

Simulation des échanges radiatifs sur maquettes informatiques de *Elaeis guineensis*

*Radiative transfer simulation on computer models of *Elaeis guineensis**

J. DAUZAT⁽¹⁾

Résumé. — Des maquettes informatiques d'arbres sont utilisées pour l'étude des échanges radiatifs au sein d'une palmeraie. Les données morphologiques nécessaires à la construction des maquettes ont été mesurées sur un ensemble d'arbres d'une plantation en Côte-d'Ivoire (Lecoustre *et al.*, 1993). A partir de ces données, le logiciel AMAP du CIRAD a permis reconstituer une scène de 11 palmiers. Différents modèles numériques ont ensuite été mis en œuvre pour simuler l'interception et la rediffusion de la lumière au sein de la scène constituée. Des mesures radiatives *in situ* ont été effectuées dans la palmeraie étudiée pour contrôler la qualité des simulations : rayonnement incident (direct et diffus) et rayonnement transmis au sol. La répartition du rayonnement transmis au niveau du sol a été simulée grâce au modèle "Shadow". Bien que ce modèle ne prenne pas explicitement en compte la rediffusion du rayonnement intercepté, les taux de transmission simulés sont très proches des taux mesurés. Ce modèle est donc particulièrement utile pour évaluer les possibilités de cultures associées. Le modèle "transrad" simule les rediffusions multiples de la lumière au sein de la canopée et permet d'obtenir un bilan radiatif détaillé. Les simulations effectuées montrent que les palmiers les plus basses (jusqu'au rang 34) interceptent une fraction relativement importante du Rayonnement Photosynthétiquement Actif. Un modèle de lancer de rayons a enfin servi à simuler la réflectance directionnelle de la palmeraie. L'utilisation de maquettes informatiques permet des analyses détaillées très utiles dans le domaine de la télédétection. La mise en œuvre de modèles radiatifs numériques sur des maquettes informatiques tri-dimensionnelles permet de décrire de façon précise et détaillée les phénomènes radiatifs au sein d'une palmeraie. Cette approche ouvre un large champ d'applications : détermination des densités optimales de plantation, pratique de l'élagage, évaluation des possibilités d'implantation de cultures associées, interprétation des données de télédétection... Le travail engagé doit être poursuivi sur d'autres palmeraies à différents âges et avec diverses variétés.

Mots clés. — Palmier à huile, maquettes informatiques de plantes, échanges radiatifs, simulation

INTRODUCTION

Les modèles classiquement utilisés pour simuler les échanges radiatifs au sein d'un couvert végétal reposent sur une représentation simplifiée des plantes qui le composent : par exemple, Li et Strahler (1985) représentent des conifères par des cônes tandis que Charles-Edwards et Thorpe (1976) représentent des couronnes de pommiers par des ellipsoïdes. On suppose en outre que les feuilles sont réparties aléatoirement à l'intérieur de ces formes géométriques. Il est néanmoins possible à l'heure actuelle de générer des représentations beaucoup plus réalistes des plantes en modélisant leur architecture et d'éviter ainsi ces simplifications relatives à la représentation de l'enveloppe extérieure des couronnes et au mode de répartition des feuilles à l'intérieur de celles-ci.

La modélisation mathématique de l'architecture des plantes a été initiée par de Reffye dans le cadre de travaux sur le caféier

Abstract. — Radiative transfers within oil palm stands can be studied using computer models of trees. The morphological data required for generating computer models were measured on a set of palms in Ivory Coast as described in R. Lecoustre *et al.* (1993). The CIRAD-AMAP software was then used to reconstitute a scene of 11 palms. Different numerical models were subsequently used to simulate the interception and the scattering of light within the scene. *In situ* radiative measurements were carried out in the observed stand: incident radiation (direct and diffuse) and radiation transmitted to soil level. The "Shadow" model was used to simulate the pattern of transmitted radiation at soil level. Despite this model does not thoroughly account for scattering by the canopy, the light transmission rates simulated by this model were quite close to the observed ones. This model is therefore of particular interest for intercropping management. The "Transrad" model simulates multiple scattering of light and yields as output a complete radiative balance of the canopy. The simulations showed that the lower leaves (up to rank 34) still absorb high levels of photosynthetically active radiation. Last, the directional reflectance of the stand was simulated with a ray-tracing model. Because the calculations lay on realistic palm models, accurate simulations are performed. Such simulations could be of great help for remote sensing studies. Three dimensional computer mock-ups of palms enable detailed and accurate simulations of radiative transfers using numerical models. Such an approach opens a wide field of applications: selection of optimal tree density, management of leaf pruning, assessment of intercropping possibilities, remote sensing interpretation. Further work is to be carried on for different palm stands, at different ages and with different varieties.

Key words. — Oil palm, computer models of plants, radiative transfer, simulation

INTRODUCTION

The models conventionally used to simulate radiative transfers within tree stands are based on a simplified representation of their elements: for example, Li and Strahler (1985) represented conifers as cones whereas Charles-Edwards and Thorpe (1976) represented apple trees crowns as ellipsoids. Furthermore, the leaves are assumed to be randomly distributed within these geometric shapes. Nevertheless, it is now possible to generate much more realistic representations of plants by modeling their architecture, hence no longer over-simplifying the representation of the external envelopes of the crowns and leaf distribution patterns within them.

Mathematical modeling of plant architecture was initiated by de Reffye (1981) within his work on coffee. This approach

(1) Unité de Modélisation des Plantes du CIRAD/GERDAT

(1) Plant Modeling Unit CIRAD/GERDAT

(1981). Cette approche a par la suite été développée au sein de l'Unité de Modélisation des Plantes du CIRAD/GERDAT et de nombreuses plantes tropicales et tempérées ont déjà fait l'objet d'une modélisation. Trois palmacées ont été étudiées : *Elaeis guineensis* (Lecoustre, 1993), *Phoenix dactylifera* (Dauzat et Peyron, 1991) et *Cocos nucifera* (Girard, 1992).

Grâce à la modélisation architecturale, des maquettes informatiques tridimensionnelles de plantes peuvent être générées. Ces maquettes contiennent toutes les informations géométriques et topologiques utiles. On connaît par exemple pour les maquettes d'*Elaeis* générées (Lecoustre, 1993) non seulement la position spatiale, les dimensions et l'orientation de chaque foliole, mais aussi leur rang sur la palme et le rang de la palme. Pour utiliser pleinement l'ensemble de ces informations, nous avons développé trois modèles radiatifs numériques :

- un modèle "Shadow", surtout destiné au calcul de l'interception du rayonnement incident et à la cartographie du rayonnement transmis au sol ;
- un modèle "Transrad" qui simule le climat radiatif au sein de la canopée et peut être utilisé pour des calculs de photosynthèse ;
- un modèle de lancer de rayons capable de décrire finement les échanges radiatifs et particulièrement la réflectance directionnelle d'un couvert.

Diverses simulations radiatives sur un couvert de palmiers à huile permettront de montrer l'intérêt et la spécificité de chacun de ces modèles.

MATERIEL ET METHODES

L'étude comporte quatre volets :

- des mesures architecturales détaillées sur des palmiers hybrides âgés de 6 ans à La Mé en Côte-d'Ivoire ;
- des mesures du rayonnement transmis sous ces mêmes arbres ;
- une modélisation stochastique de l'architecture des arbres étudiés suivie de la création de maquettes informatiques ;
- la simulation des échanges radiatifs sur ces maquettes.

