

UTILISATION DES PHOTOGRAPHIES HÉMISPHÉRIQUES POUR LE CALCUL DE LA PERMÉABILITÉ DES COUVERTS FORESTIERS AU RAYONNEMENT SOLAIRE

I. — ANALYSE THÉORIQUE DE L'INTERCEPTION

M. DUCREY

avec la collaboration technique de P. GROSS

*Station de Sylviculture et de Production,
Centre national de Recherches forestières, I. N. R. A.,
Champenoux, 54280 Seichamps*

RÉSUMÉ

La mesure directe du rayonnement solaire pendant de longues périodes pose de nombreux problèmes techniques particulièrement en forêt. C'est pourquoi quand les conditions expérimentales n'exigent pas ces mesures directes, il est préférable d'utiliser des méthodes indirectes pour estimer le rayonnement solaire. L'auteur propose pour cela une méthode qui utilise les photographies hémisphériques.

Le principe de cette méthode est le suivant :

1. Calculer l'éclairement potentiel arrivant au point de mesure en supposant que l'horizon est parfaitement dégagé ; l'auteur utilise pour cela les formules semi-empiriques mises au point par DOGNIAUX (1973) et KROCHMANN (1973) ;
2. Étudier la répartition des trouées dans le feuillage avoisinant le point de mesure, à l'aide des photographies hémisphériques ;
3. Calculer l'éclairement théorique réel en considérant le rayonnement qui parvient par les trouées du feuillage jusqu'au point de mesure ;
4. Effectuer le rapport entre ces deux éclaircissements pour obtenir la perméabilité du feuillage au rayonnement solaire.

Au niveau méthodologique, le déroulement pratique des opérations est le suivant :

1. Prise des photographies hémisphériques en respectant certaines règles précises de mise en station de l'appareil (orientation, horizontalité...) ;
2. Contretypage des négatifs de manière à obtenir des « diapositifs » à contraste noir-blanc maximum ;
3. Lecture des « diapositifs » grâce à un lecteur automatique à photo-transistors pour calculer la fréquence des trouées, en distinguant les couverts homogènes (la fréquence des trouées est fonction seulement de la hauteur angulaire) et les couverts hétérogènes (la fréquence des trouées est alors fonction de la hauteur angulaire et de l'azimut) ;
4. Exploitation des données sur un programme de calcul auquel on doit fournir les caractéristiques du point de mesure ;

- latitude,
- longitude,
- coefficient de trouble atmosphérique,
- pente de la surface de mesure,
- azimut de cette surface,

pour calculer :

- la perméabilité au rayonnement solaire direct,
- la perméabilité au rayonnement diffusé par le ciel serein,
- la perméabilité au rayonnement global,
- la perméabilité au rayonnement diffusé par le ciel couvert.

De manière routinière, les calculs sont effectués pour le solstice d'été et l'équinoxe d'automne à partir des photographies prises en été, et pour le solstice d'hiver et l'équinoxe de printemps grâce à des photographies prises en hiver.

A titre indicatif, l'auteur a calculé les différentes courbes d'éclairement annuel à Nancy pour les différents types de rayonnement et pour différentes valeurs du trouble atmosphérique.

INTRODUCTION

L'objet de ce travail est d'étudier plus complètement la notion de perméabilité ⁽¹⁾ des couverts forestiers au rayonnement d'origine solaire, notion que nous avons déjà définie à plusieurs reprises (DUCREY, 1970, 1971, 1973). La perméabilité est en quelque sorte un éclairement relatif théorique qui est calculé en fonction de l'évolution de l'éclairement au cours de la journée et de la présence des trouées dans le feuillage.

Nous n'avons, jusqu'à maintenant, abordé le problème que partiellement en n'envisageant que le cas du rayonnement diffusé par ciel couvert.

Nous reprenons dans cet article la question dans son ensemble en calculant l'éclairement théorique qui arrive au-dessus de la forêt pour chaque type de rayonnement (solaire direct, diffusé par ciel serein et par ciel couvert, global) à chaque instant de la journée. Ceci nous amènera à définir une perméabilité instantanée et une perméabilité journalière moyenne, de la même manière que pour l'éclairement relatif.

Nous insisterons aussi sur la technique de mesure de la fréquence des trouées et de la surface relative des taches de soleil à l'aide des photographies hémisphériques.

I. — CALCUL THÉORIQUE DES APPORTS ÉNERGÉTIQUES ET LUMINEUX SUR DES SURFACES QUELCONQUES

Nous avons besoin, pour préciser la perméabilité du couvert forestier à la lumière, de calculer numériquement l'éclairement d'une surface quelconque par une méthode aussi générale que possible ⁽²⁾.

Nous avons été aidé, pour mettre au point tous ces calculs, par une publication de DOGNIAUX (1973 *a*), qui a étudié le cas de l'éclairement énergétique. Il donne une méthode qui permet de calculer l'éclairement d'une surface plane, de pente et d'azi-

⁽¹⁾ Nous utiliserons indifféremment dans le texte, les termes « perméabilité » et « perméabilité relative », ce dernier étant celui adopté dans les publications précédentes.

⁽²⁾ Le détail des calculs numériques a fait l'objet d'une publication antérieure « Perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. Application aux photographies hémisphériques ». Publication interne. Station de Sylviculture, N° 74/02, M. DUCREY, 1974. Les lecteurs intéressés pourront se la procurer sur demande.

mut déterminés, en fonction de l'heure et du jour de l'année. Nous nous référerons donc très souvent à cet article.

Mais nous voulions en plus, calculer l'éclairement lumineux. Pour cela, nous avons été obligé de remettre au point les calculs correspondants, qui sont conçus sur le même principe que ceux de DOGNIAUX, mais qui font appel, en plus, à des relations empiriques permettant de caractériser le climat lumineux. Une publication de KROCHMANN (1973) nous a fourni pour cela des renseignements très intéressants, notamment en ce qui concerne la variation de la luminance zénithale.

Dans les paragraphes qui suivent, les éclairements instantanés au temps t du jour J seront indicés (t, J) tandis que les éclairements journaliers seront indicés (J).

A. — Éclairement solaire direct

L'éclairement solaire direct en un point donné est lié à la position du soleil. Celle-ci est parfaitement définie par la hauteur angulaire h au-dessus de l'horizon et par l'azimut A_0 du soleil :

$$\sin h = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos AH \quad (1)$$

$$\cos A_0 = \frac{\cos \delta \cos AH - \sin h \cos \Phi}{\cos h \sin \Phi} \quad (2)$$

La déclinaison δ peut être ramenée à une fonction de J .

L'angle horaire AH dépend de l'heure t et de la longitude L .

Pour un lieu donné (c'est-à-dire pour une latitude Φ et une Longitude L données), la position du soleil est parfaitement définie par les seules variables t et J .

1. Éclairement énergétique solaire direct (EESD).

L'éclairement d'une surface de pente p et d'azimut A_p , est calculé (DOGNIAUX, 1973 a, b) à l'aide de la relation suivante :

$$EESD(t, J) = E_0(J) \exp(-am'T) \cos j_s \quad (3)$$

dans laquelle :

— $E_0(J)$ est la valeur de la constante solaire corrigée, pour le jour J , en fonction de la variation de la distance Terre-Soleil.

— $\exp(-am'T)$ caractérise l'extinction exponentielle du rayonnement solaire direct à travers l'atmosphère, en fonction du facteur d'extinction total de l'air pur et sec a , de la masse d'air atmosphérique m , et du coefficient total de trouble de Linke T .

$\exp(-am)$ dépend uniquement de la masse d'air pur et sec traversée, donc de la hauteur du soleil h .

