

Jean MOUNIER - Charles Pierre PÉGUY *

ÉTUDES SUR LA RADIATION SOLAIRE ET L'INSOLATION EN FRANCE



8105-5 D RM

RÉSUMÉ

Étant donné la rareté des observations de la radiation solaire globale, il est nécessaire de connaître avec précision les variations spatiales de la fraction d'insolation quotidienne. Cette variable permet d'estimer la radiation globale sur une surface horizontale par l'application des formules dont on compare les résultats avec des mesures effectuées (ex. Rennes). Les traitements statistiques et cartographiques des valeurs de la fraction d'insolation quotidienne sont réalisés pour quelques régions françaises.

SUMMARY

Studies on solar radiation and insolation in France.

Because the observations of the solar global radiation are unusual, it is necessary to know the spatial variations of the daily fraction of insolation. With the climatic variable it is possible to compute the global radiation on the horizontal surface for application of the mathematic formulas (example in Brittany). The statistic calculations and maps of the daily fraction of insolation are prepared for some french regions.

ZUSAMMENFASSUNG

Studien über die Sonnenstrahlung und die Sonnenscheindauer in Frankreich.

Weil die Beobachtungen der gesamten Sonnenstrahlung selten sind, ist es nötig die areale Unterschiede der relativen täglichen Sonnenscheindauern zu kennen. Mit dieser Variable können wir die gesamte Sonnenstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche unter Anwendung der mathematischen Formeln (zum Beispiel im Becken von Rennes), ausrechnen. Die statistischen Rechnungen und die Landkartenzeichnungen des relativen täglichen Sonnenscheins sind schon für einige französische Gebiete ausgeführt.

L'étude du potentiel énergétique que représente pour la Terre le rayonnement solaire, longtemps confinée à des considérations théoriques (circulation atmosphérique) ou à certaines applications bien déterminées (évapo-transpiration pour les agronomes) a pris une dimension nouvelle depuis la crise de l'énergie. On a parlé, vers 1975, de «gisement solaire». Gisement singulier, faut-il préciser : car à la différence des combustibles minéraux, qui se présentent sous forme de réserves exploitables en quantités finies, il s'agit ici de l'une de ces «ressources naturelles renouvelables», dont le renouvellement obéit en fait à des cycles largement aléatoires. D'emblée, une telle étude relève du domaine des statistiques et fait appel, au premier chef, à la notion de fréquences.

Parmi les ressources naturelles renouvelables, la radiation solaire globale est en fait celle qui conditionne toutes les autres, à deux exceptions près (1). A la surface du sol, elle est la somme d'une **radiation directe** et d'une **radiation diffuse** (2). L'énergie solaire doit être convertie en énergie thermique, ou électrique et l'éventail des usages déjà effectifs va du chauffage domestique à la ... réfrigération ou au contraire aux fours industriels à très hautes températures. Certaines techniques peuvent ne mettre en oeuvre que le seul rayonnement direct, d'autres l'ensemble du rayonnement global.

(1) La géothermie et l'énergie des marées.

(2) De nombreux documents donnent le rayonnement direct mesuré **perpendiculairement** aux rayons solaires, grâce à des instruments qui suivent le soleil automatiquement dans sa course et captent ainsi le maximum d'énergie à chaque instant. Les mesures des rayonnements diffus et global ne peuvent être faites, elles, qu'avec des appareils immobiles sur un plan horizontal. Dans tel cas le rayonnement direct n'est pas la somme du direct et du diffus, mais de la **composante horizontale** du direct (0.63 de celui-ci pour 45° lat. N.) et du diffus.

Malheureusement, les mesures de ces variables climatiques sont rares ; une station seulement dans la France de l'Ouest, RENNES, réalise l'observation de la radiation globale au pyranomètre depuis plus de dix ans. En attendant de rendre opérationnelle l'exploitation des données fournies par les satellites, force est donc de calculer les valeurs de la radiation solaire au niveau du sol par des formules appropriées. Celles-ci se présentent le plus souvent sous la forme de relations linéaires avec la durée de l'ensoleillement, ou plus exactement la fraction d'insolation, rapport de la durée mesurée de l'insolation à la durée maximale du jour. Justement, le nombre plus élevé de stations pratiquant la mesure de l'insolation, permet de préciser les variations dans le temps et dans l'espace de la fraction d'insolation et à partir de là, celles du gisement solaire. Toutefois, l'analyse des mesures de la radiation peut déboucher sur une amélioration de ces formules en adaptant pour une région donnée et une période déterminée, les constantes des relations linéaires.