Les mesures architecturales et la modélisation des arbres étant présentées par ailleurs (Lecoustre, 1993) nous présentons ici uniquement les volets 2 et 4.

Le rayonnement photosynthétiquement utilisable (PAR) transmis au sol a été mesuré dans 2 triangles élémentaires⁽¹⁾ adjacents (Fig. 1a). Ces mesures ont été réalisées au moyen d'un quantum sensor linéaire (LICOR LI-191SB) déplacé toutes les quinze secondes environ de manière à obtenir un échantillonnage spatial du rayonnement transmis en 16 points de mesure par triangle. Simultanément le rayonnement global incident et le rayonnement diffus ont été mesurés par deux quantum sensors ponctuels (LICOR LI-190SB). Tous les signaux ont été enregistrés sur une centrale d'acquisition (DELTA-T 21X). Huit séries de mesures ont ainsi été réalisées, pour différentes journées et à différentes heures. Les résultats ont ensuite été représentés sous forme de surfaces d'isovaleur (Fig. 1b).

Toutes les simulations radiatives ont été réalisées pour une parcelle rectangulaire incluant un "hexagone centré", c'est à dire un ensemble de 6 triangles élémentaires adjacents. Outre les 7 arbres de l'hexagone centré, 4 arbres extérieurs dont une partie de la ramure surplombe la parcelle ont été inclus dans la scène (Fig. 2).

(1) On appelle triangle élémentaire l'espace délimité par trois arbres voisins

was then developed by the CIRAD/GERDAT Plant Modeling Unit, and numerous tropical and temperate plants have already been modeled. Three palmaceae have been studied: *Elaeis guineensis* (Lecoustre, 1993), *Phoenix dactylifera* (Dauzat and Peyron, 1991) and *Cocos nucifera* (Girard, 1992).

By architectural modeling, three-dimensional computer mock-ups of plants can be generated. These mock-ups contain all the geometric and topological information of interest. For example, for the *Elaeis* mock-ups generated (Lecoustre, 1993), we know not only the spatial position, dimensions and orientation of each leaflet, but also its rank within the frond and the rank of the frond itself. In order to make full use of this information, we developed three numerical radiative models:

- a "Shadow" model, primarily intended for calculating incident radiation interception and mapping radiation transmitted to the soil;
- a "Transrad" model that simulates the radiative climate within the canopy and can be used for photosynthesis calculations;
- a ray-tracing model capable of accurately describing radiative transfers, particularly the directional reflectance of a canopy.

Various radiative simulations on an oil palm canopy will demonstrate the merits and specificity of each of these models.

MATERIAL AND METHODS

The study comprised four steps:

- detailed architectural measurements on 6-year-old hybrid oil palms at La Mé, Ivory Coast;
- measurements of transmitted radiation under these trees,
- stochastic modeling of the architecture of the trees studied, followed by the creation of computer mock-ups;
- radiative transfer simulation on these mock-ups.

As the architectural measurements and tree modeling are described elsewhere (Lecoustre, 1993), only aspects 2 and 4 are covered in this paper.

The photosynthetically active radiation (PAR) transmitted to the soil was measured in two adjacent elementary triangles⁽¹⁾ (Fig. 1a). These measurements were made using a linear quantum sensor (LICOR LI-191SB), moved every 15 seconds or so to obtain a spatial sample of transmitted radiation at 16 measurement points per triangle. At the same time, global and diffuse incident radiation was measured using two pinpoint quantum sensors (LICOR LI-190SB) positioned above the oil palm stand. All the signals were recorded on a data logger (DELTA-T 21X). Eight series of measurements were carried out on different days and at different times. The results were then represented in the form of isovalue maps (Fig. 1b).

All the radiative simulations were carried out for a rectangular plot including a "centred hexagon", i.e. a set of six adjacent elementary triangles. Besides the seven trees in the centred hexagon, four external trees with some branches overhanging the plot were included in the scene (Fig. 2).

(1) An elementary triangle is the space delimited by three neighbouring trees

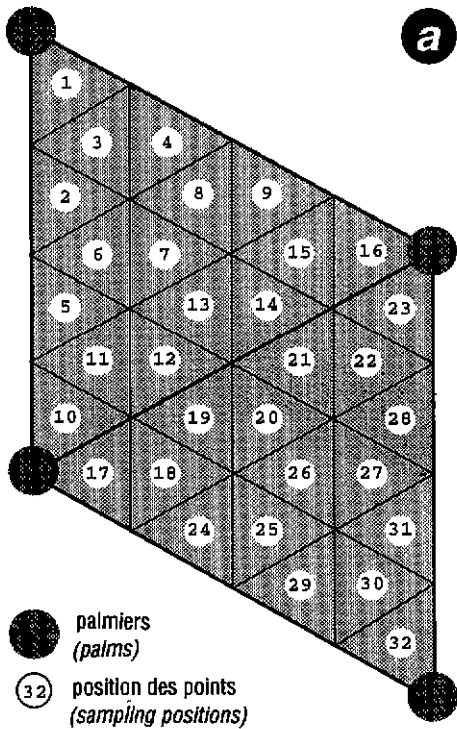


FIG. 1a. — Positions des points de mesure du PAR transmis au sol — (Sampling positions for the measurement of the PAR transmitted to the soil)

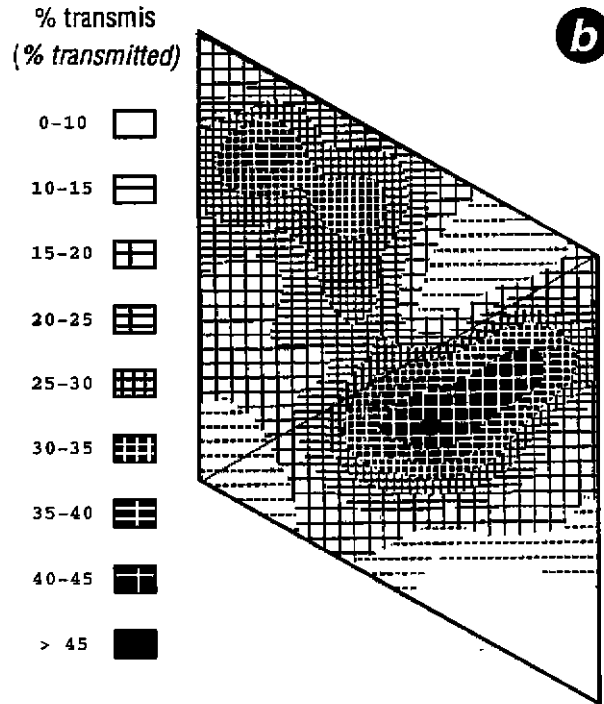


FIG. 1b. — Cartographie du PAR mesuré le 2/03/89 à 11h dans une parcelle *Elaeis* hybrides L2TxD10D à La Mé, Côte-d'Ivoire — (Map of the PAR measured on 2/03/89 at 11 00 in an L2TxD10D *Elaeis* hybrid plot at La Mé, Ivory Coast)