Le coefficient de trouble total de Linke T est lié à l'épaisseur d'eau condensable de l'atmosphère ainsi qu'à la quantité d'aérosols ; il dépend donc des conditions locales (DOGNIAUX, 1970). Il présente aussi des variations journalières et saisonnières et peut être exprimé analytiquement de la manière suivante :

$$T = T_0 + T_1 h + T_2 \cos \omega J \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi}{366} \quad (4)$$

T_0 , T_1 et T_2 sont des constantes adaptées aux conditions locales.

Cependant, dans la plupart des cas, on peut se satisfaire des valeurs moyennes de T contenues dans le tableau 1.

— j_s est l'angle entre le soleil, de hauteur h et d'azimut A_0 , et la normale à la surface de référence, de pente p et d'azimut A_p (fig. 1).

$$\cos j_s = \cos p \sin h + \sin p \cos h \cos (A_0 - A_p) \quad (5)$$

Pour obtenir l'éclairement journalier, il suffira d'intégrer l'équation (3) sur l'ensemble de la journée :

$$\text{EESD} (J) = \sum_{t=0}^{24 \text{ h}} E_0 (J) \exp (-am'T) \cos j_s \quad (6)$$

en y adjoignant la condition $\cos j_s = 0$ pour j_s supérieur à 90° qui exprime le fait qu'un rayon lumineux frappant l'arrière de la surface de référence n'est pas pris en compte dans le calcul.

2. Éclairement lumineux solaire direct (ELSD).

En ce qui concerne l'éclairement lumineux, nous avons utilisé la relation semi-empirique adoptée par la Commission Internationale de l'Éclairage (C.I.E.) et qui correspond approximativement à un facteur de trouble $T = 2,75$. Cette relation fournissant l'éclairement sur une surface horizontale, nous l'avons transformée pour l'adapter au cas général d'une surface quelconque :

$$\text{ELSD} (t, J) [\text{lux}] = 130\,000 \exp (-0,2/\sin h) \cos j_s \quad (7)$$

Il existe en fait de nombreuses autres relations empiriques établies à partir de conditions expérimentales différentes. La courbe de la C.I.E. correspond à des conditions moyennes de trouble atmosphérique qui sont cependant un peu faibles pour le climat lorrain comme nous le verrons par la suite.

Nous avons aussi :

$$\text{ELSD} (J) = \sum_{t=0}^{24 \text{ h}} 130\,000 \exp (-0,2/\sin h) \cos j_s \quad (8)$$

avec $\cos j_s = 0$ pour j_s supérieur à 90° .

B. — Éclairement diffusé par ciel serein

L'éclairement diffusé par le ciel serein est calculé en considérant que chaque point du ciel est une source lumineuse ou énergétique, définie par sa luminance (puissance émise par unité de surface de la source et par unité d'angle solide), qui vient « éclairer » la surface de référence.

La luminance d'un point P du ciel, de coordonnées A et θ peut s'exprimer en fonction de la luminance au zénith $L_0(h)$ et de la luminance relative du ciel $L_r(h, \theta, \gamma, A)$ grâce à l'égalité :

$$L(A, \theta) = L_0(h) L_r(h, \theta, \gamma, A) \quad (9)$$

La luminance relative est une fonction de la distance angulaire γ entre le soleil et le point P (fig. 1), des coordonnées du point P, et de la hauteur angulaire du soleil h .

TABLEAU I

Variations du facteur moyen de trouble atmosphérique T ,
en fonction des conditions locales (DOGNIAUX, 1973)

TABLE I

Variation of the mean value of Linke's turbidity factor according to the local conditions
(DOGNIAUX, 1973)

Taux de pollution atmosphérique (coefficient de trouble β)		Contenu atmosphérique moyen en vapeur d'eau (cm d'eau condensable)							
		0,5	1	2	3	4	5	6	7
		Air sec Régions polaires ou désertiques		Climats tempérés			Air humide Régions tropicales ou maritimes		
Site rural	0,05	2,5	2,8	3,3	3,6	3,8	4,0	4,1	4,2
Site urbain	0,10	3,5	3,8	4,2	4,6	4,8	5,0	5,1	5,2
Site industriel	0,20	5,0	5,2	5,8	6,1	6,4	6,5	6,6	6,7

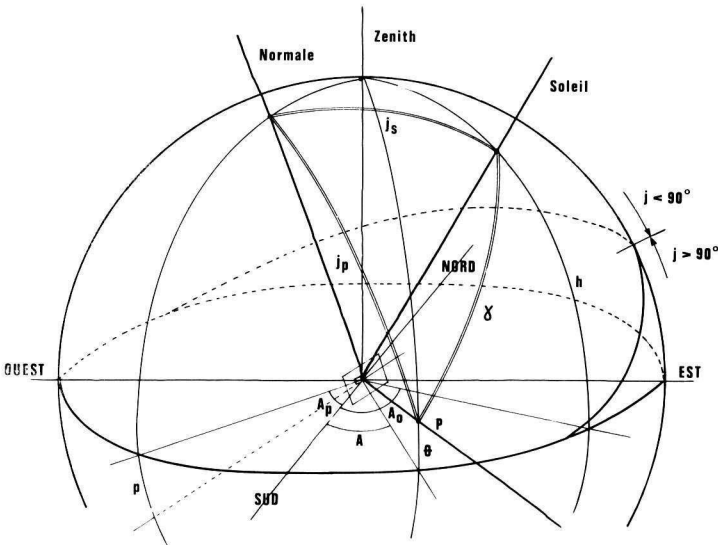


FIG. 1. — Coordonnées sphériques de l'hémisphère céleste

FIG. 1. — Spherical coordinates of the heaven

Cette luminance relative, dont la définition et le calcul ont été standardisés par la C.I.E. (1973), tient compte de l'extinction et de la diffusion du rayonnement solaire dans l'atmosphère. Pour des conditions de trouble atmosphérique T inférieures à 5, elle a pour valeur :

$$L_r(h, \theta, \gamma, A) = \frac{(0,91 + 10 \exp(-3\gamma) + 0,45 \cos^2 \gamma) (1 - \exp(-0,32/\sin \theta))}{0,273 \cdot 85 (0,91 + 10 \exp(-3(\pi/2 - h)) + 0,45 \sin^2 h)} \quad (10)$$

1. Éclairement énergétique diffusé par un ciel serein (EEDCS).

A l'instant t , l'éclairement diffusé par ciel serein est calculé de manière classique par l'expression :

$$\text{EEDCS}(t, J) = \sum_{\theta=0}^{90^\circ} \sum_{\Lambda=0}^{360^\circ} L(A, \theta) \cos \theta \cos j_p \quad (11)$$

dans laquelle :

— $L(A, \theta)$ prend la valeur de la relation (9) avec :

$$L_0(h) [\text{wm}^{-2} \text{st}^{-1}] = 556,77 - 973,98 \cos h + 509,82 \cos 2h - 92,83 \cos 3h \\ + 129,36 \sin h + 48,79 \sin 2h - 54,67 \sin 3h \quad (12)$$

Cette expression, calculée par DOGNIAUX (1973 *a*), correspond à des conditions de trouble atmosphérique T inférieures à 5.

— j_p est l'angle entre le point P de la voûte céleste (coordonnées A, θ) et la normale à la surface de référence (fig. 1). Il est défini par :

$$\cos j_p = \cos p \sin \theta + \sin p \cos \theta \cos (A - A_p) \quad (13)$$

L'éclairement journalier s'écrit :

$$\text{EEDCS}(J) = \sum_{t=0}^{24 \text{ h}} \sum_{\theta=0}^{90^\circ} \sum_{\Lambda=0}^{360^\circ} L(A, \theta) \cos \theta \cos j_p \quad (14)$$

Les relations (11) et (14) sont assorties de la condition :

$$\cos j_p = 0 \quad \text{si } j_p \text{ est supérieur à } 90^\circ.$$

2. Éclairement lumineux diffusé par un ciel serein (ELDCS).

