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

II. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

M. DUCREY*

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

RÉSUMÉ

L'auteur rappelle tout d'abord brièvement la méthode utilisée pour calculer la perméabilité relative d'un couvert forestier au rayonnement solaire et l'éclairement énergétique sous ce couvert, à partir de photographies hémisphériques prises sous le feuillage.

Il compare ensuite les résultats obtenus à partir des photographies, à des mesures directes de rayonnement solaire faites sous différents peuplements forestiers.

Pour des éclaircissements relatifs supérieurs à 15-20 p. 100, les photographies hémisphériques donnent des résultats très proches des valeurs obtenues avec les pyranomètres.

Dans ces conditions, si on mesure le rayonnement global en plein découvert, on peut estimer avec une bonne précision le rayonnement global sous un peuplement, en utilisant uniquement des photographies hémisphériques.

Pour les éclaircissements relatifs inférieurs à 10 p. 100, les photographies hémisphériques sous-estiment l'éclairement réel. Il faut alors tenir compte du coefficient de transmission du feuillage et de la composition spectrale de la lumière.

I. — INTRODUCTION

La mesure directe du rayonnement solaire pose de nombreux problèmes techniques, notamment en forêt. C'est pourquoi, quand les conditions expérimentales n'exigent pas ces mesures directes, il est préférable d'utiliser des méthodes indirectes, plus faciles à mettre en œuvre. C'est aussi pour cela que l'idée d'utiliser les photographies hémisphériques pour apprécier l'éclairement relatif sous les couverts végétaux est relativement ancienne. Depuis que HILL (1924) a décrit son objectif

de 180° d'angle de visée, nombreux sont les auteurs qui ont été tentés par cette méthode : EVANS et COOMBE (1959), CLARK (1961), ANDERSON (1964), BECKER (1971) parmi d'autres. Sans utiliser ces photographies, ROUSSEL (1953) a essayé de calculer de manière théorique, l'éclairement relatif dans des trouées forestières de forme circulaire. Mais ces différents travaux n'ont rendu compte que de manière très schématique de l'origine et de l'intensité du rayonnement solaire incident ; c'est pourquoi ils n'ont eu que des applications pratiques très limitées.

Compte tenu de l'intérêt de cette technique en recherche forestière si son utilisation pouvait être faite à grande échelle, nous nous sommes très rapidement intéressé aux photographies hémisphériques (DUCREY, 1970). Nous avons essayé de reproduire le plus fidèlement possible le climat radiatif local en prenant en compte les variations instantanées, journalières et saisonnières du rayonnement global (DUCREY, 1974, 1975).

Parallèlement à nos travaux, BONHOMME (1974) a porté un effort similaire dans le cas des cultures agronomiques. Mais comme il s'est intéressé surtout à des mesures d'éclairement relatif sous des couverts homogènes ⁽¹⁾ il n'a pas été obligé d'approfondir les questions concernant la simulation du climat radiatif.

Nous avons, quant à nous, étudié le cas général des couverts hétérogènes que l'on retrouve souvent sous les peuplements forestiers et dans des traitements sylvicoles classiques : éclaircies, coupes de régénération, plantations sous abri, en coupes rases par bandes... Il est en effet très important en sylviculture de connaître l'influence de chaque opération sylvicole sur la répartition de l'énergie dans les houppiers (impact d'une éclaircie sur la productivité primaire) et au niveau du sol (croissance des plantations et régénérations). Nous avons expliqué en détail le principe de notre méthode dans deux publications récentes (DUCREY, 1974, 1975) c'est pourquoi nous n'en dirons que quelques mots au paragraphe suivant.

Dans cet article, nous voulons comparer les éclaircissements relatifs calculés d'après les photographies hémisphériques aux valeurs réelles de rayonnement global mesuré aux mêmes emplacements. Ce genre de comparaison a donné des résultats satisfaisants pour les couverts agronomiques (BONHOMME, 1974) mais il n'y a pas eu de travail identique pour les couverts forestiers, du moins pas avec des méthodes techniquement et théoriquement très élaborées. Nous avons donc entrepris cette comparaison pour savoir si oui ou non la technique pouvait être substituée dans certains cas aux mesures directes de rayonnement global et, si oui, dans quelles conditions précises.

II. — DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Nous avons profité pour faire ce travail, de plusieurs dispositifs expérimentaux d'étude des microclimats forestiers, dans lesquels nous mesurons le rayonnement global. Pour pouvoir effectuer des comparaisons, nous avons pris des photographies hémisphériques à l'emplacement de tous les pyranomètres. Ces dispositifs sont au nombre de trois.

⁽¹⁾ Couvert homogène : couvert dans lequel la répartition des trouées est statistiquement indépendante de l'azimut, par opposition à couvert hétérogène pour lequel cette hypothèse n'est pas vérifiée.