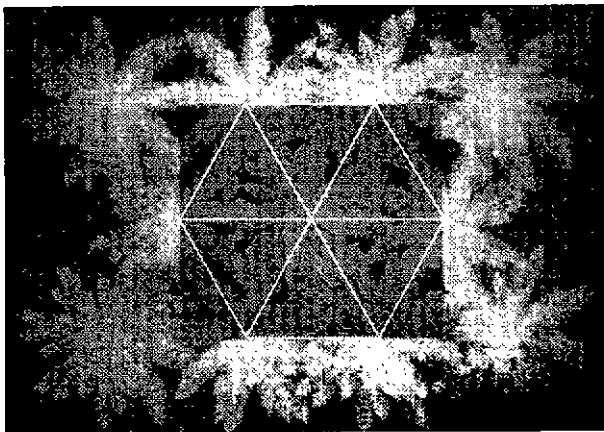


FIG. 2. — Image pixel de la scène informatique créée obtenue avec le programme "Shadow". Le rectangle intérieur correspond à la parcelle utile définie pour les simulations — (Pixel image of the computer scene obtained with the "Shadow" programme. The internal rectangle corresponds to the usable plot defined for simulations)

Un programme Biom.c a été développé pour calculer les surfaces et inclinaisons foliaires des maquettes (Fig. 3). L'indice foliaire obtenu est faible (3.2) du fait de l'élagage récent des palmes basses.

Simulation de l'interception du rayonnement incident par le modèle "Shadow"

L'image des ombres portées au sol par les arbres est simulée en calculant la projection des maquettes suivant la direction des rayons du soleil. Pour ces calculs, on suppose que la scène étudiée est environnée de scènes identiques. Dans ces conditions, les ombres portées par la scène utile sur les scènes environnantes sont identiques à celles que portent les scènes environnantes sur la scène utile. Il suffit donc de reporter à l'intérieur de la scène utile les ombres que celle-ci porte à l'extérieur pour simuler un couvert de dimension infinie.

A chaque point de l'image générée (pixel) est affecté un indice d'éclaircissement. Il est ainsi possible de calculer des images pour différentes heures de la journée puis de les combiner pixel par pixel pour obtenir une cartographie de la

A program, Biom.c, was developed to calculate the leaf areas and inclinations in the mock-ups (Fig. 3). The leaf area index obtained was low (3.2), due to recent pruning of lower fronds.

Simulation of incident radiation interception by the "Shadow" model

The image of the shadows cast on the soil by trees is simulated by calculating mock-up projection along the direction of the sun's rays. For these calculations, it is assumed that the scene studied is surrounded by identical scenes. Under these conditions, the shadows cast by the usable scene on the surrounding scenes are identical to those cast by the surrounding scenes on the usable scene. It is therefore sufficient to include within the usable scene the shadows that it casts outside to simulate an infinite canopy.

Each point in the image generated (pixel) is given a lighting index. This makes it possible to calculate images for different times of day and to combine them pixel by pixel to

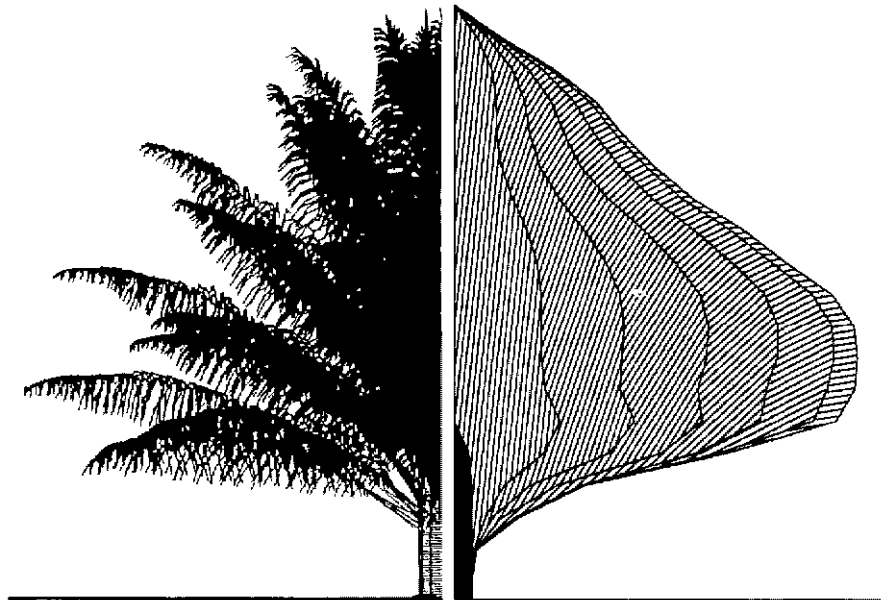


FIG. 3. — Gauche : moitié de palmier simulé Droite : profil vertical des surfaces foliaires à l'intérieur de la scène utile. L'inclinaison des hachures correspond aux six classes d'inclinaison des surfaces foliaires utilisées
 [0-15°], [15-30°]
 [30-45°], [45-60°]
 [60-75°] et [75-90°].

(Left : half of a simulated palm, right : vertical profile of the leaf areas within the usable scene. Six classes of foliage element inclination are defined. The hatching inclination indicates the main inclination of the corresponding class)
 [0-15°], [15-30°]
 [30-45°], [45-60°]
 [60-75°] and [75-90°]

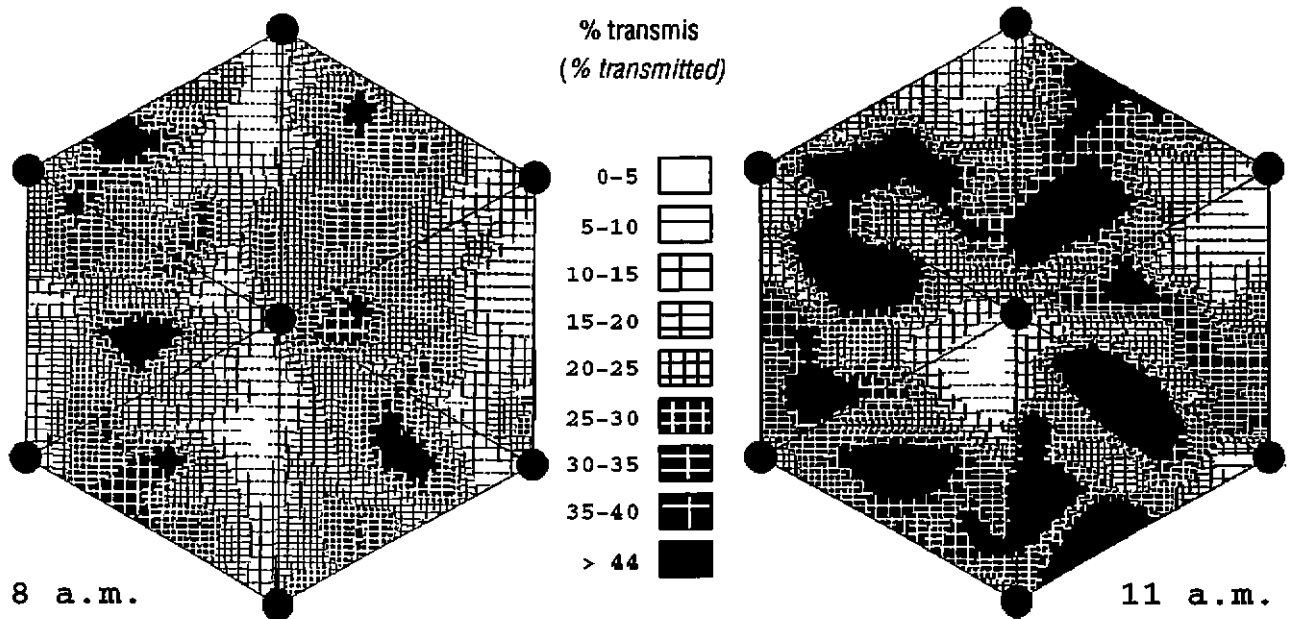


FIG. 4. — Simulations par le modèle Shadow de la répartition du rayonnement direct transmis au sol. — (Simulation by the Shadow model of distribution of direct radiation transmitted to the soil)