Le calcul de l'éclairement lumineux se fait de la même manière que pour l'éclairement énergétique. Nous avons utilisé 3 relations empiriques donnant la luminance zénithale $L_0(h)$ en nous réservant la possibilité de choisir par la suite celle qui convient le plus aux conditions locales de nos expériences.

KROCHMANN (1973) donne la relation suivante pour $T = 2,75$:

$$L_0(h) [\text{cdm}^{-2}] = 100 + 63 h + h (h - 30) \exp(0,0346 (h - 68)) \quad (15)$$

KITTLER (1972) a calculé une relation expérimentale valable pour $h < 70^\circ$ et $2,25 < T < 3,25$:

$$L_0(h) [\text{cdm}^{-2}] = 300 + 3000 \operatorname{tg} h \quad (16)$$

DOGNIAUX (1970) prend en compte directement le trouble atmosphérique T et, pour $h < 70^\circ$ donne l'expression suivante :

$$L_0(h) [\text{cdm}^{-2}] = (1234 T - 252) \operatorname{tg} h + 112 T - 16,9 \quad (17)$$

Nous avons ainsi calculé :

ELDCS₁ (*t*, *J*) et ELDCS₁ (*J*) à partir de la relation (15),
 ELDCS₂ (*t*, *J*) et ELDCS₂ (*J*) à partir de la relation (16),
 ELDCS₃ (*t*, *J*) et ELDCS₃ (*J*) à partir de la relation (17).

Ces relations ainsi que celles du paragraphe précédent permettent de calculer l'éclairement global par ciel serein.

C. — Éclairement diffusé par le ciel couvert

L'éclairement diffusé par le ciel couvert se calcule de la même manière que l'éclairement diffusé par le ciel serein. Mais comme la luminance ne dépend, dans ce cas, que de θ , on peut écrire, si on se réfère à une surface horizontale, une expression simplifiée :

$$\text{ELDCC} (t, J) = 2\pi \sum_{\theta=0}^{90^\circ} L(\theta) \cos \theta \sin \theta \quad (18)$$

La luminance $L(\theta)$ peut être calculée, d'après la formule préconisée par la C.I.E. pour un ciel couvert standard, en fonction de la luminance zénithale : $L_0(h)$:

$$L(\theta) = L_0(h) (1 + 2 \sin \theta) / 3 \quad (19)$$

Nous avons utilisé deux relations expérimentales de KITTLER (1972) et KROCHMANN (1973) pour caractériser la luminance au zénith.

Elles ont respectivement pour expression :

$$L_0(h) [\text{cdm}^{-2}] = 3\,990 (1 + 1,5 \sin h) \sin h \quad (20)$$

et

$$L_0(h) [\text{cdm}^{-2}] = 123 + 8\,600 \sin h \quad (21)$$

A partir de ces données, nous avons calculé :

ELDCC₁ (*t*, *J*) et ELDCC₁ (*J*) en employant les relations (18), (19) et (20),
 ELDCC₂ (*t*, *J*) et ELDCC₂ (*J*) en employant les relations (18), (19) et (21).

Nous n'avons pas tenu compte, dans le cas du rayonnement diffus, de la fraction du rayonnement diffus qui arrive sur la surface de référence après avoir été réfléchi par le complexe sol-végétation avoisinant le point de mesure. Cette fraction peut être non négligeable, notamment quand l'angle solide dans lequel on ne voit pas le ciel au-dessus du plan de référence, est grand. C'est pourquoi nous envisageons d'en tenir compte à l'avenir.

D. — Conclusion

Nous avons indiqué tout au long de ce chapitre comment calculer les 12 éclairagements suivants :

- l'éclairement énergétique solaire direct,
- l'éclairement énergétique diffusé par un ciel serein,
- l'éclairement énergétique global,
- l'éclairement lumineux solaire direct,

- l'éclairement lumineux diffusé par un ciel clair (pour 3 lois de luminance),
- l'éclairement lumineux global (pour 3 lois de variation de luminance),
- l'éclairement lumineux diffusé par ciel couvert (pour 2 lois de luminance).

L'éclairement d'une surface plane, de pente et d'azimut déterminés, peut ainsi être calculé pour chaque instant t , du jour J de l'année moyenne, en fonction des seules données suivantes :

- la latitude Φ ,
- la longitude L ,
- le trouble atmosphérique T_0 , T_1 et T_2 ,
- la pente de la surface de référence p ,
- l'azimut de cette surface A_p .

Tous ces calculs font l'objet d'un programme d'ordinateur que nous avons mis au point et qui, moyennant l'introduction des 7 données que nous venons d'énumérer, permet de calculer n'importe quelle courbe d'éclairement standard.

Ce programme « Éclairement », réalisé en fortran, a été conçu pour être exploité sur un ordinateur Philips P 880.

II. — CALCUL THÉORIQUE DES APPORTS ÉNERGÉTIQUES ET LUMINEUX SOUS LE COUVERT FORESTIER

L'idée directrice de nos calculs est de pondérer la luminance dans une direction donnée, par la probabilité qu'il y a de « voir » le ciel à travers le couvert forestier, dans cette même direction.

De cette manière, nous prenons en compte, dans le calcul de l'éclairement théorique sous le couvert, uniquement la fraction du rayonnement qui passe dans les trouées du feuillage. En ce qui concerne le rayonnement diffus, c'est une manière un peu simplifiée de voir les choses. En effet, le rayonnement diffus parvenant au sol est composé du rayonnement diffusé par le ciel et traversant le feuillage (c'est celui que nous prenons en compte) et du rayonnement solaire direct intercepté puis diffusé par le feuillage. Cette seconde composante du rayonnement diffus peut être calculée de manière théorique, moyennant certaines hypothèses sur la structure du couvert, quand on connaît la surface relative des taches de soleil à chaque niveau dans le feuillage (CHARTIER, 1966 ; BONHOMME, 1974).

Ces hypothèses n'étant pas forcément vérifiées pour les couverts forestiers, nous avons jugé préférable dans un premier temps de ne pas tenir compte de cette deuxième composante du rayonnement diffus. Le fait qu'il y ait aussi une certaine imprécision dans le calcul du rayonnement solaire direct transmis au sol sous forme de taches de soleil en raison de la petitesse des trouées par rapport au diamètre apparent du soleil, justifie aussi cette décision.

A. — Fréquence des trouées dans le feuillage

I. Définition de la fréquence des trouées.

La fréquence des trouées q , représente la probabilité de « voir » le ciel à travers un feuillage donné. Deux cas peuvent se présenter dans la réalité :

— Si le feuillage est homogène, c'est-à-dire si les trouées sont situées au hasard, celles-ci n'ont pas de répartition privilégiée en fonction de leur azimut. On peut alors définir, pour une hauteur angulaire donnée θ , une fréquence moyenne des trouées : $q(\theta)$ (fig. 2). Ceci peut être réalisé pour l'ensemble d'un couvert forestier pour lequel on vérifie que les trouées mesurées sur de nombreuses photographies sont en moyenne réparties indépendamment de l'azimut. On définira alors la perméabilité moyenne de l'ensemble du couvert forestier. Mais ceci peut aussi se produire pour une seule photographie prise en un site déterminé (cas d'un couvert très dense) auquel cas la perméabilité du couvert en ce point précis est parfaitement caractérisée par $q(\theta)$.