1. — *Profil vertical dans un peuplement de Hêtre*

Le peuplement est une futaie de Hêtre âgée de 80 ans et haute en moyenne de 25 m située en Forêt domaniale d'Amance. Le profil vertical de rayonnement a été effectué grâce à huit niveaux de mesure répartis tout au long d'une tour métallique qui dépasse le peuplement. La référence de plein découvert est donnée par un pyranomètre Kipp et Zonen situé au sommet de la tour.

2. — *Répartition horizontale sous un peuplement de Hêtre*

Le même peuplement a servi à étudier la répartition horizontale du rayonnement solaire. Vingt points de mesure ont été répartis suivant un quadrillage régulier de 10 mètres de côté. Le peuplement, bien que considéré comme homogène comporte quelques « microclairières » dues au passage récent d'une éclaircie.

3. — *Répartition du rayonnement global dans une plantation en coupe rase par bande*
(Forêt domaniale de Pelenq (Var) ⁽¹⁾)

Dans le taillis d'origine des bandes de 5 mètres de largeur ont été coupées à blanc. Elles sont séparées par des bandes ayant aussi 5 mètres de largeur et dans lesquelles on a laissé subsister le taillis. Des mesures d'éclairement ont été faites en divers endroits caractéristiques dans ces bandes et en plein découvert.

Les mesures ont été faites à l'aide de pyranomètres linéaires (type I. N. R. A.) et de pyranomètres Kipp et Zonen ; ces derniers étant utilisés pour les références de plein découvert. Les données sont récoltées grâce à une centrale de mesure Schlumberger (UTD) à la cadence de trois mesures par seconde et de un cycle de mesures toutes les cinq minutes.

A chaque point de mesure, nous avons pris des photographies hémisphériques par temps parfaitement couvert et en orientant les photographies par rapport au Nord.

III. — PRINCIPE DE LA MÉTHODE UTILISÉE

La perméabilité relative d'un feuillage donné est égale au rapport de deux valeurs de rayonnement global calculées mathématiquement à partir de formules semi-empiriques. Le numérateur représente le rayonnement global qui atteint le point de mesure après avoir traversé les trouées du feuillage. Le dénominateur représente le rayonnement global qui atteindrait ce point en l'absence de tout obstacle (voir DUCREY, 1974).

La présence des obstacles est quantifiée par la probabilité de voir le ciel dans une direction donnée ou par le pourcentage de ciel qui est obstrué par le feuillage dans un « carré » élémentaire de ciel. On utilise alors le terme de fréquence des trouées.

1. — *Perméabilité relative au rayonnement solaire direct : P_s*

On la calcule directement, à l'échelle de la journée, par l'équation :

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

dans laquelle :

- $\text{ESD}(t, J)$ est l'éclairement solaire direct calculé à l'instant t du jour J ,
- $S_r(A_0, h)$ est la surface relative des taches de soleil ; c'est en fait la fréquence des trouées dans la direction du soleil déterminée par la hauteur angulaire h et l'azimut A_0 .

Pour un instant t de la journée, le soleil étant alors dans la position A_0, h , la perméabilité au rayonnement solaire direct s'écrit bien simplement : $P_s(t, J) = S_r(A_0, h)$.

⁽¹⁾ La forêt Domaniale de Pelenq se trouve à 35 km au Nord-Ouest de Draguignan, à une altitude voisine de 500 mètres. Située sur sol calcaire, elle est essentiellement constituée par un taillis de chêne pubescent, haut en moyenne de 5 mètres.

2. — *Perméabilité relative au rayonnement diffusé par ciel serein* P_d

Le calcul en est un peu plus compliqué car, à chaque instant de la journée on doit tenir compte de la luminance de tous les points du ciel, chacun d'eux étant alors considéré comme une source de rayonnement diffus.

Pour chaque instant t d'un jour donné J , la perméabilité au rayonnement diffusé par ciel serein s'écrit :

$$P_d(t, J) = \frac{\sum_{\theta} \sum_A q(A, \theta) L(A, \theta) \sin \theta \cos \theta}{\sum_{\theta} \sum_A L(A, \theta) \sin \theta \cos \theta}$$

avec :

- $q(A, \theta)$: fréquence des trouées (mesurée sur photographies hémisphériques) dans la direction caractérisée par l'azimut A et la hauteur angulaire θ ,
- $L(A, \theta)$: luminance du point du ciel de coordonnées A et θ .

Pour avoir la perméabilité moyenne sur un jour complet, il suffit d'intégrer chaque terme du rapport en fonction de t .