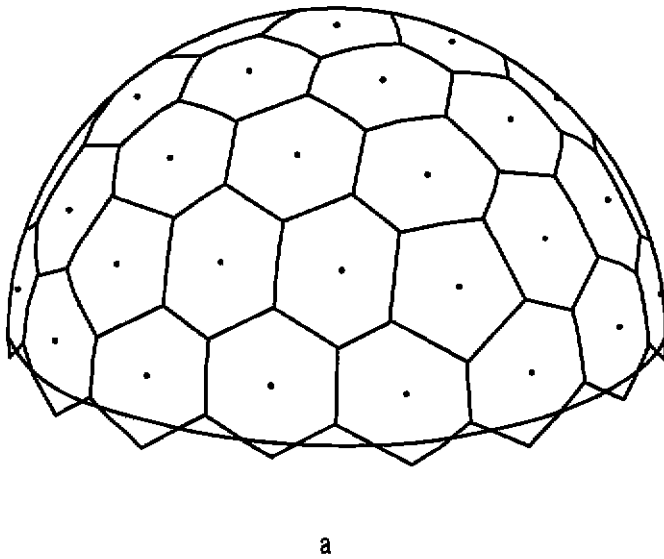


FIG. 5 a. — Partition de l'hémisphère céleste en 46 secteurs de même angle solide pour la simulation du rayonnement diffus (d'après J.A. den Dulk, 1989) — (Splitting the sky into 46 sectors of the same angle for diffuse radiation simulation, according to J.A. den Dulk 1989)

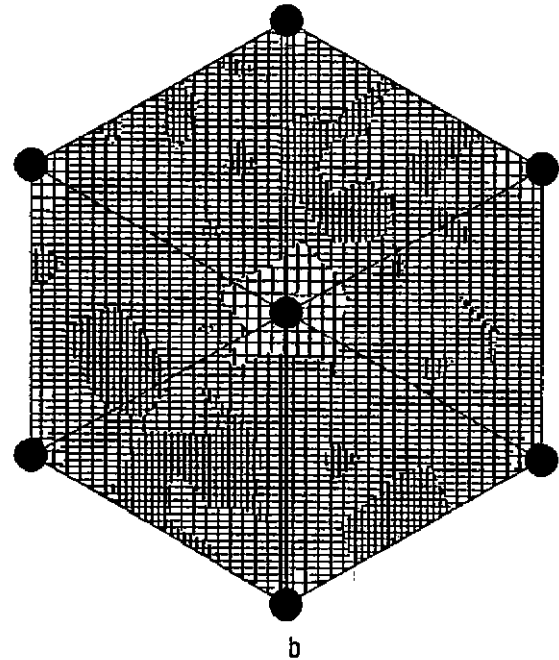


FIG. 5 b. — Simulation de la répartition du rayonnement diffus transmis au sol après intégration des 46 directions définies — (Simulation of the distribution of the diffuse radiation transmitted to the soil after integration of the 46 directions defined. Same pattern legend as above)

transmission du rayonnement direct à l'échelle de la journée. De façon analogue, on peut calculer la transmission du rayonnement diffus en calculant la transmission du rayonnement incident pour différentes directions de la voûte céleste puis en combinant les images obtenues.

La transmission du rayonnement direct sous palmeraie a été simulée par le modèle Shadow pour différentes positions du soleil. Les résultats obtenus (Fig. 4) montrent l'hétérogénéité du rayonnement transmis au sol. On constate en particulier qu'il ne se répartit pas de façon identique à l'intérieur de triangles équivalents (c'est à dire de même orientation). De faibles différences de la géométrie des arbres générés suffisent donc à induire une variabilité non négligeable sur la répartition du rayonnement transmis.

Pour simuler la transmission au sol du rayonnement diffus on a partitionné l'hémisphère céleste en 46 secteurs de même angle solide (Fig. 5a) puis calculé les projections de la scène suivant les directions correspondantes. La cartographie du rayonnement diffus transmis a ensuite été obtenue en combinant les 46 images générées (Fig. 5b).

La transmission du rayonnement global a enfin été simulée en combinant les images obtenues pour le rayonnement direct et pour le rayonnement diffus. La confrontation des résultats obtenus pour différentes conditions radiatives avec les mesures permet de constater la bonne qualité des estimations (Fig. 6a). Ces calculs, répétés pour différentes heures de la journée, ont permis d'obtenir une cartographie journalière de l'éclairement au sol (Fig. 6b).

Du fait qu'il donne non seulement l'intensité mais aussi la répartition du rayonnement incident transmis sous couvert, le modèle Shadow présente un intérêt particulier pour évaluer les possibilités d'implantation de cultures en systèmes agroforestiers. Mais il peut être également utilisé pour établir

le bilan photosynthétique d'une plantation en tenant compte de l'âge des feuilles. Il est par exemple possible de calculer l'interception du PAR pour chaque palme d'un arbre. Les résultats (Fig. 7) montrent que les plus palmes basses (en l'occurrence jusqu'au rang 34) interceptent une fraction relativement importante du rayonnement incident. De tels résultats peuvent être très utiles pour raisonner l'élagage de palmes

obtain a map of direct radiation transmission for the day as a whole. Similarly, diffuse radiation transmission can be determined by combining the images obtained for different sky directions.

Direct radiation transmission under an oil palm stand was simulated by the Shadow model for different sun positions. The results obtained (Fig. 4) show the heterogeneity in radiation transmitted to the soil. In particular, it is not distributed in the same way in equivalent triangles (i.e. triangles with the same orientation). Slight differences in the geometry of the trees generated are therefore enough to induce considerable variability in the distribution of transmitted radiation.

To simulate diffuse radiation transmission to the soil, the sky was split into 46 sectors of the same solid angle (Fig. 5a) and the projections of the scene were calculated according to the corresponding directions. A map of the diffuse radiation transmitted was then obtained by combining the 46 images generated (Fig. 5b).

Lastly, global radiation transmission was simulated by combining the images obtained for both direct and diffuse radiation. Comparing the results obtained for different radiative conditions with the measurements made confirmed the accuracy of the estimates (Fig. 6a). These calculations, repeated for different times of day, made it possible to produce a daily map of light availability at soil level (Fig. 6b).

As it gives not only the intensity but also the distribution of incident radiation transmitted under the canopy, the Shadow model is of particular value for assessing the possibilities for planting crops as part of agro-forestry systems. However, it can also be used to establish the photosynthetic balance of a stand, taking account of leaf age. For example, it is possible to calculate PAR interception for each frond of a tree. The results (Fig. 7) show that the lower leaves (in this case up to rank 34) intercept a relatively high proportion of the incident radiation. Such results can be most useful in determining when to prune fronds.