La suite de cet article est orientée vers la seule estimation de la radiation **globale**.

I - VARIATIONS DES VALEURS QUOTIDIENNES DE LA FRACTION D'INSOLATION

En France, la répartition de l'insolation est désormais bien connue, grâce aux publications de la Météorologie Nationale (GARNIER 1978). Mais trop longtemps, les études statistiques elles-mêmes prenaient comme « individus » les totaux mensuels, ou tout au plus décennales, des durées d'insolation pour étudier la variabilité interannuelle de l'ensoleillement. Méthode valable pour préciser les aléas climatiques de l'agriculture ou du tourisme, mais nullement adaptée à la recherche dans le domaine de l'énergie solaire qui doit prendre en compte les réalités QUOTIDIENNES successives. Or, les lois de distribution de la fraction d'insolation quotidienne - que nous désignerons ici par R (3) - ne peuvent se déduire des lois de distribution des fractions calculées sur des totaux mensuels d'insolation.

1. Étude fréquentielle de la fraction d'insolation journalière

Le but est de connaître les fréquences des différents rapports quotidiens d'ensoleillement ou fraction quotidienne d'insolation R .

Notamment, il paraît intéressant d'évaluer la probabilité des journées définies par des possibilités de stockage supérieures aux nécessités de dépense des appareils de captage. Les analyses de distribution des valeurs quotidiennes de la fraction d'insolation ont été réalisées pour le SE de la France (1980) et sont en cours de développement pour la France de l'Ouest, dans le cadre des études animées par le PIRDES, Programme Interdisciplinaire de recherche et de développement de l'énergie solaire (CNRS).

La comparaison des histogrammes obtenus montre de sensibles différences entre les stations méditerranéennes et la station de Rennes, notamment en hiver (fig. 1). Tandis que les gradients des stations méditerranéennes présentent en général un profil en U, avec deux fréquences maximales correspondant à la fraction 0 et aux fractions supérieures à 0,7, durant le mois de décembre, la station du climat océanique est caractérisée par un maximum fréquentiel des fractions d'insolation inférieures à 0,1 et par une diminution sensible et irrégulière des fréquences des fractions élevées. Toutefois, pour les mois d'été, les valeurs du rapport d'insolation à Rennes ont une distribution plus régulière qui se rapproche de la **distribution log-normale**. Cette rapide analyse attire donc l'attention sur l'existence de fortes variations au cours des saisons des lois de distribution de la durée d'insolation pour une station donnée.

2. Les rythmes annuels des fréquences de la fraction d'insolation quotidienne

Pour l'année, les variations de la distribution des valeurs de la fraction d'insolation sont représentées sur des calendriers de probabilités (fig 2) qui soulignent à nouveau les oppositions climatiques régionales. Pour les stations méditerranéennes, les fractions élevées d'insolation augmentent sensiblement de fréquences en été, atteignant un fort maximum en juillet, bien que durant l'hiver, la probabilité d'atteindre et de dépasser la fraction égale à 0,5 reste égale ou supérieure à un jour sur deux. Le graphique de Rennes montre une toute autre répartition des valeurs journalières de l'insolation au cours de l'année. Ici, le rythme saisonnier est principalement caractérisé par les très faibles fréquences des jours de fort ensoleillement durant l'hiver ; en décembre, le ciel reste constamment couvert plus d'un jour sur deux et à peine plus de deux jours sur dix enregistrent une durée d'insolation supérieure à la durée de soleil occulté. Ensuite, après une amélioration sensible des conditions d'ensoleillement en mars, la distribution des valeurs quotidiennes du rapport d'insolation reste quasiment constante d'avril à septembre. On ne retrouve pas en été l'accroissement remarquable de la fréquence des jours très ensoleillés avec $R > 0,8$; à peine si la probabilité de dépasser le rapport 0,5 est supérieure à un jour sur deux en juillet. Finalement, c'est au début et à la fin de la saison froide, en octobre et en mars, que les conditions de l'ensoleillement s'améliorent dans la station bretonne, par rapport aux régions méditerranéennes.

Ainsi, la cartographie des fréquences des différentes fractions d'insolation s'impose pour dégager les variations spatiales des potentialités en matière d'énergie solaire.

3. La répartition spatiale de la fraction d'insolation

L'analyse fréquentielle des données quotidiennes de la fraction d'insolation R pour un réseau suffisant de postes d'observations permet l'élaboration de cartes des conditions de l'ensoleillement. Un tel travail a été réalisé en France, dans le cadre du PIRDES par un groupe de formations de recherche du CNRS (4) pour le «Midi méditerranéen» *sensu lato* (1980).