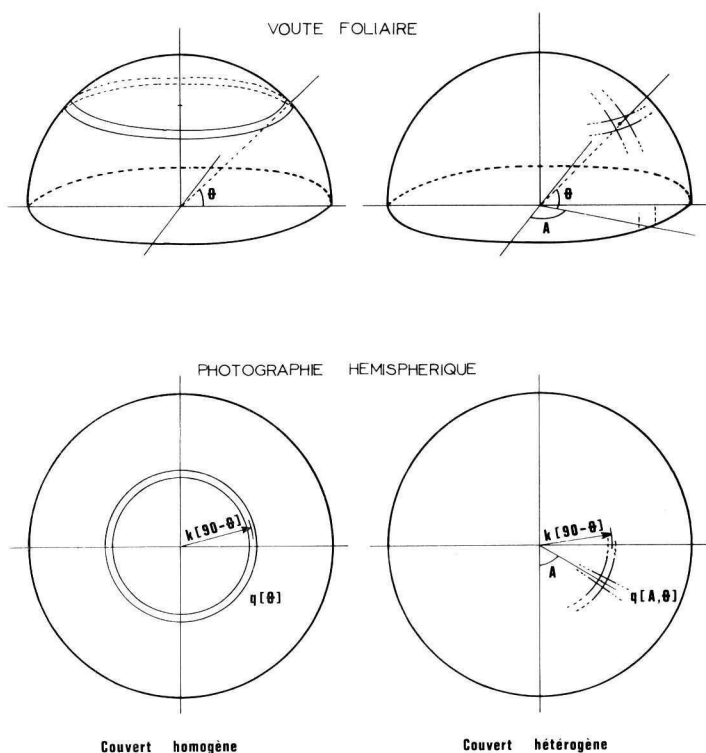


FIG. 2. — *Projection des trouées de la voûte foliaire sur une photographie hémisphérique (système de projection équidistante)*

$q(\theta)$: pourcentage des trouées dans la couronne élémentaire
située à une hauteur angulaire θ
 $q(A, \theta)$: pourcentage des trouées dans le carré élémentaire
situé dans la direction A , θ

FIG. 2. — *Projection of the canopy gaps on an hemispherical photograph (Equidistant projection)*

$q(\theta)$: gap frequency in an elementary crown at the angular height θ
 $q(A, \theta)$: gap frequency in an elementary square (azimuth A , angular height θ)

— Si le feuillage est hétérogène, il n'est plus possible de parler de fréquence moyenne des trouées. On considère alors la fréquence des trouées pour chaque direction de l'hémisphère céleste définie par sa hauteur angulaire θ et son azimut A : $q(A, \theta)$ (fig. 2). Ce cas peut se présenter pour de jeunes plantations en ligne dans lesquelles

l'alignement des arbres donne une répartition privilégiée des trouées. Mais c'est aussi et surtout le cas de la plupart des photographies de feuillage considérées individuellement. En effet, s'il est souvent possible de considérer que les trouées sont réparties au hasard dans un peuplement, il est rarement possible de faire cette hypothèse pour un site particulier de ce peuplement. Il faudra donc mesurer $q(A, \theta)$ chaque fois que l'on voudra calculer l'éclairement théorique ou la perméabilité relative en un point particulier.

A la notion de fréquence des trouées est rattachée celle de surface relative des taches de soleil S_r . S_r représente le pourcentage du sol (ou de n'importe quel niveau horizontal dans la végétation) qui reçoit le rayonnement solaire direct. C'est donc, d'après la définition que nous venons d'en donner précédemment, la fréquence des trouées dans la direction du soleil. Comme h est la hauteur du soleil et A_0 son azimut, nous pouvons écrire :

$$S_r(A_0, h) = q(A = A_0, \theta = h) \quad (22)$$

2. Mesure de la fréquence des trouées.

La fréquence des trouées est mesurée à l'aide des photographies hémisphériques ⁽¹⁾ (DUCREY, 1971). La figure 2 indique la manière dont on passe des trouées du feuillage à leur mesure sur les photographies hémisphériques.

Nous avons au début (DUCREY, 1970) utilisé une méthode manuelle de dépouillement de ces photographies reposant sur un principe analogue à celui de ANDERSON (1964), (appréciation visuelle du pourcentage de trouées dans les petits « carrés » élémentaires d'une grille circulaire disposée sur un agrandissement photographique).

Nous avons ensuite essayé d'utiliser la méthode automatique employée par BONHOMME et CHARTIER (1972) mais nous avons rencontré de grandes difficultés en raison de la différence entre les clichés pris dans des cultures et les clichés de couverts forestiers.

C'est pourquoi nous avons amélioré ce système de dépouillement en utilisant des phototransistors plus petits, en augmentant l'amplification des signaux afin de déterminer les seuils de discrimination noir-blanc avec plus de précision et en augmentant la fréquence du générateur d'impulsions pour obtenir un nombre de points d'échantillonnage plus important.

— Description de l'appareil de dépouillement automatique (fig. 3 et 4).

Pour accentuer les contrastes des clichés, nous effectuons un contretypage des négatifs et nous opérons ensuite à partir des positifs.

Les diapositifs sont projetés sur un écran situé à 4 m du projecteur (l'agrandissement a alors un diamètre de 1,10 m) de telle manière que le centre du diapositif hémisphérique coïncide avec l'axe du moteur qui entraîne le bras mobile se déplaçant juste à l'avant de l'écran. Le bras mobile est équipé de 18 phototransistors (1 tous les 5 degrés de hauteur angulaire) et fait un tour complet en 2 minutes. Un inverseur permet de changer le sens de rotation du bras mobile.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant. L'oscillateur génère des impulsions dont la fréquence peut être réglée de 250 à 1 500 par minute. Ces impulsions

⁽¹⁾ Les photographies hémisphériques sont prises horizontalement sous le couvert forestier avec un objectif fish-eye (7,5 mm f. 5,6) de 180° d'angle de visée. Elles sont circulaires. Les hauteurs angulaires égales sont situées sur des cercles dont le centre est le zénith et dont le rayon est proportionnel à la distance angulaire au zénith.

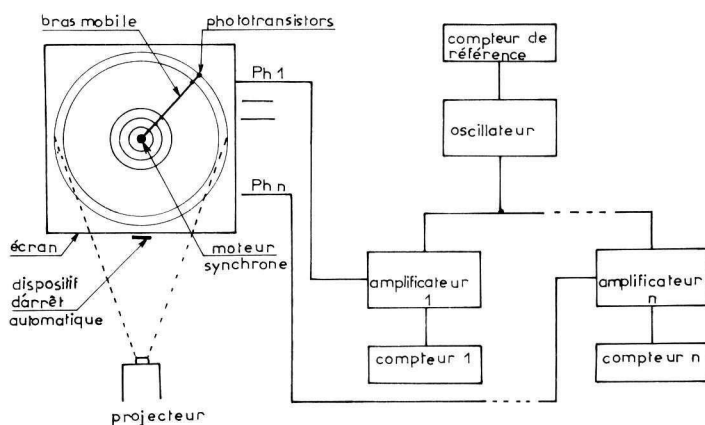


FIG. 3. — Schéma d'ensemble du lecteur de photographies hémisphériques

(18 photo-transistors permettent l'exploitation des photographies pour des hauteurs angulaires de 5° en 5° degrés)

FIG. 3. — Drawing of the hemispherical photograph scanner

(18 photo-transistors allow to explore the photographs with a 5° angular height interval)