3. — *Perméabilité relative au rayonnement global par ciel serein* P_g

Le rayonnement global est la somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffusé par le ciel. La perméabilité P_g est donc définie comme le rapport entre le rayonnement global calculé qui arrive effectivement au point de mesure et le rayonnement global calculé pour un ciel parfaitement dégagé.

4. — *Perméabilité relative au rayonnement diffusé par ciel couvert* P_c

On la calcule exactement de la même manière que dans le cas du ciel serein. Mais la fonction qui définit la luminance est beaucoup plus simple : elle ne dépend pas, en particulier, de l'azimut.

Ces quatre types de perméabilités sont calculés pour chaque photographie hémisphérique à l'aide d'un programme de calcul sur ordinateur. Ce programme exécute les calculs heure par heure pour chaque jour que l'on choisit. Les seules données nécessaires, en dehors des tableaux $q(A, \theta)$ pour chaque photographie, sont :

- les coordonnées géographiques du lieu (latitude et longitude),
- les conditions atmosphériques moyennes (coefficient de trouble atmosphérique),
- et éventuellement, la pente et l'azimut de la surface (cas d'un terrain en pente).

Nous avons ensuite comparé les éclairagements absolus et les perméabilités relatives obtenues grâce aux photographies hémisphériques, avec les valeurs correspondantes mesurées réellement par les pyranomètres.

IV. — RÉSULTATS

Les résultats présentés portent tout d'abord sur la comparaison entre les éclairagements relatifs obtenus par les deux méthodes. Puis nous traiterons ensuite des valeurs absolues d'éclairagement obtenues grâce aux calculs effectués à partir des photographies hémisphériques.

1. — *Comparaison des éclairagements relatifs journaliers*

Pour faciliter les comparaisons nous avons séparé les journées parfaitement claires et les journées complètement couvertes. Dans chaque figure, nous avons représenté en abscisse les éclairagements relatifs et en ordonnée les perméabilités

FIG. 1. — Comparaison des valeurs journalières d'éclairement relatif et de perméabilité relative (P_g) à Pelenq (Var)

a) par ciel clair

à gauche : hypothèse de couvert hétérogène ($R = 0,971$)

à droite : hypothèse de couvert homogène ($R = 0,771$)

b) par ciel couvert.

Compared daily values of irradiance ratio and relative permeability (P_g) at Pelenq (Var)

a) with a clear sky

left : heterogeneous canopy ($R = 0,971$)

right : homogenous canopy ($R = 0,771$)

b) with an overcast sky.

FIG. 2. — *Comparison entre l'éclairement relatif moyen (moyenne de 6 journées d'observation à Pelenq) et différentes perméabilités relatives*
 en haut à gauche : perméabilité relative moyenne $(P_g + P_c)/2$
 en haut à droite : perméabilité relative par ciel couvert P_c
 en bas : perméabilité relative par ciel clair P_g

Comparison between the mean irradiance ratio (the mean of 6 days' observation at Pelenq) and various relative permeabilities

upper left : mean relative permeability $(P_g + P_c)/2$
 upper right : relative permeability with an overcast sky P_c
 bottom : relative permeability with a clear sky P_g

FIG. 3. — Comparaison des valeurs journalières d'éclairement relatif par ciel clair et de perméabilité relative dans un peuplement de hêtre (Forêt d'Amance)

à gauche : perméabilité relative par ciel couvert P_c
à droite : perméabilité relative par ciel clair P_g

Compared daily values of the irradiance ratio with a clear sky and of the relative permeability under a beech stand (Forest of Amance, Meurthe-et-Moselle)

left : relative permeability with an overcast sky P_c
right : relative permeability with a clear sky P_g

FIG. 4. — Comparaison des éclairements relatifs et des perméabilités relatives sous un peuplement dense de hêtre (Forêt d'Amance)

à gauche : comparaison par ciel couvert
à droite : comparaison par ciel clair

Compared irradiance ratio and relative permeability under a dense beech stand (Forest of Amance, Meurthe-et-Moselle)

left : comparison with an overcast sky
right : comparison with a clear sky

relatives. Les photographies hémisphériques donneront donc les meilleurs résultats quand les points expérimentaux seront alignés sur la première bissectrice.

La figure 1 *a* montre pour une journée claire moyenne à Pelenq la correspondance entre éclairements relatifs (mesurés) et perméabilités relatives (calculées). L'ajustement est très bon (coefficient de corrélation de 0,971) quand on mesure la fréquence des trouées pour chaque « carré » de ciel : $q(A, \theta)$. Mais comme jusqu'à maintenant seul le cas des couverts homogènes avait été étudié théoriquement (BONHOMME, 1974) nous avons essayé d'adopter cette hypothèse (qui est manifestement inacceptable dans le cas de Pelenq) et nous avons calculé les perméabilités relatives en faisant intervenir $q(\theta) = \sum_{\lambda} q(A, \theta)$ au lieu de $q(A, \theta)$. Dans cette hypothèse l'ajustement des valeurs calculées aux valeurs mesurées est beaucoup moins bon ($R = 0,771$). Le gain de précision obtenu en remplaçant $q(\theta)$ par $q(A, \theta)$ est donc très appréciable.