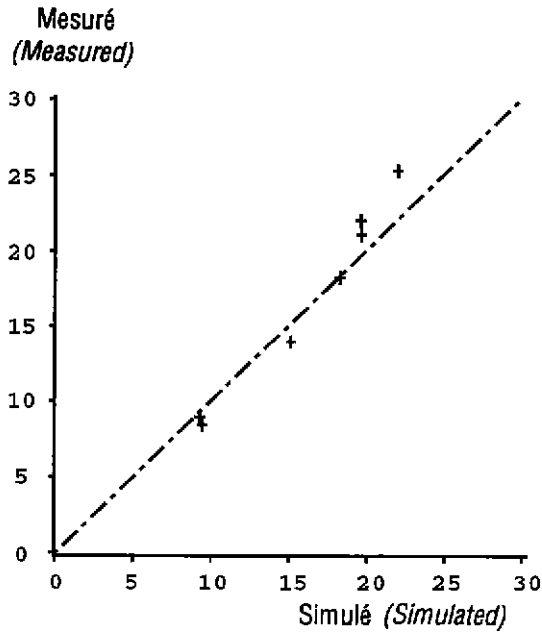


FIG. 6a. — Comparaison des taux de transmission moyens par triangle élémentaire obtenus par mesures *in situ* et par simulations sur maquettes informatiques — (Comparison of mean transmission rates per elementary triangle obtained by *in situ* measurements and by simulation on computer mock-ups)

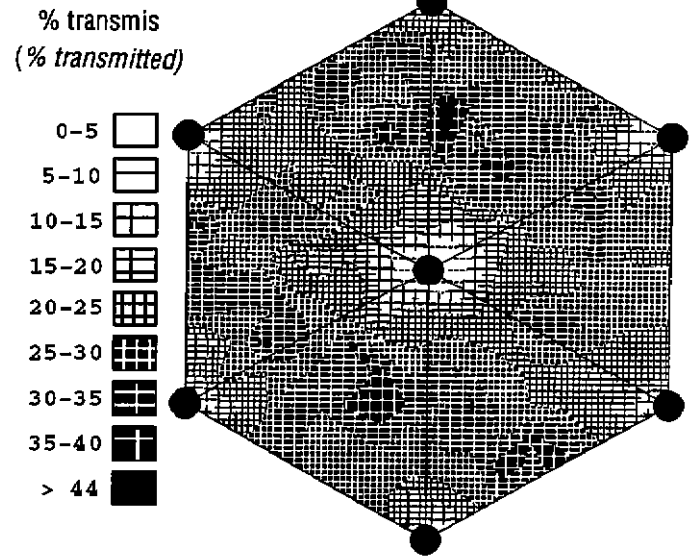


FIG. 6b — Cartographie du rayonnement global transmis au sol à l'échelle de la journée — (Map of global radiation transmitted to the soil on a daily basis)

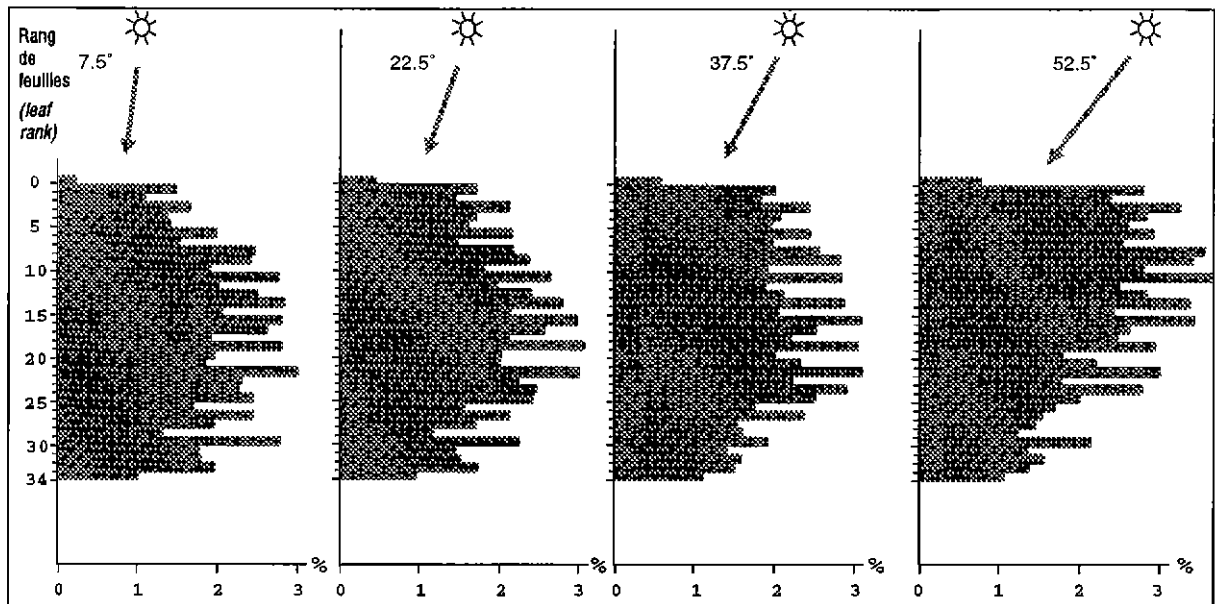


FIG. 7. — Interception du rayonnement direct par rang de palme pour différentes hauteurs du soleil — (Direct radiation interception for different frond ranks and various sun elevations)

Simulation du climat radiatif par le modèle Transrad

La méthode décrite ci-dessus ne prend pas en compte la rediffusion du rayonnement intercepté. Pour simuler complètement les échanges radiatifs au sein du couvert, le modèle probabiliste Transrad est utilisé. Les bases du modèle sont les suivantes (Fig. 8) :

- le couvert est divisé en strates horizontales ;
- les échanges radiatifs à l'interface de chaque strate sont décrits par une matrice de 144 flux directionnels (72 pour les directions ascendantes et autant pour les directions descendantes).

Tous les calculs reposent sur les probabilités d'interception du rayonnement par les différentes strates pour chaque direction définie. Ces probabilités sont calculées en simulant

Radiative climate simulation by the Transrad model

The method described above does not take account of intercepted radiation scattering. For a comprehensive simulation of radiative transfers within the canopy, the Transrad probabilist model is used. The basic principles of the model are as follows (Fig. 8):

- the canopy is divided into horizontal strata;
- radiative transfers at the interface of each stratum are described by a matrix with 144 directional fluxes (72 for upward and 72 for downward directions).