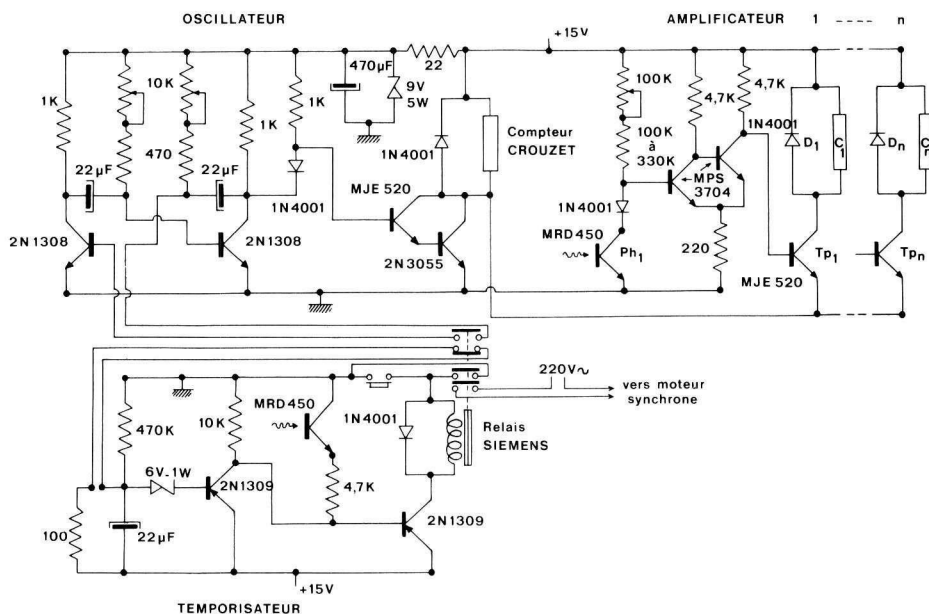


FIG. 4. — Schéma des circuits électroniques du lecteur de photographies hémisphériques

(les résistances sont exprimées en ohms ;
les références non standardisées sont des références Motorola)

FIG. 4. — Drawing of the electronic circuit of the hemispherical photographs scanner

(resistance in ohms ; non-standardized references concern Motorola references)

sont enregistrées sur un compteur de référence (Crouzet). Si les phototransistors ne sont pas éclairés (feuillage) ces impulsions sont transmises aux compteurs associés à chaque phototransistor. Si un phototransistor est éclairé (tache de soleil) la transmission des impulsions est interrompue vers le compteur correspondant. L'arrêt de transmission des impulsions dépend du niveau d'amplification qui peut être réglé grâce à une résistance variable (1 à 100 k Ω). Ceci nous permet d'adapter le seuil de comptage aux caractéristiques des diapositifs.

Si au cours d'une rotation complète, le phototransistor correspondant à la hauteur angulaire θ a donné n impulsions tandis que le compteur de référence indique N (nous avons choisi N voisin de 2 500), la fréquence des trouées pour la hauteur angulaire θ est :

$$q(\theta) = \frac{N - n}{N} \quad (23)$$

L'arrêt automatique du bras mobile est commandé par un système optique (phototransistor éclairé par une ampoule). Quand le bras mobile coupe le rayon lumineux, un relais Siemens arrête le moteur et l'oscillateur. Pour la mise en route de l'appareil un bouton poussoir permet la fermeture du circuit et déclenche le fonctionnement de l'appareil. Si l'ampoule est alors allumée, l'ensemble continue à fonctionner pendant un tour complet. Si la lampe est éteinte, l'ensemble fonctionne pendant quelques secondes grâce au temporisateur puis s'arrête.

Nous utilisons cette caractéristique pour mesurer $q(A, \theta)$. La lampe étant éteinte et la temporisation réglée exactement sur 5 secondes, nous faisons une lecture complète des 19 compteurs après chaque arrêt, c'est-à-dire au total 24 lectures correspondant à des secteurs d'azimut de 15°.

B. — Calcul théorique de l'éclairement sous le couvert forestier

1. Éclairement solaire direct (esd).

Si à l'instant t , la surface relative des taches de soleil est $S_r(A_0, h)$ et si l'éclairement extérieur est $\text{ESD}(t, J)$, l'éclairement sous le couvert forestier s'écrira :

$$\text{esd}(t, J) = S_r(A_0, h) \text{ESD}(t, J) \quad (24)$$

De la même manière, on pourra écrire :

$$\text{esd}(J) = \Sigma_t S_r(A_0, h) \text{ESD}(t, J) \quad (25)$$

2. Éclairement diffusé par le ciel serein (edcs).

A l'instant t , on doit pondérer la luminance du ciel au point (A, θ) par la fréquence des trouées dans la direction correspondante $q(A, \theta)$ pour obtenir l'éclairement instantané :

$$\text{edcs}(t, J) = \Sigma_\theta \Sigma_A q(A, \theta) L(A, \theta) \cos \theta \cos j_p \quad (26)$$

L'éclairement journalier sous couvert s'écrit alors :

$$\text{edcs}(J) = \Sigma_t \Sigma_\theta \Sigma_A q(A, \theta) L(A, \theta) \cos \theta \cos j_p \quad (27)$$

3. *Éclairement diffusé par ciel couvert* (edcc).

Il peut être calculé de la même manière que l'éclairement diffusé par le ciel serein. Mais nous avons vu que dans ce cas la luminance ne dépend que de θ . Il suffira donc de considérer $q(\theta)$ au lieu de $q(A, \theta)$. Si de plus la surface de référence est horizontale on peut écrire simplement :

$$\text{edcc}(t, J) = 2\pi \Sigma_0 q(\theta) L(\theta) \cos \theta \sin \theta \quad (28)$$

et :

$$\text{edcc}(J) = 2\pi \Sigma_t \Sigma_0 q(\theta) L(\theta) \cos \theta \sin \theta \quad (29)$$

III. — PERMÉABILITÉ DU FEUILLAGE AU RAYONNEMENT D'ORIGINE SOLAIRE

La perméabilité du feuillage est le rapport entre l'éclairement traversant le feuillage et l'éclairement extérieur. On la calcule de la même manière qu'un éclairement relatif. Pour les calculs faits à l'ordinateur, nous avons utilisé les formules complètes afin d'obtenir en même temps que la perméabilité, les valeurs réelles d'éclairement sur et sous le couvert. Mais nous écrirons aussi les formules simplifiées valables dans le cas où seule la perméabilité est calculée.

1. — *Perméabilité au rayonnement solaire direct* (P_s)

A l'instant t , la perméabilité au rayonnement solaire direct est évidemment égale à $S_r(A_0, h)$ ou à $S_r(h)$ si le couvert est homogène.

$$P_s(t, J) = S_r(A_0, h) \quad (30)$$

La perméabilité journalière s'écrit :

$$P_s(J) = \frac{\Sigma_t S_r(A_0, h) \text{ESD}(t, J)}{\Sigma_t \text{ESD}(t, J)} \quad (31)$$

2. — *Perméabilité au rayonnement diffus* (P_d)

A l'instant t , elle prend pour valeur :

$$P_d(t, J) = \frac{\Sigma_0 \Sigma_A q(A, \theta) L_r(A, \theta) \cos \theta \cos j_p}{\Sigma_0 \Sigma_A L_r(A, \theta) \cos \theta \cos j_p} \quad (32)$$

Pour obtenir la perméabilité journalière on fait le rapport entre les éclaircissements journaliers au-dessus et au-dessous du couvert :

$$P_d(J) = \frac{\Sigma_t \Sigma_0 \Sigma_A q(A, \theta) L_r(A, \theta) \cos \theta \cos j_p}{\Sigma_t \Sigma_0 \Sigma_A L_r(A, \theta) \cos \theta \cos j_p} \quad (33)$$

Il est possible dans certains cas, notamment dans le cas du ciel couvert, d'éliminer la luminance zénithale $L_0(h)$ et de simplifier ainsi notablement les calculs.

3. — *Perméabilité au rayonnement global* (P_g)

On la calcule de la manière suivante :

$$P_g(t, J) = \frac{eg(t, J)}{EG(t, J)} = \frac{esd(t, J) + edcs(t, J)}{ESD(t, J) + EDCS(t, J)} \quad (34)$$

$$P_g(J) = \frac{eg(J)}{EG(J)} = \frac{esd(J) + edcs(J)}{ESD(J) + EDCS(J)} \quad (35)$$

4. — *Conclusion*

Ce chapitre ne donne que le principe des calculs permettant d'aboutir à la perméabilité du feuillage. Nous avons en fait calculé la perméabilité correspondant aux 12 types d'éclairement définis au premier paragraphe.