Pour une journée de temps à peu près uniformément couvert, mais cependant assez lumineux (rayonnement global égal à 14 MJ m⁻² contre 23,3 MJ m⁻² par temps clair), la figure 1 *b* montre une plus grande dispersion des points surtout pour les forts éclairements relatifs. La droite de régression montre que quand la perméabilité relative est nulle, l'éclairement relatif est encore de 3 p. 100.

Pour la durée totale des mesures de Pelenq, nous avons observé trois journées claires, deux journées nuageuses et une journée couverte. Nous avons aussi pu mesurer un éclairement relatif moyen pour chacun des dix-huit points expérimentaux. Ces données ont été comparées aux perméabilités relatives calculées par temps clair et par temps couvert et à une perméabilité relative moyenne (moyenne arithmétique des deux perméabilités précédentes). Les résultats obtenus (fig. 2) sont les meilleurs pour la perméabilité relative par temps clair.

Les résultats obtenus ci-dessus correspondent à une gamme complète d'éclairements relatifs allant de quelques pour cent à près de cent pour cent. On retrouve des résultats analogues (fig. 3) pour des profils radiatifs verticaux effectués dans une futaie de Hêtre. Mais dans ce profil, nous constatons que les perméabilités correspondant à des éclairements relatifs inférieurs ou voisins de 10 p. 100 sont systématiquement sous-estimées. On retrouve ce fait aussi bien par temps couvert que par temps clair.

Cette tendance des photographies hémisphériques à la sous-estimation se trouve généralisée pour les faibles éclairements relatifs. La figure 4 met en évidence ce phénomène dans le cas de l'éclairement relatif mesuré sous un peuplement fermé de Hêtre. On remarquera aussi qu'il n'y a pratiquement pas de corrélation entre perméabilité relative et éclairement relatif.

2. — Comparaison des éclairements relatifs horaires

Pour nous rendre compte de la précision de notre méthode et pour essayer de savoir si nous pouvions nous servir de nos calculs pour estimer des éclairements à une échelle de temps inférieure à la journée, nous avons effectué des comparaisons horaires (notre programme de calcul donnant directement les perméabilités relatives horaires). Cette comparaison est possible grâce au dispositif expérimental de Pelenq dans lequel nous avons calculé les éclairements horaires théoriques à partir de notre programme de calcul par ordinateur.

Dans un premier temps, nous avons comparé entre eux les différents éclairagements (ou perméabilités) relatifs horaires. Tout d'abord nous avons tracé pour chacun des dix-huit points expérimentaux les droites de régression entre les éclairagements relatifs horaires et les perméabilités relatives horaires (13 couples de valeurs entre 7 et 19 heures). Puis nous avons calculé les dix-huit coefficients de corrélation correspondants. La figure 5 *a* montre la répartition de ces coefficients de corrélation en fonction de l'éclairement relatif journalier calculé pour chaque point de mesure.

FIG. 5. — Comparaison des coefficients de corrélation entre éclairagements relatifs horaires et perméabilités relatives horaires

- a) en haut : évolution des coefficients de corrélation en fonction de l'éclairement relatif journalier de chaque point de mesure,
- b) en bas : évolution des coefficients de corrélation en fonction de l'heure du jour.

Compared correlation coefficients of hourly irradiance ratio and hourly relative permeability

- a) top : evolution of the correlation coefficients versus daily irradiance ratio at each measurement point,
- b) bottom : evolution of the correlation coefficients versus the time of the day.

Il apparaît que la valeur des coefficients de corrélation augmente avec l'éclairement relatif des stations étudiées et que les stations situées dans les bandes d'orientation Nord-Sud donnent de meilleurs résultats que celles des bandes Est-Ouest. Ceci est dû au fait que dans le premier cas les situations horaires sont plus tranchées : pyranomètre franchement à l'ombre ou au soleil, tandis que dans le second cas beaucoup de situations intermédiaires, donc d'imprécisions dans les estimations, sont possibles.

Nous avons ensuite tracé pour chaque heure de la journée les droites de régression entre éclairement et perméabilité correspondant à chaque point de mesure. La figure 5 *b* montre aussi comment varient les coefficients de corrélation corres-

pondants en fonction de l'heure. On observe, pour les mêmes raisons que précédemment que ces derniers sont plus élevés dans les bandes Nord-Sud que dans les bandes Est-Ouest et que les valeurs les plus fortes sont au voisinage de midi.