All the calculations are based on the probabilities of radiation being intercepted by the different strata for each given direction. These probabilities are calculated by simulating

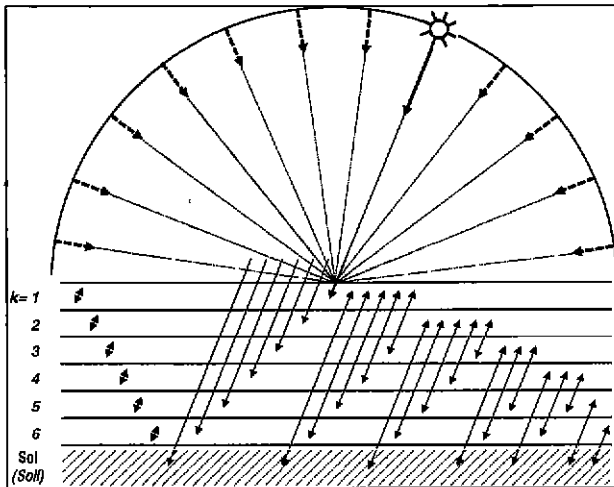


FIG. 8. — Le modèle Transrad calcule les flux radiatifs dans 72 directions ascendantes et 72 directions descendantes. Les probabilités d'interception du rayonnement incident (\downarrow) ou du rayonnement rediffusé au sein du couvert (\uparrow) sont définies pour chaque strate et chaque direction — (The Transrad model calculates radiative fluxes in 72 upward and 72 downward directions. The probabilities of the interception of incident radiation (\downarrow) or of radiation scattered within the canopy (\uparrow) are defined for each stratum and each direction)

des points-quadrats sur la scène informatique (Dauzat, 1990). A l'issue de ces calculs préliminaires, le climat radiatif au sein de la scène peut être simulé rapidement par une procédure itérative pour toutes les conditions radiatives voulues :

- calcul de l'interception du rayonnement au sein du couvert ;
- calcul des flux directionnels rediffusés par chaque strate et par le sol ;
- calcul de la ré-interception de ces flux aux différents niveaux du couvert ;
- poursuite des étapes 2 et 3 pour les ordres supérieurs de rediffusion jusqu'à quasi-extinction des flux radiatifs.

Ce modèle fournit en sortie le rayonnement absorbé par chaque strate et par le sol ainsi que les flux radiatifs ascendants et descendants à l'interface de chaque strate. L'absorption du rayonnement peut également être détaillé par type d'organe.

Le modèle Transrad a été utilisé pour simuler le climat radiatif au sein de la scène d'*Elaeis* générée. Pour ce faire, on a défini 6 strates de 1.5 mètre d'épaisseur. En l'absence de mesures des propriétés optiques des feuilles, on a fixé arbitrairement à 12 % le facteur de réflexion des feuilles et à 8 % leur facteur de transmission. Les résultats obtenus pour les conditions radiatives du 2 mars à 10h30 sont représentés sur la figure 9a. A titre comparatif nous avons également simulé le climat radiatif pour un couvert présentant la même stratification verticale d'indice foliaire, mais en négligeant l'agencement horizontal des éléments de surface foliaire (Fig. 9b). Les résultats sont nettement différents, ce qui montre l'importance d'une bonne prise en compte de la structure du couvert et l'intérêt que présentent les maquettes informatiques à cet égard.

Le modèle Transrad présente l'avantage par rapport au modèle Shadow de simuler les rediffusions multiples au sein du couvert. En revanche il n'indique pas la répartition du rayonnement transmis au sol. On utilisera donc le modèle Transrad lorsqu'un bilan radiatif précis est nécessaire (en particulier dans le domaine du proche-infrarouge pour lequel les rediffusions multiples sont importantes) et le modèle Shadow pour cartographier le rayonnement incident transmis au sol. Le cas échéant, les deux modèles peuvent être utilisés conjointement. On peut considérer en effet que le rayonnement diffusé par la végétation éclaire le sol de façon sensiblement isotrope. Il suffit donc dans ces conditions de rajouter en tout point d'une image générée par Shadow

lating point quadrats on the computer scene (Dauzat, 1990). Following these initial calculations, the radiative climate within the scene can be simulated rapidly by an iterative process for all the required radiative conditions:

- calculation of radiation interception within the canopy;
- calculation of the directional fluxes scattered by each stratum and by the soil;
- calculation of the re-interception of these fluxes at the different levels of the canopy;
- continuation of stages 2 and 3 for higher orders of scattering, up to the near-extinction of radiative fluxes.

This model determines the radiation absorbed by each stratum and by the soil, in addition to the upward and downward radiative fluxes at the interface of each stratum. Radiative absorption can also be broken down per type of organ.

The Transrad model was used to simulate the radiative climate within the *Elaeis* scene generated. To this end, six 1.5-m thick strata were defined. In the absence of measurements of the optical properties of the leaves, the leaf reflection factor was fixed arbitrarily at 12% and their transmission factor at 8%. The results obtained for the measured radiative conditions on march 2 at 10:30 a.m. are given in figure 9a. As a comparison, we also simulated the radiative climate for a canopy with the same vertical leaf area index stratification, but taking no notice of the horizontal clumping of leaf area elements (Fig. 9b). The results were markedly different, which shows the importance of taking account of canopy structure and the merits of computer mock-ups in this respect.

The Transrad model has an advantage over the Shadow model in that it simulates multiple scatterings within the canopy. However, it does not show the distribution of the radiation transmitted to the soil. The Transrad model should therefore be used when a precise radiative balance is required (particularly in the infra-red spectrum, in which there is considerable scattering) and the Shadow model for mapping the incident radiation transmitted to the soil. If necessary, the two models can be used jointly. In effect, the radiation diffused by the vegetation can be considered to light the soil in a markedly isotropic fashion. Under these conditions, it

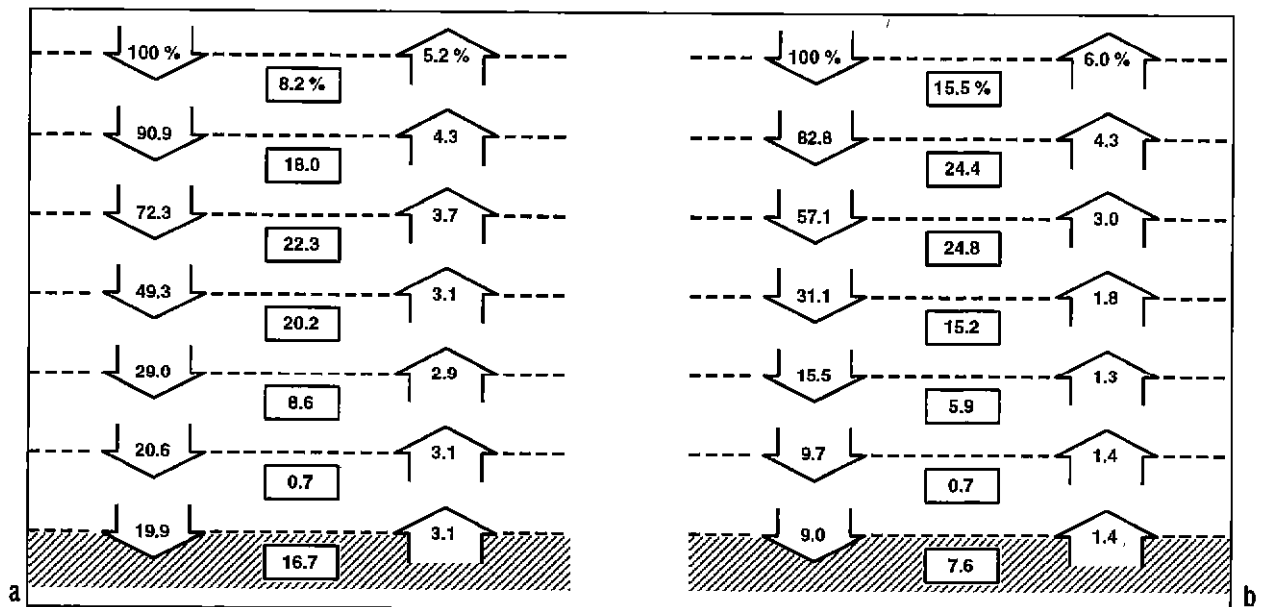


FIG. 9 a. — Bilan radiatif simulé sur scène informatique par le modèle Transrad. — (Radiative balance simulated on a computer scene by the Transrad model)

FIG. 9 b. — Bilan radiatif simulé pour la même stratification verticale de l'indice foliaire mais en négligeant l'agrégation horizontale des feuilles. — (Radiative balance simulated for the same vertical leaf area index stratification, but not taking account of horizontal leaf clumping)

l'éclairage résultant des rediffusions multiples calculé par Transrad.