Le calcul de perméabilité fait l'objet d'un programme « Perméabilité » écrit en fortran pour un ordinateur C.I.I. 10070. Les entrées sont les mêmes que celles du programme « Éclairement ». Une option permet de se placer dans le cas d'un couvert homogène ($q(\theta)$) ou celui d'un couvert hétérogène ($q(A, \theta)$).

Notre programme nous permet théoriquement de calculer la perméabilité pour chaque jour de l'année. Ces calculs seraient très précis si la fréquence des trouées était vraiment mesurée pour chaque point du ciel. Or il n'en est rien puisque nous mesurons la fréquence moyenne des trouées dans des « carrés » de ciel dont les « côtés » ont 5 degrés de hauteur angulaire et 15 degrés d'azimut. Les calculs effectués pour une journée nous donnent en fait une perméabilité moyenne valable pendant une période plus ou moins longue de part et d'autre de la journée considérée. La durée de cette période dépend de la déclinaison du soleil. Dans ces conditions, un calcul effectué pour les solstices donne une perméabilité moyenne valable pour une durée approximative de 2 mois, et un calcul fait pour une journée d'équinoxe donne des résultats valables pendant une quinzaine de jours. Cette constatation nous permet de simplifier les calculs en ne calculant la perméabilité que pour certains jours choisis d'avance.

C'est ainsi que pour caractériser le microclimat lumineux sous un peuplement feuillu, nous avons décidé de calculer la perméabilité pour le solstice d'été ($J = 173$) et l'équinoxe d'automne ($J = 265$) avec des clichés pris en été, et la perméabilité pour le solstice d'hiver ($J = 356$) et l'équinoxe de printemps ($J = 81$) avec des clichés pris pendant la phase défeuillée. Pour les peuplements résineux, nous faisons les calculs pour un équinoxe et les deux solstices avec des photographies faites de préférence quand la chute des aiguilles est minimale (février à avril).

IV. — *RÉSULTATS ET DISCUSSION*1. — *Calculs d'éclairement*

Le programme de calcul « Éclairement » nous a permis de suivre, pour Nancy, l'évolution annuelle des différents types d'éclairement pris en compte (fig. 5 et 6).

Les courbes concernant l'éclairement énergétique et l'éclairement lumineux

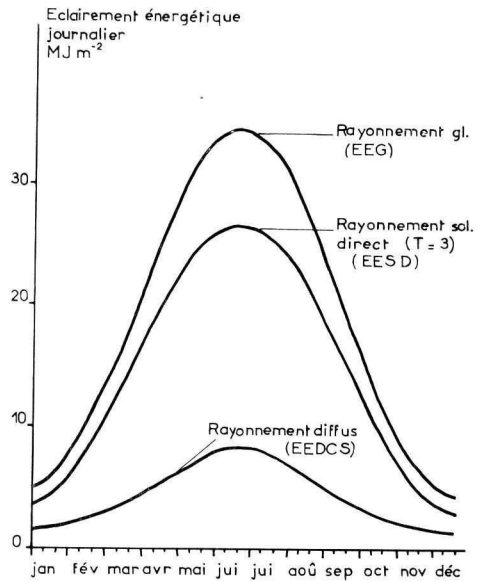
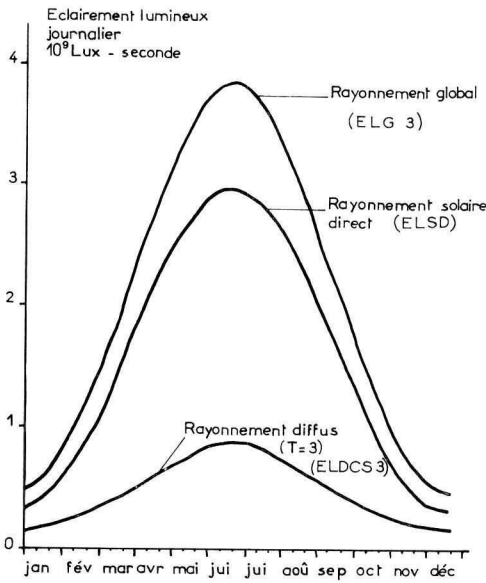


FIG. 5. — Variation annuelle de l'éclairage lumineux et de l'éclairage énergétique d'un plan horizontal (valeurs journalières calculées pour Nancy)

FIG. 5. — Annual variation of illuminance and irradiance on an horizontal area (daily datas calculated for Nancy)

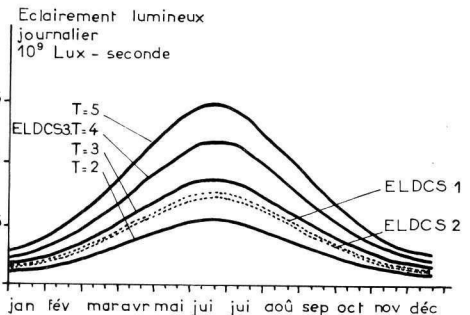
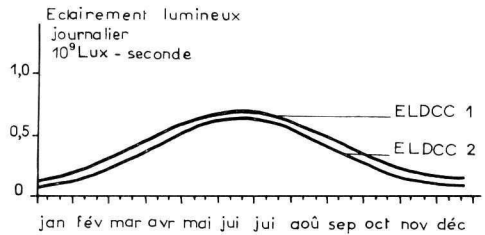
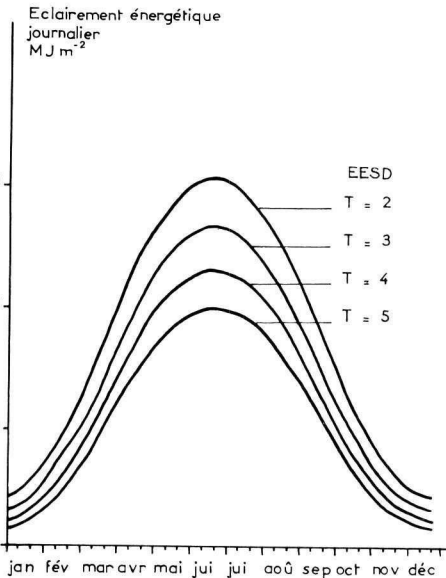


FIG. 6. — Effet du trouble atmosphérique T et de différentes lois de luminance zénithale sur plusieurs types d'éclairage d'un plan horizontal

- éclairage énergétique solaire direct (EESD)
- éclairage lumineux diffusé par ciel serein (ELDCS₁, ELDCS₂ et ELDCS₃)
- éclairage lumineux diffusé par ciel couvert (ELDCC₁ et ELDCC₂)

FIG. 6. — Effect of the variation of Linke's turbidity factor T and of different Zenithal luminance laws on

- direct solar irradiance (EESD)
- clear sky diffuse illuminance (ELDCS₁, ELDCS₂, ELDCS₃)
- overcast sky diffuse illuminance (ELDCC₁, ELDCC₂)

ont des allures identiques. L'éclairement énergétique journalier a été exprimé en mégajoules par mètre carré (MJ m^{-2}) et l'éclairement lumineux journalier en lux-secondes.

La figure 6 montre particulièrement l'effet des différents types de luminance zénithale et des différentes valeurs du trouble atmosphérique sur les éclairagements correspondants. C'est ainsi que l'éclairement solaire direct diminue de 30 MJ m^{-2} à 20 MJ m^{-2} , pour des journées d'été, quand le trouble atmosphérique passe de 2 à 5. Pour Nancy, les mesures d'éclairement global que nous avons effectuées par ailleurs, montrent que le trouble atmosphérique y est, en été, voisin de 4 à 5.