Dans tous les cas, à des coefficients de corrélation élevés, correspondent des droites de régression très voisines de la première bissectrice. Les estimations horaires par photographies hémisphériques ne sont donc pas biaisées par rapport aux mesures directes.

3. — *Comparaison des éclairements énergétiques journaliers*

Notre méthode est la première qui utilise pour le calcul de la perméabilité relative, des lois théoriques de variation du rayonnement global qui sont très proches de la réalité. C'est pourquoi il nous a semblé intéressant de comparer les éclairements théoriques (horaires ou journaliers) calculés pour chaque point de mesure, aux éclairements mesurés réellement par des pyranomètres.

FIG. 6. — *Comparaison entre le rayonnement global journalier (ciel clair) mesuré avec un pyranomètre et le rayonnement global journalier calculé d'après les photographies hémisphériques (Forêt de Pelenq)*

Comparison between daily global radiation (clear sky) measured with a pyranometer and daily global radiation calculated with the use of hemispherical photographs (Forest of Pelenq, Var)

Nous avons reporté (fig. 6) les éclairements journaliers (en MJ m⁻²) calculés pour chacun des dix-huit points expérimentaux de Pelenq, d'après les données pyranométriques recueillies pendant trois jours clairs. En ordonnée nous avons représenté les éclairements théoriques calculés d'après notre programme de calculs pour le jour J = 240 correspondant à la date de nos mesures, et en prenant un

coefficient de trouble atmosphérique $T = 3,25$. Cette valeur a été choisie d'après les indications de DOGNIAUX (1973) préconisant cette valeur dans le cas d'un site rural (absence de pollution) et ayant un air assez peu humide (Pelenq se trouve en Haute-Provence). Mais ce coefficient s'est cependant avéré un peu trop faible ce qui explique les différences de 15 p. 100 que l'on observe dans toutes les comparaisons notamment dans la pente de la droite de régression de la figure 6. Ceci mis à part, la comparaison entre les éclairagements énergétiques donne de très bons résultats qui sont à rapprocher de ceux obtenus avec les éclairagements relatifs journaliers.

4. — Comparaison des éclairagements énergétiques horaires

Nous avons représenté sur la figure 7, l'évolution au cours de la journée, des éclairagements calculés et des éclairagements mesurés, pour un certain nombre de points d'expérimentation. Mis à part le fait que les valeurs calculées sont en moyenne 15 p. 100 supérieures aux valeurs mesurées, on trouve un bon parallélisme entre

FIG. 7. — Évolution du rayonnement global au cours de la journée pour différents points de mesure (Forêt de Pelenq)

———— mesures directes par pyranomètres
 - - - - - valeurs calculées par photographies hémisphériques

*Daily evolution of the global radiation
 at various measurement points (Forest of Pelenq, Var)*

———— direct measures from pyranometers
 - - - - - values calculated from hemispherical photographs

TABLEAU I

*Comparaisons entre les valeurs horaires de rayonnement global (en MJ m⁻²),
calculées à partir des photographies hémisphériques
et mesurées par des pyranomètres, pour différents points de mesure*

*Comparison between hourly values of the global radiation (in MJ m⁻²),
calculated from hemispherical photographs, and measured with pyranometers*

Station	Droite de régression $y = a + bx$		Coefficients de corrélation R
Plein découvert	— 0,021	1,153	0,998
PNS 1	— 0,111	1,248	0,975
PNS 2	— 0,187	1,043	0,879
PNS 3	— 0,026	1,450	0,719
PNS 4	— 0,150	1,127	0,983
PNS 5	0,009	1,264	0,951
PNS 6	0,001	1,165	0,985
PNS 7	— 0,021	0,986	0,622 ⁽¹⁾
PNS 8	— 0,084	1,099	0,989
PNS 9	0,036	1,140	0,992
PEW 1	— 0,336	1,275	0,977
PEW 2	— 0,105	1,203	0,929
PEW 3	— 0,090	1,697	0,728
PEW 4	— 0,290	1,180	0,968
PEW 5	— 0,150	1,120	0,890
PEW 3	0,184	1,126	0,582
PEW 7	— 0,064	1,009	0,603
PEW 8	— 0,095	1,141	0,992
PEW 9	0,875	0,113	0,172

⁽¹⁾ Les valeurs soulignées correspondent aux situations où la corrélation entre valeurs calculées et valeurs mesurées est mauvaise. (*The underlined values represent points where the correlation between calculated and measured values is poor*).

les 2 types de courbes, excepté pour les points PNS 3 et PNS 7 qui correspondent à des emplacements sous taillis fermé, donc à des éclairagements faibles.