Simulation de la réflectance directionnelle par le modèle de lancer de rayons

Le modèle de lancer de rayons est simple dans son principe :

- un générateur de photons "lance" un photon sur la scène, soit depuis la direction du soleil pour simuler le rayonnement direct, soit depuis une autre direction de voûte céleste pour simuler le rayonnement diffus ;
- on recherche alors si un organe végétal se trouve sur la trajectoire du photon, auquel cas on calcule son point d'interception ;
- lorsque le point d'interception du photon a été trouvé, on calcule son devenir, c'est à dire s'il est absorbé ou rediffusé. S'il est rediffusé, un sous-modèle calcule sa nouvelle direction en fonction des propriétés directionnelles de l'organe intercepteur.
- les étapes 2 et 3 sont poursuivies jusqu'à ce que le photon soit absorbé ou émerge du couvert. On retourne alors à l'étape 1.

A l'issue de ces calculs il suffit de comptabiliser les photons absorbés pour connaître l'absorption du rayonnement en tout point du couvert et les photons émergeant de la scène pour obtenir sa réflectance directionnelle.

Il est nécessaire de lancer un très grand nombre de photons pour obtenir des simulations précises des échanges radiatifs (de l'ordre de 1 à 2 millions de photons). Cette méthode est donc très consommatrice de temps de calculs. En revanche cette approche mécaniste est très rigoureuse et permet de détailler finement les échanges radiatifs. En pratique, on l'utilisera principalement pour simuler la réflectance directionnelle des couverts végétaux, les autres termes du climat radiatif pouvant être très correctement simulés par les modèles précédents.

La réflectance directionnelle de la scène d'*Elaeis* a été simulée pour une hauteur de soleil de 65° et une proportion diffus/global de 45.6 %. Le diagramme polaire de réflectance obtenu (Fig. 10a) montre en particulier la capacité de la méthode du lancer de rayons à simuler le phénomène de

is therefore sufficient to add the light resulting from multiple scatterings, calculated by Transrad, at any point in the image generated by Shadow.

Simulation of directional reflectance by the ray-tracing model

The basic principle of the ray-tracing model is simple

- a photon generator "traces" a photon in the scene, either from the direction of the sun to simulate direct radiation or from another direction in the sky to simulate diffuse radiation;
- if there is a plant organ somewhere along the trajectory of the photon, the point of interception is calculated;
- once the photon's point of interception has been determined, its future is determined, i.e. whether it is absorbed or scattered. If it is scattered, a sub-model calculates its new direction according to the directional properties of the intercepting organ.
- stages 2 and 3 are continued until the photon is absorbed or emerges from the canopy. Stage 1 is then resumed.

Following these calculations, it is sufficient to count the photons absorbed in order to determine radiative absorption at any point in the canopy and the photons emerging from the scene to determine its directional reflectance.

A very large number of photons has to be traced to obtain accurate radiative transfer simulations (around 1 to 2 million photons). The calculations involved in this method are therefore quite time consuming. However, this mechanistic approach is extremely thorough and provides a highly detailed picture of radiative transfers. In practice, it is mainly used to simulate the directional reflectance of plant canopies, as the other features of the radiative climate can be very effectively simulated by the previous models.

The directional reflectance of the *Elaeis* scene was simulated for a sun elevation of 65° and a diffuse:global ratio of 45.6%. The polar diagram of reflectance obtained

point-chaud. Les résultats obtenus avec le modèle SAIL (Verhoef, 1984) très communément utilisé pour simuler la réflectance sont très différents (Fig.10b) : on remarque en particulier que le modèle SAIL d'une part ne simule pas le point-chaud et d'autre part sous-estime fortement la réflectance pour les forts angles zénithaux. Ceci illustre le fait que l'hypothèse implicite de ce modèle d'une répartition spatiale aléatoire des éléments de surface foliaire au sein du couvert n'est pas valide pour la scène étudiée.

CONCLUSIONS

La modélisation architecturale permet de générer des maquettes informatiques d'arbres beaucoup plus réalistes que les formes géométriques simples classiquement utilisées pour représenter des arbres. Ces maquettes peuvent par ailleurs être facilement reparamétrées. Pour décrire une nouvelle plantation d'Elaeis, par exemple, on peut se contenter de mesurer la hauteur des stipes, compter les nombres de palmes et de folioles par palme et mesurer la longueur de quelques folioles. Enfin et surtout, connaissant les lois de développement architectural, il est possible de simuler une plantation à tout âge voulu.

Une simulation précise des transferts radiatifs sur maquettes informatiques implique le développement de modèles radiatifs numériques spécifiques. Trois modèles complémentaires ont été développés dans ce but : le modèle Shadow pour simuler les ombres portées, le modèle Transrad pour simuler les rediffusions multiples et le modèle de lancer de rayons pour simuler la réflectance directionnelle.

Le couplage de la modélisation architecturale des arbres et de la modélisation numérique des transferts radiatifs offre divers avantages :

- connaissance de tous les paramètres caractéristiques de la scène (par exemple surfaces foliaires par rang de palme, stratification verticale de l'indice foliaire...);
- possibilité de calculer une plantation à tous ses stades de développement ;
- possibilité de modifier la scène informatique à volonté pour simuler différents modes d'agencement des arbres ou différentes densités.