La relation (17) donnée par DOGNIAUX (1970) a pour effet de multiplier par 3 l'éclairement lumineux diffusé par le ciel clair quand le trouble atmosphérique augmente de 2 à 5. Cette augmentation provoque donc l'élévation de la proportion de rayonnement diffus dans le rayonnement global. Comme d'autre part l'extinction du rayonnement dans le couvert est plus forte pour le rayonnement solaire direct que pour le rayonnement diffus, il en résulte que la perméabilité sera plus forte, toutes choses égales par ailleurs, pour un ciel à fort coefficient de trouble que pour un ciel à faible coefficient de trouble atmosphérique. Il pourra être intéressant d'en tenir compte pour la comparaison, d'une région à une autre, de la pénétration du rayonnement solaire dans les couverts forestiers.

En ce qui concerne le rayonnement diffusé par ciel couvert, les relations (20) et (21) de KITTLER (1972) et KROCHMANN (1973) donnent des éclairagements très voisins. Ces deux relations ne se rapportant qu'à un ciel uniformément couvert, il serait intéressant de faire intervenir la nébulosité et de définir différents types de ciel partiellement couvert en fonction du degré de nébulosité. Ceci est d'autant plus important que dans les climats tempérés, c'est le type de temps le plus fréquent.

2. — Perméabilité du feuillage

Nous utilisons actuellement la méthode mise au point dans le présent article pour étudier la répartition du rayonnement solaire sous 7 peuplements de hêtre et 2 peuplements de chêne (étude réalisée dans le cadre d'un contrat DGRST : « Régénération des hêtraies et des chênaies »).

Nous donnerons à titre indicatif quelques résultats obtenus dans un peuplement régulier de hêtre âgé de près de 100 ans (tabl. 2). Les calculs de perméabilité ont été faits en supposant que les trouées sont réparties sans direction privilégiée, hypothèse parfaitement acceptable en raison de la forte densité du feuillage.

Cette forte densité donne évidemment des perméabilités faibles, de l'ordre de 1,5 à 3 p. 100. Mais comme nous ne tenons pas compte, dans le calcul de la perméabilité, du rayonnement intercepté et rediffusé par le feuillage, l'éclairement relatif sous le peuplement est en fait supérieur aux valeurs indiquées. Nous avons dit précédemment que le rayonnement intercepté puis rediffusé pouvait être calculé théoriquement pour un type de feuillage donné. CHARTIER (1966, fig. 10) montre, par exemple, que pour un couvert dont l'inclinaison des feuilles est égale à 60° et le coefficient de transmission à 10 p. 100, le rayonnement intercepté puis retransmis pouvait dépasser 50 p. 100 du rayonnement diffus directement transmis par le couvert, quand l'indice foliaire du peuplement était voisin de 5 et la hauteur du soleil égale à 30° . Il en résulte que, dans notre expérience, l'éclairement relatif doit être voisin de 2,5 à

4,5 p. 100, valeurs qui coïncident parfaitement avec les données recueillies sous un peuplement de hêtre un peu moins dense, pour lequel nous avons mesuré des éclairagements relatifs de 4 à 5 p. 100.

TABLEAU 2

Perméabilité du feuillage au rayonnement solaire pour un peuplement de hêtre de la forêt de Villers-Cotterêts (Aisne).

(moyennes calculées à partir de 12 photographies hémisphériques)

La signification des symboles est expliquée dans le texte

TABLE 2

Solar radiation permeability in a beech stand of the Villers-Cotterêts forest (Aisne)

(mean value for 12 hemispherical photographs).

See text for explanation of the Symbols used

	Perméabilité du feuillage (%)										
	éclairage énergétique			éclairage lumineux							
	EESD	EEDCS	EEG	ELSD	ELDCSI	ELDCS2	ELDCS3	ELG1	ELG2	ELG3	ELDCC
Été (21 juin)	1,437	2,217	1,620	1,432	2,122	2,211	2,212	1,584	1,590	1,607	2,841
Automne (21 septembre)	1,653	2,142	1,757	1,646	2,142	2,140	2,141	1,741	1,744	1,754	2,841

Nous constatons aussi que la pénétration des différentes composantes du rayonnement global est la même dans le cas de l'éclairage lumineux et dans celui de l'éclairage énergétique. Ceci tient au fait que, la perméabilité étant calculée comme un rapport, les différences dues aux diverses lois de variation de la luminance zénithale sont très fortement estompées. Il y aura donc lieu par la suite et dans un souci de simplifier les calculs, de considérer seulement l'un ou l'autre type d'éclairage.

Nos résultats expérimentaux confirment le fait que la perméabilité du feuillage est la plus faible pour le rayonnement solaire direct, dont l'extinction dans le couvert est la plus élevée, tandis qu'elle est la plus forte pour le rayonnement diffusé par ciel couvert qui pénètre mieux à l'intérieur de la végétation. Pour le rayonnement diffusé par ciel clair, la perméabilité a des valeurs intermédiaires entre les 2 précédentes. Ceci est normal car, bien que de nature diffuse, ce rayonnement a une répartition privilégiée dans le ciel, le maximum étant au voisinage du soleil.

Nous n'avons pas constaté (tabl. 2) de variations très sensibles entre les valeurs calculées pour l'été (21 juin) et celles calculées pour l'automne (21 septembre). Ceci est dû au fait que le peuplement est très dense. Pour des peuplements plus clairiérés, les différences seraient plus importantes. En ce qui concerne la perméabilité au rayonnement diffusé par ciel couvert, on obtient exactement les mêmes valeurs en été et en automne. En effet, la perméabilité est alors indépendante de t et de J car dans ce cas particulier les formules 32 et 33 peuvent être simplifiées.

CONCLUSION

Ce travail nous a tout d'abord permis de mettre au point une méthode générale de calcul du rayonnement d'origine solaire. Évidemment, ces calculs ne sont pas rigoureusement précis dans la mesure où ils reflètent des conditions atmosphériques moyennes et se réfèrent à des données standardisées. Ils représentent cependant un moyen pratique et efficace pour connaître l'évolution théorique du climat radiatif en n'importe quel point défini par ses coordonnées (latitude et longitude) et par ses conditions moyennes de trouble atmosphérique. Ils présentent donc un intérêt certain pour tous ceux qui, biologistes ou non, cherchent à estimer avec la meilleure précision possible le climat radiatif d'un site déterminé. Nous voyons par exemple une application pratique et particulièrement intéressante de ces calculs (en dehors bien sûr de leur nécessité pour les calculs de perméabilité) dans la caractérisation du climat radiatif des zones au relief accidenté, notamment en ce qui concerne la durée d'insolation et l'éclairement des terrains de pentes et expositions variées.

Les résultats obtenus au sujet de la perméabilité du feuillage au rayonnement solaire sont très satisfaisants. Dans l'avenir, les calculs de perméabilité seront simplifiés de manière à ne laisser subsister que 4 valeurs correspondant au rayonnement solaire direct, au rayonnement diffusé par ciel serein, au rayonnement global et au rayonnement diffusé par ciel couvert. Mais nous essaierons, dans le même temps, de faire progresser la notion de perméabilité du feuillage au rayonnement solaire en faisant intervenir la nébulosité et en définissant des types de temps partiellement couvert.

À la lumière de ces premiers résultats particulièrement prometteurs, l'ensemble photographies hémisphériques, dispositif de dépouillement automatique et programmes de calculs, nous paraît être un outil efficace et cohérent, susceptible d'apporter une aide précieuse pour la caractérisation des climats et microclimats radiatifs à l'extérieur et à l'intérieur des peuplements forestiers.

Reçu pour publication en février 1975.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement J.-P. MASSON, de la Station de Biométrie du C. N. R. F., qui m'a assisté de ses conseils pour la mise au point des deux programmes de calcul.

SUMMARY

UTILIZATION OF HEMISPHERICAL PHOTOGRAPHS TO CALCULATE SOLAR RADIATION
PERMEABILITY OF FOREST CANOPIES.