Le tableau 1 sur lequel nous avons fait figurer les équations des droites de régression linéaire des éclairagements calculés en fonction des éclairagements mesurés montre la très bonne relation qui existe entre les deux méthodes d'estimation des éclairagements horaires. L'examen des résultats montre que les droites qui ont des coefficients de corrélation élevés (supérieurs à 0,9) ont des pentes qui diffèrent de moins de 10 p. 100 de la courbe de référence obtenue avec le plein découvert. Les relations entre éclairagements énergétiques sont plus étroites que celles obtenues avec les éclairagements relatifs ainsi que le montre la comparaison de la figure 5 a et du tableau 1.

V. — DISCUSSION

Dans le paragraphe précédent nous avons présenté de nombreux résultats que nous allons tenter maintenant de regrouper et d'analyser, en essayant de voir dans quels cas les estimations par photographies hémisphériques peuvent avantageusement remplacer les mesures directes de rayonnement.

Les valeurs journalières d'éclairement ont été étudiées du point de vue des éclairagements relatifs et du rayonnement global en séparant les journées claires des journées couvertes. Les perméabilités relatives journalières sont dans le cas de Pelenq très étroitement liées aux éclairagements relatifs journaliers. La relation est meilleure par journée claire que par journée couverte. Le fait que la journée couverte ait été très lumineuse (rayonnement global atteignant 60 p. 100 de celui d'une journée claire) donc en réalité assez différente du ciel standard uniformément couvert explique les moins bons résultats obtenus dans ce cas. Les observations faites dans la hêtraie montrent de bonnes relations entre photographies et pyranomètres quand l'éclairement relatif dépasse 10 à 20 p. 100, ce qui est le cas pour les niveaux supérieurs du profil vertical.

Les résultats médiocres obtenus pour les niveaux inférieurs et au niveau du sol, aussi bien par ciel clair que par ciel couvert, peuvent s'expliquer de deux manières complémentaires. La figure 6 montre que les perméabilités relatives sous-estiment l'éclairement relatif et que les deux données ne sont pas corrélées entre elles.

La sous-estimation est dûe au fait que, avec les photographies hémisphériques, on considère uniquement le rayonnement qui passe directement à travers les trouées du feuillage. Le rayonnement diffusé et retransmis par les feuilles n'est pas pris en compte dans le calcul de la perméabilité relative. BONHOMME (1974) donne une méthode de calcul assez complexe permettant de tenir compte de cette fraction du rayonnement solaire. Nous pensons dans l'avenir l'intégrer dans nos calculs de la manière suivante :

Une surface élémentaire unitaire de ciel située au point A, θ est composée d'une surface $q(A, \theta)$ de trouées qui laisse passer directement le rayonnement solaire, et d'une surface $1 - q(A, \theta)$ de feuillage. Ce feuillage a lui-même un certain coefficient de transmission $K(F)$, fonction de l'indice foliaire total du peuplement F. Cette fonction pourra être calculée soit expérimentalement à partir de données mesurées

d'indices foliaires et d'éclairement relatif sous différents peuplements, soit théoriquement à partir des calculs de BONHOMME.

Il faudrait en fait considérer séparément le visible et l'infrarouge. Dans le visible, le facteur d'absorption des feuilles est suffisamment élevé pour que l'on puisse, en première approximation, les assimiler à des corps opaques ($K(F)$ négligeable) et utiliser de ce fait, directement les résultats obtenus avec les clichés. L'infrarouge, par contre est peu absorbé par les feuilles et il faut alors tenir compte de $K(F)$. Comme les pyranomètres I. N. R. A., sont sensibles à la fois au visible et à l'infrarouge, ceci permet d'expliquer certains résultats (fig. 4).

FIG. 8. — *Comparaison des erreurs absolues et relatives sur le calcul de la perméabilité (erreurs dues aux différences de prise de vue) en fonction des valeurs moyennes de perméabilité P_e*

Compared absolute and relative errors on the calculation of the permeability (errors due to differences in brightness when taking the photograph) versus mean values of the relative permeability P_e

L'absence de corrélation entre éclairement et perméabilité pour les faibles pourcentages (inférieurs à 10 p. 100) est due à des erreurs de temps d'exposition au moment de la prise des photographies hémisphériques. Ces erreurs sont imputables aux différences de luminosité d'un point à l'autre du ciel même par temps couvert. A Pelenq nous avons pris six photographies par point d'expérimentation à différents moments par temps couvert.

La figure 8 montre pour les perméabilités relatives par temps couvert, l'évo-

lution des erreurs expérimentales en fonction de la perméabilité relative calculée. Les écarts absolus autour de la moyenne sont de $\pm 3,43$ et ont tendance à augmenter très légèrement quand la perméabilité est faible. Par contre les écarts relatifs passent de ± 5 p. 100 pour des perméabilités élevées à près de ± 30 p. 100 pour des perméabilités relatives de l'ordre de 10 à 20 p. 100. La précision des estimations faites sous couvert fermé est donc très médiocre et c'est dans le domaine de la prise de vue qu'il faudra chercher des améliorations.

