la méthode des radiosités aux transferts radiatifs dans le couvert végétal. En effet, si la démarche utilisée pour décrire les interactions entre rayonnement et végétation est classique, la représentation de la structure géométrique du couvert en termes de facteurs de forme permet une réduction importante des temps de calcul. Lorsque les facteurs de forme sont déterminés, le calcul des rayonnements interceptés ou réfléchis est réduit à la résolution du système des radiosités et, pour un grand nombre de simulations à effectuer où la structure géométrique reste la même, seuls les coefficients du système varient.

Dans cette première partie, la validation sur couverts homogènes par comparaison avec un modèle plus simple, ne permettant pas de prendre en compte les hétérogénéités, indique un bon fonctionnement du modèle développé. Dans la seconde partie de cet article, la capacité du modèle à prendre en compte les hétérogénéités horizontales d'un couvert sera testée en le

validant à l'aide de mesures effectuées sur des cultures de maïs en rangs.

Références

- Allen L.H. (1974) Model of light penetration into a wide-row crop. *Agron. J.* 66, 41-47
- Anderson M.C. (1964) Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions. *J. Ecol.* 52, 27-41
- Bonhomme R. & Chartier P. (1972) The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Isr. J. Agric. Res.* 22, 53-61
- Bonhomme R. & Varlet-Grancher C. (1977) Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. I. Etablissement des lois et vérifications expérimentales. *Ann. Agron.* 28, 567-582
- Bonhomme R. & Varlet-Grancher C. (1978) Estimation of the gramineous crop geometry by plant profiles including leaf width variations. *Photosynthetica* 12, 193-196
- Breece H.T. & Holmes R.A. (1971) Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves *in vivo*. *Appl. Optics* 10, 119-127
- Charles-Edwards D.A. & Thornley J.H.M. (1973) Light interception by an isolated plant: a simple model. *Ann. Bot.* 37, 919-928
- Charles-Edwards D.A. & Thorpe M.R. (1976) Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. *Ann. Bot.* 40, 603-613
- Chartier P. (1966) Etude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. Agron.* 17, 571-602
- Cohen S. & Fuchs M. (1987) The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a Shamouti Orange hedgerow orchard. I. Leaf area and radiation. *Agric. For. Meteorol.* 40, 123-144
- Fukai S. & Davison L. (1977) Estimation of radiation environments in row-planted communities by a leaf geometry model. Second Australasian Conference on Heat and Mass Transfer, Sydney, February 1977, pp. 21-28
- Fukai S. & Loomis R.S. (1976) Leaf display and light environments in row-planted cotton communities. *Agric. Meteorol.* 17, 353-379
- Hopf E. (1934) *Mathematical Problems of Radiative Equilibrium*. Cambridge University Press, London
- Jackson J.E. & Palmer J.W. (1972) Interception of light by model hedgerow orchards in relation to latitude, time of year and hedgerow configuration and orientation. *J. Appl. Ecol.* 9, 341-357
- Kimes D.S. (1980) Effects of vegetation canopy structure on remotely sensed canopy temperatures. *Remote Sensing Environ.* 10, 165-174
- Kimes D.S. & Kirchner J.A. (1982) Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. *Appl. Optics* 21, 4119-4129
- Knipling E.B. (1970) Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing Environ.* 1, 155-159
- Kubelka P. & Munk F. (1931) Ein Beitrag zur Optik der Farbenstriche. *Z. Tech. Phys.* 12, 593-601
- Lemeur R. & Blad B.L. (1974) A critical review of light

- models for estimating the shortwave radiation regime of plants canopies. *Agric. Meteorol.* 14, 255-286
- Mann J.E., Curry G.L. & Sharpe P.J.H. (1979) Light interception by isolated plants. *Agric. Meteorol.* 20, 205-214
- Monsi M. & Saeki T. (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.* 14, 22-52
- Moon P. & Spencer D.E. (1942) Illumination from a non-uniform sky. *Trans. Illum. Eng. Soc.* 37, 707-712
- Mutsaers H.J.W. (1980) The effect of row orientation, date and latitude on light absorption by row crops. *J. Agric. Sci., Camb.* 95, 381-386
- Myneni R.B., Asrar G. & Kanemasu E.T. (1987) Light scattering in plant canopies: the method of Successive Orders of Scattering Approximation (SOSA). *Agric. For. Meteorol.* 39, 1-12
- Myneni R.B. & Impens I. (1985) A procedural approach for studying the radiation regime of infinite and truncated foliage spaces. Part I. Theoretical considerations. *Agric. For. Meteorol.* 33, 323-337
- Neveu A. (1984) Etude d'un code de calcul d'évolution thermique d'une enveloppe de bâtiment. Thèse DDI, Paris VI
- Nilson T. (1971) A theoretical analysis of the frequency of gaps in plants stands. *Agric. Meteorol.* 8, 25-38
- Norman J.M. & Welles J.M. (1983) Radiative transfer in an array of canopies. *Agron. J.* 75, 481-488
- Nougier J.P. (1985) *Méthodes de calcul numérique*, Masson, Paris, 2^e éd.,
- Ozsisik N.M. (1981) *Radiative transfer*, Wiley Interscience, New York
- Prévot L. (1985) Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux, application à la télédétection, validation sur un couvert de Maïs. Thèse d'université, Paris VI
- Ross J. (1981) *The radiation regime and architecture of plants stands*. (Junk W., ed.), The Netherlands,
- Sinoquet H. (1985) *Essai de modélisation de l'interception du rayonnement solaire par les cultures en rang*. Internal note, INRA Guadeloupe
- 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 DDI, INA
- Varlet-Grancher C. (1975) Variation et estimation de l'énergie d'origine solaire reçue sur des plans d'inclinaison et d'azimut variables. *Ann. Agron.* 26, 245-264
- Varlet-Grancher C. & Bonhomme R. (1979) Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. II. Interception de l'énergie solaire par une culture. *Ann. Agron.* 30, 1-26
- Walsh J.W.T. (1961) *The Science of Daylight*. Mac Donald, London
- Warren Wilson J. (1960) Inclined point quadrat. *New Phytol.* 58, 92-101