I. — THEORETICAL ANALYSIS OF INTERCEPTION

There are technical difficulties to measure directly solar radiation during long periods, particularly in forests. Unless direct measurements are necessary (e. g. for energy balance), we suggest to use hemispherical photographs to make indirect measurements.

Principle of this method

1. Calculation of potential radiation at the measurement point (radiation which would reach this point in an open area) ; we use for this calculation the semi-empirical formulae of DOGNIAUX (1973) and KROCHMANN (1973) ;
2. Distribution and frequency of gaps seen from the measurement point are estimated on hemispherical photographs ;
3. Calculation of the actual radiation reaching this point by taking account of the radiations coming directly through the gaps of the canopy.
4. Calculation of the actual radiation-potential radiation ratio to get the solar radiation permeability of the canopy.

Practical use of this method

1. Take hemispherical photographs ; follow strictly a certain number of indications (orientation, horizontality of the fish-eye camera, etc.) ;
 2. From negative slides, make « positive » black and white slides with maximum contrast.
 3. Scanning of the « positive » slides with an automatic phototransistors scanner to get gap frequency ; we distinguish homogeneous canopies (gap frequency depends only on the angular height) from heterogeneous canopies (in this case gap frequency depends also on the azimuth).
 4. Automatic data processing with a computer ; for each measurement point we indicate :
 - latitude,
 - longitude,
 - Linke's turbidity factor,
 - slope of the soil at the measurement point,
 - azimuth of the soil at the same point,
- to get :
- direct sky radiation permeability,
 - diffuse sky radiation permeability for clear sky,
 - global radiation permeability,
 - diffuse sky radiation permeability for overcast sky.

These calculations are made systematically for summer solstice and autumnal equinox for photographs taken in summer, for winter solstice and vernal equinox for photographs taken in winter.

Annual curves of radiation have been calculated at Nancy for various types of radiation with different values of the LINKE'S turbidity factor.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE VERWENDUNG VON HEMISPHERISCHEN WEITWINKELAUFNAHMEN
ZUR BERECHNUNG DER STRAHLUNGSDURCHLÄSSIGKEIT
DES KRONENDACHES IN WALDBESTÄNDEN.
I. — THEORETISCHE ANALYSE DES ABFANGERS

Die direkte Messung der Sonnenstrahlung über längere Perioden, ist insbesondere in Waldbeständen mit zahlreichen technischen Schwierigkeiten verbunden.

Es erscheint daher vorteilhaft, wenn die experimentalen Voraussetzungen eine direkte Messung der Sonnenstrahlung nicht unbedingt vorschreiben, indirekte Methoden zur Schätzung der Sonnenstrahlung zu verwenden. Der Autor schlägt hierzu die Verwendung von hemisphärischen Weitwinkelaufnahmen vor.

Das Prinzip dieser Methode kann wie folgt zusammengefasst werden :

1. Berechnung der potentiellen theoretischen Globalstrahlung an einem Messpunkt bei völlig klarem Himmel und ohne Horizontüberhöhung nach den halbempirischen Formeln von DOGNIAUX (1973) und KROCHMANN (1973) ;
2. Untersuchung der Verteilung der Lücken im Kronendach des den Messpunkt unmittelbar umgebenden Bestandes an Hand der hemisphärischen Weitwinkelaufnahmen ;

3. Berechnung der tatsächlichen theoretischen Globalstrahlung unter Berücksichtigung der durch die Kronendachlücken am Messpunkt einfallenden Strahlung ;

4. Die Berechnung des Verhältnisses zwischen der potentiellen und der tatsächlichen theoretischen Globalstrahlung ergibt die Durchlässigkeit des Kronendaches bezüglich der Globalstrahlung.

Die praktische Durchführung der Methode kann wie folgt zusammengefasst werden :

1. Photographische Aufnahme der hemisphärischen Weitwinkelbilder (Nikon, Fish-eye) auf den Messpunkten unter Berücksichtigung spezieller Aufstellungsbedingungen des Photoapparates (Orientierung, Horizontalität, etc.).

2. Anfertigung von Kontaktdiapositiven mit maximalem schwarz-weiss Kontrast.

3. Auswertung der « Diapositive » mit einem speziellen automatischen Auswertegerät (Phototransoren) und Berechnung der Lückenhäufigkeit, wobei zwischen homogenem Kronendach (die Lückenhäufigkeit ist nur von der Winkelentfernung vom Zenit abhängig) und heterogenem Kronendach (die Lückenhäufigkeit ist sowohl vom Zenitwinkel als auch vom Azimut abhängig) unterschieden wird.

4. Ein Rechenprogramm mit den für jeden Messpunkt notwendigen Eingangsdaten (geographische Breite und Länge, Trübungskoeffizient, Neigung und Azimut der Messfläche) erlaubt die Berechnung der Durchlässigkeit für :

- direkte Sonnenstrahlung
- diffuse Strahlung bei klarem Himmel
- die Globalstrahlung
- die diffuse Strahlung bei bedecktem Himmel.

Die Berechnungen werden routinemässige bei Sommeraufnahmen für den Sonnenhöchststand im Juni und die Tag- und Nachtgleiche im September und bei Winteraufnahmen für den Sonnentiefstand im Dezember und die Tag- und Nachtgleiche im März berechnet.

Als Beispiel wurde vom Autor für Nancy der Jahresgang für die verschiedenen Strahlungstypen und Trübungskoeffizienten berechnet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON M.-C., 1964. Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions. *J. Ecol.*, **52** (1), 27-41.
- BONHOMME R., CHARTIER P., 1972. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage and gap frequency. *Israel J. agric. Res.*, **22** (2), 53-61.
- BONHOMME R., 1974. *Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ*. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Aix-Marseille.
- C.I.E., 1973. Standardization of luminance distribution on clear skies. *Publication C.I.E.*, n° 22 (TC-4-2) 30 p.
- CHARTIER P., 1966. Étude du microclimat lumineux dans la végétation. *Ann. Agron.*, **17**, 571-602.
- DOGNIAUX R., 1970. Variations qualitatives et quantitatives des composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale par ciel serein en fonction du trouble atmosphérique. *Institut Royal Météorologique de Belgique*. Publication Série B, n° 62, 22 p.
- DOGNIAUX R., 1973 a. Classification des différents types de climats radiatifs et lumineux en fonction des conditions moyennes de trouble atmosphérique. *Congrès UNESCO « Le Soleil au Service de l'homme »* Paris, 2-6 juillet 1973 (E 130).
- DOGNIAUX R., 1973 b. Représentation analytique des composantes du rayonnement lumineux solaire. Conditions de ciel serein. *Institut Royal Météorologique de Belgique*. Note préliminaire n° 17, 26 p.
- DUCREY M., 1970. Utilisation des photographies hémisphériques pour l'évaluation de la densité du couvert forestier et pour le calcul de la perméabilité au rayonnement solaire. *Publication Station Sylviculture C. N. R. F.*, n° 70-4, 14 p.
- DUCREY M., 1971. Contribution des photographies hémisphériques à l'étude du microclimat lumineux en forêt. *Publication Station de Sylviculture. C. N. R. F.*, n° 71-1, 21 p.
- DUCREY M., 1973. Appréciation du rayonnement solaire dans et sous le couvert forestier. *Congrès UNESCO « Le Soleil au Service de l'homme »*, Paris, 2-6 juillet 1973 (V 11).
- KITTLER R., 1972. Standardization of the solar radiation with regard to the prediction of insolation and shading of buildings. *Conference Stockholm*, 1972, vol. 2, n° 45.
- KROCHMANN J., 1973. Quantities of illuminating engineering for daylight. *Congrès de l'UNESCO, « Le Soleil au Service de l'homme »*, Paris 2-6 juillet 1973 (E 52).