En ce qui concerne les valeurs théoriques journalières de rayonnement global, nous avons utilisé dans les calculs un coefficient de trouble atmosphérique $T = 3,25$ qui donne des valeurs 15 p. 100 supérieures à celles mesurées réellement. Ce biais peut être éliminé en prenant pour T une valeur voisine de 4 à 4,5. Cette nouvelle valeur n'est pas invraisemblable car au moment précis des expériences le ciel était d'un bleu très pâle ce qui indique que la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère était très élevée. Sur le plan pratique on peut adopter la démarche suivante : pour une expérience donnée on mesure le rayonnement global journalier en plein découvert et on calcule le coefficient de trouble correspondant. On se sert ensuite des photographies hémisphériques pour calculer l'éclairement énergétique journalier de chaque point de mesure. D'après les résultats précédents, on sait que la précision sera très bonne pour les stations recevant une fraction importante du rayonnement incident (en tout cas supérieure à 15-20 p. 100). C'est un cas que l'on retrouve dans beaucoup d'interventions sylvicoles : éclaircies, coupes d'abri, coupes de régénération, coupes rases par bandes, trouées, clairières ou lisières. Seul le cas des peuplements fermés, donc à éclairement relatif faible, se prête mal aux estimations par photographies hémisphériques.

L'intérêt de ces résultats nous a conduit à étudier ce qui se passe au niveau des sommes horaires d'éclairement et des perméabilités relatives horaires. Sur la figure 7, on peut voir que les erreurs absolues sur les estimations horaires sont à peu près du même ordre de grandeur quel que soit le point de mesure et l'heure de la journée ; ces erreurs étant bien entendu liées à l'erreur de mesure de $q(A, 0)$ sur les photographies hémisphériques. Ceci explique les résultats de la figure 5 sur les perméabilités horaires à savoir que les meilleures corrélations sont observées pour les points ayant un éclairement relatif élevé et pour les heures au milieu de la journée où la part du rayonnement solaire direct est prépondérante. Ceci explique aussi que les ajustements que l'on obtient avec les éclairements absolus sont meilleurs qu'avec les éclairements relatifs. Le tableau 1 montre des coefficients de corrélations élevés ce qui prouve que, même au niveau horaire, la précision des modèles de répartition de l'éclairement dans le ciel (utilisés dans nos calculs sur ordinateur) est suffisante. Ceci est dû à la bonne superposition entre ces modèles (surtout au niveau de la trajectoire apparente du soleil) et les tableaux de fréquence de trouées $q(A, 0)$. On a donc intérêt au moment de la prise des photographies à avoir le maximum de précision dans l'orientation des clichés pour que cette superposition soit la meilleure possible.

En ce qui concerne la fréquence des trouées, les différents auteurs ont toujours mesuré la fréquence moyenne pour une hauteur angulaire donnée $q(\theta)$ car les études ont porté sur des couverts homogènes. En introduisant la notion de fréquence ponctuelle pour un azimut et une hauteur angulaire donnés $q(A, 0)$, nous avons apporté une amélioration très sensible des estimations par photographies hémis-

phériques dans le cas des couverts hétérogènes. En effet, on voit sur la figure 1 que, pour les mêmes points de mesure, la corrélation entre perméabilité et éclaircissement passe de 0,771 à 0,971 quand on mesure $q(A, \theta)$ au lieu de $q(\theta)$.

VI. — CONCLUSION

Nous avons essayé de montrer au cours de cet article ce que nous pouvions attendre de l'utilisation en Forêt de la technique des photographies hémisphériques.

En ce qui concerne les microclimats radiatifs, nous avons très sensiblement amélioré cette technique en réalisant des modèles fonctionnels qui tiennent compte de l'énergie émise par chaque point du ciel et qui nécessitent de mesurer la fréquence des trouées de manière ponctuelle $q(A, \theta)$.

L'utilisation de cette technique améliorée nous a conduit aux deux conclusions suivantes. Les photographies prises sous des peuplements fermés, dont l'éclaircissement relatif est ordinairement inférieur à 10 p. 100, ne donnent qu'une très médiocre appréciation de l'éclaircissement relatif réel. Les améliorations que nous pensons apporter prochainement sont d'ordre théorique (prise en compte du rayonnement diffusé et retransmis par le feuillage) et d'ordre technique (perfectionnement de la prise de vue et du traitement des clichés).