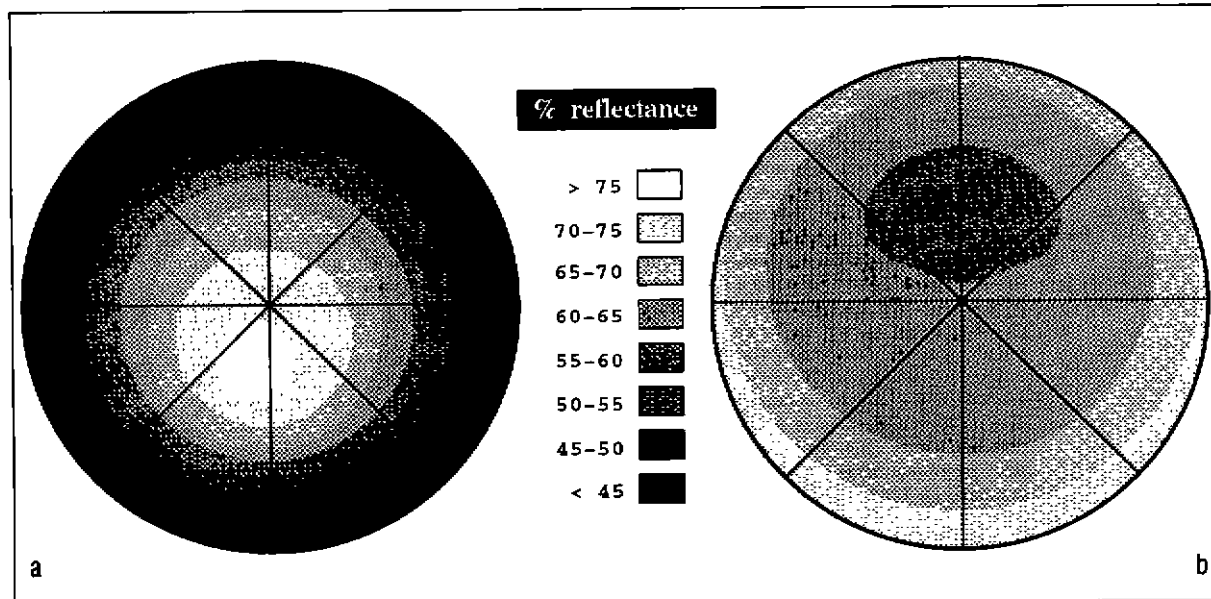


FIG. 10 a. — Diagramme polaire de réflectance simulé sur maquettes informatiques par la méthode du lancer de rayons— (Polar reflectance diagram simulated on computer mock-ups by the ray-tracing method)

FIG. 10 b. — Réflectance simulée par le modèle SAIL.— (Reflectance simulated by the SAIL model)

(Fig. 10a) shows the ability of the ray-tracing method to simulate the hot-spot phenomenon. The results obtained with the sail model (Verhoef, 1984) very commonly used to simulate reflectance are markedly different (Fig 10b). in particular, the SAIL model does not simulate the hot-spot and also considerably overestimates the reflectance for high zenithal angles. This illustrates the fact that the implicit hypothesis of this model - random spatial distribution of leaf area elements within the canopy - is not valid for the scene studied.

CONCLUSIONS

Architectural modeling makes it possible to generate computer mock-ups of trees that are much more realistic than the simple geometric shapes conventionally used to represent trees. The parameters of these mock-ups can also be adjusted easily. To describe a new Elaeis stand, for example, it is sufficient to measure stem height, count the number of fronds and leaflets per frond and measure the length of a few leaflets. Last but not least, once the laws of architectural development are known, a stand can be simulated at any given age.

Accurate simulation of radiative transfers on computer mock-ups means developing specific numerical radiative models. To this end, three complementary models have been developed: the Shadow model to simulate the shadows cast, the Transrad model to simulate multiple scatterings and the ray-tracing model to simulate directional reflectance.

Combining architectural modeling of trees and numerical modeling of radiative transfers offers many advantages:

- knowledge of all the parameters characteristic of the scene (e.g. leaf area index for each leaf rank, vertical distribution of leaf area index, etc.);
- possibility of calculating a stand at each stage of its development;
- possibility of modifying the computer scene at will to simulate different planting designs or densities,

- simulation fine de tous les termes du bilan radiatif d'une plantation (cartographie du rayonnement transmis au sol, interception du PAR par rang de palme, réflectance directionnelle) ;

Les principales applications concernant le palmier à huile sont :

- l'évaluation des possibilités d'installation de cultures associées sous palmeraies ;
- le calcul du bilan photosynthétique des arbres ;
- la gestion de la culture (élagage des palmes) ;
- l'analyse de la réflectance de plantations pour mieux interpréter les données acquises par télédétection.

- *detailed simulation of all the factors in the radiative balance of a stand (mapping radiation transmitted to the soil, PAR interception per leaf rank, directional reflectance);*

The main applications for oil palm are:

- *assessing the possibilities of setting up intercrops under oil palm stands;*
- *calculating tree photosynthetic balances;*
- *crop management (frond pruning);*
- *analysis of stand reflectance for a better interpretation of the data acquired by remote sensing.*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHARLES-EDWARDS, D.A. and THORPE, M.R. (1976) — Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. *Ann Bot* **40**, 603-613.
- [2] DAUZAT, J. (1990) — Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques d'*Elaeis guineensis*. *Internal CIRAD report*.
- [3] DAUZAT J. et PEYRON G. (1991). — L'Architecture du palmier datier in Architecture oasienne et flux radiatifs. *Internal CIRAD Report* n°3.
- [4] DULK, J.A. den (1989) — The interpretation of remote sensing, a feasibility study Thesis, Wageningen, p 173
- [5] GIRARD, M.L. (1992). — Climat radiatif sous cocoteraie et architecture des arbres *D E A Report*.
- [6] LECOUSTRE, R., JAEGER, M., QUENCEZ, P., FLORI, A. et REFFYE, P. de (1993) — Oil palm tree (*Elaeis guineensis* Jacq.) : architecture and geometry Modelling *PIPOC* 93.
- [7] LI, X and STRAHLER, A.H. (1985). — Geometrical-optical modeling of a conifer Forest Canopy. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens*, GE-23, 705-721.
- [8] REFFYE, P. de. (1981). — Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier robusta. *Café Cocoa Thé*, **25**, 2 : 83-103.
- [9] VERHOEFF, W., (1984). — Light scattering by leaf layer with application to canopy reflectance modeling : The SATL model. *Remote Sens Environ.*, **16** 125-141.

RESUMEN

Simulación de los cambios radiativos en maquetas informáticas de *Elaeis guineensis*

J. DAUZAT, *Oléagineux*, 1994, **49**, N°3, p. 81-90

Se utilizan maquetas informáticas de plantas para estudiar los cambios radiativos dentro de un palmeral. Se midieron los datos morfológicos necesarios para la construcción de maquetas de todas las plantas de una plantación en Côte-d'Ivoire (Lecoustre *et al.*, 1993). A partir de estos datos, el software AMAP del CIRAD ha permitido reconstituir una escena de 11 palmeras. Luego se establecieron diferentes modelos numéricos para simular la interceptación y la redifusión de la luz en la misma escena constituida. Se realizaron medidas radiativas *in situ* en el palmeral estudiado para controlar la calidad de las simulaciones : radiación incidente (directa y difusa) y radiación transmitida al suelo. La distribución de la radiación transmitida al nivel del suelo fue simulada merced al modelo "Shadow" Aunque este modelo no tome de manera explícita en cuenta la redifusión de la radiación interceptada, las tasas de transmisión simuladas se asemejan mucho a las tasas medidas. Este modelo está pues especialmente útil para estimar las posibilidades de los cultivos asociados. El modelo "Transrad" simula las redifusiones múltiples de la luz en la misma canopea y permite lograr un balance radiativo detallado. Las simulaciones realizadas señalan que las palmas más bajas (hasta el rango 34) interceptan una fracción relativamente importante de la Radiación Fotosintéticamente Activa. Por fin, un modelo de lanzamiento de rayos ha servido para simular la reflectancia direccional del palmeral. La utilización de maquetas informáticas permite realizar análisis detalladas muy útiles en el campo de teledetección. La ejecución de modelos radiativos numéricos sobre maquetas informáticas tridimensionales permite describir de manera específica y detallada los fenómenos radiativos en el mismo palmeral. Este enfoque abre un amplio campo de aplicaciones : determinación de las densidades óptimas de plantación, práctica de la poda, evaluación de las posibilidades de implantación de cultivos asociados, interpretación de datos de teledetección... El trabajo emprendido debe proseguirse en otros palmerales de diferentes edades y variedades.

Palabras claves. — Palmera de aceite, maquetas informáticas de plantas, cambios radiativos, simulación.