Par contre les résultats obtenus dans des peuplements non fermés sont très satisfaisants. Dans ce cas les deux sources d'erreurs signalées précédemment ont un poids relatif beaucoup plus faible car l'éclaircissement relatif est alors supérieur à 15-20 p. 100. C'est ainsi que peuvent être estimés avec une précision suffisante pour beaucoup d'études les éclaircissements relatifs journaliers et même horaires pour les différents types de temps caractéristiques (temps clair et temps uniformément couvert).

En prenant la précaution de mesurer avec un pyranomètre le rayonnement global en plein découvert, il est même possible d'avoir une excellente estimation des énergies horaires et journalières arrivant à chaque point de mesure.

On peut ainsi envisager des études complètes de microclimatologie du rayonnement solaire avec l'aide des seules photographies hémisphériques et d'un pyranomètre de référence. Cette dernière conclusion est particulièrement intéressante quand on pense que la plupart des opérations sylvicoles dans les peuplements adultes ont pour but d'ouvrir ces peuplements (coupes d'abri, coupes de régénération, coupes rases par bandes...), notre méthode permettant alors de chiffrer les quantités d'énergie mises à la disposition des jeunes plantations ou des régénérations.

Reçu pour publication en août 1975.

SUMMARY

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

II. — EXPERIMENTAL STUDY

The author briefly recalls the method used for calculating the relative permeability of a forest canopy to solar radiation, and the irradiance under this canopy, based on hemispherical photographs taken from the ground.

He then compares the results obtained with the photographs to direct measures of the solar radiation under various forest stands.

For irradiance ratio over 15-20 p. 100, the hemispherical photographs give results very similar to those obtained with pyranometers.

In these conditions, if we measure the global radiation in an open area, we can estimate with a good precision the global radiation under a canopy, with the sole use of hemispherical photographs.

For irradiance ratio under 10 p. 100, the hemispherical photographs under-estimate the actual irradiance. We must then under-account the transmittance of the foliage and the spectral composition of the light.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE VERWENDUNG VON HEMISPHÄRISCHEN WEITWINKELAUFNAHMEN ZUR BERECHNUNG DER STRAHLUNGSDURCHLÄSSIGKEIT DES KRONENDACHES IN WALDBESTÄNDEN.

II. — EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Der Autor wiederholt vorerst die Methodik zur Berechnung der relativen Durchlässigkeit des Kronendaches und der Strahlungsenergie im Bestand an Hand von hemisphärischen Weitwinkelaufnahmen.

Anschliessend werden die Ergebnisse mit direkten Strahlungsmessungen in verschiedenen Beständen verglichen.

Bei relativen Durchlässigkeiten von über 15 bis 20 p. 100 ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Pyranometermessungen.

Wenn die Globalstrahlung auf einer Freifläche gemessen wird, kann unter diesen Voraussetzungen die Globalstrahlung im Bestand ausschliesslich an Hand von hemisphärischen Weitwinkelaufnahmen mit grosser Genauigkeit berechnet werden.

Bei Durchlässigkeiten unter 10 p. 100 wird die tatsächliche Globalstrahlung durch die Weitwinkelaufnahmen unterschätzt. Es müssen daher der Transmissionskoeffizient der Blätter und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung mit berücksichtigt werden.

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.
- BECKER M., 1971. Une technique nouvelle d'utilisation des photographies hémisphériques pour la mesure du microclimat lumineux en forêt. *Ann. Sci. forest.*, **23** (4), 425-442.
- 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 Docteur-Ingénieur, Univ. Aix-Marseille, C. N. R. S., A. O. 9675.
- CLARK F. G., 1961. An hemispherical forest photocanopymeter. *J. Forest.*, **53**, 103-105.
- DOGNIAUX R., 1973. Représentations analytiques des composantes du rayonnement lumineux solaire. Conditions de ciel serein. Inst. roy. météorol., Belgique, Note prélim., n° 17.
- DUCKEY 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. *Publ. Stn. Sylvicult.*, I. N. R. A.-C. N. R. F., n° 70-4.
- DUCKEY M., 1974. Perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire, application aux photographies hémisphériques. *Publ. Stn. Sylvicult.*, I. N. R. A.-C. N. R. F., n° 74-02.
- DUCKEY M., 1975. Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. I. Analyse théorique de l'interception. *Ann. Sci. forest.*, **32** (2), 73-92.
- EVANS G. C., COOMBE D. E., 1959. Hemispherical and woodland canopy photography and light climate. *J. Ecol.*, **47**, 103-113.
- HILL R., 1924. A lens for whole sky photographs. *Quart. J. roy. meteorol. Soc.*, **50**, 227-235.
- ROUSSEL L., 1953. Recherches théoriques et pratiques sur la répartition en quantité et qualité de la lumière dans le milieu forestier. Influence de la végétation. *Ann. Éc. Nat. Eaux Forêts*, **13** (2), 295-385.