- (3) Nous regrettons à ce propos, une certaine confusion ; certains auteurs désignent cette fraction par \bar{S} que l'on peut confondre avec l'écart type, d'autres adoptent pour le rapport d'ensoleillement à l'échelle de la journée le vocable difficile et peu heureux de SS/SS_0 .
- (4) Institut de Mécanique de Grenoble (L.A. n 6) et Rech. carto. clim. et hydro (E.R. n 30) Prog. PIRDES.

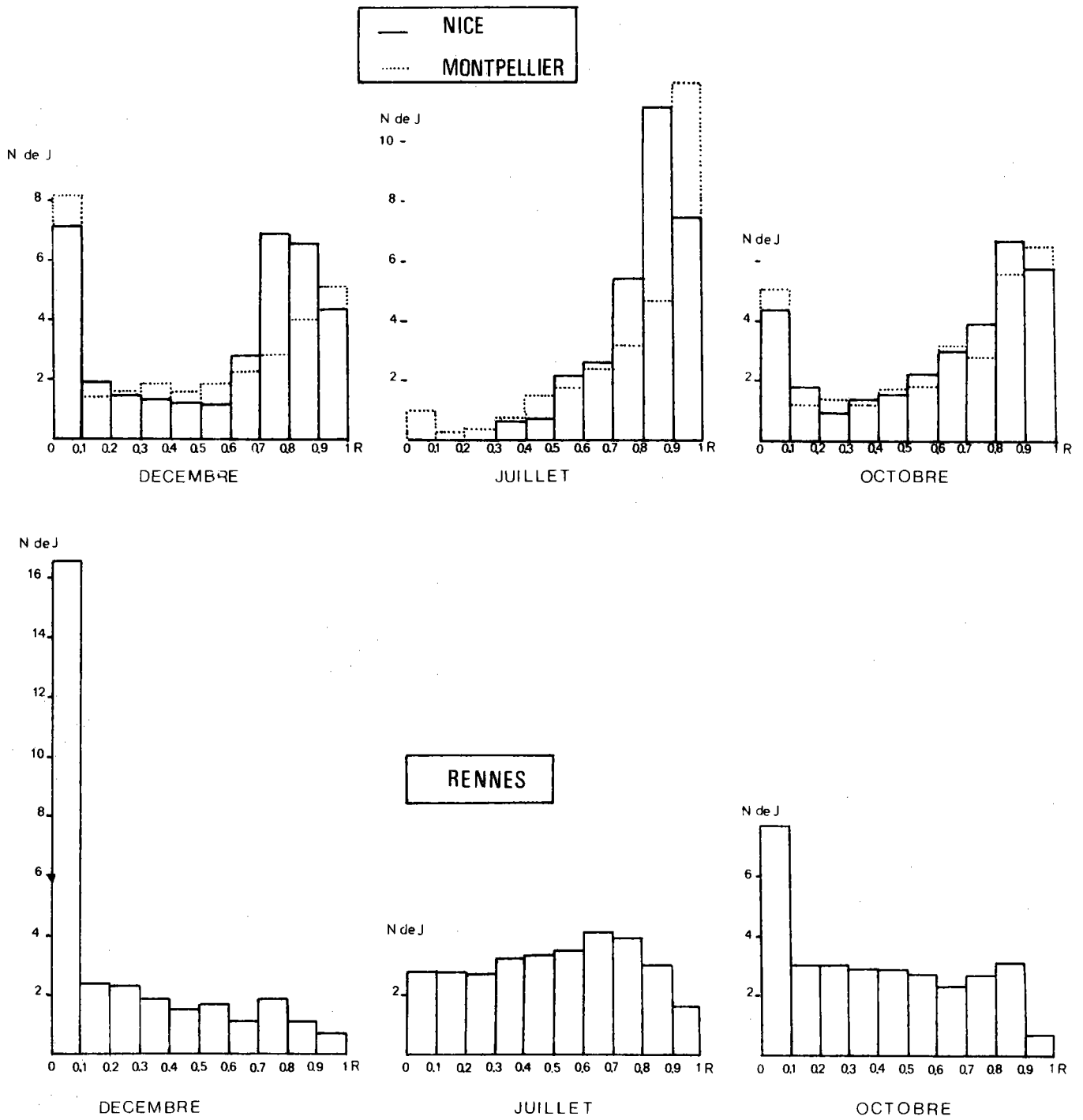


FIGURE 1 : Distribution de la fraction d'insolation journalière R, fréquences exprimées en nombre de jours, Rennes St-Jacques (1951-1979), Montpellier et Nice (1949-1975).

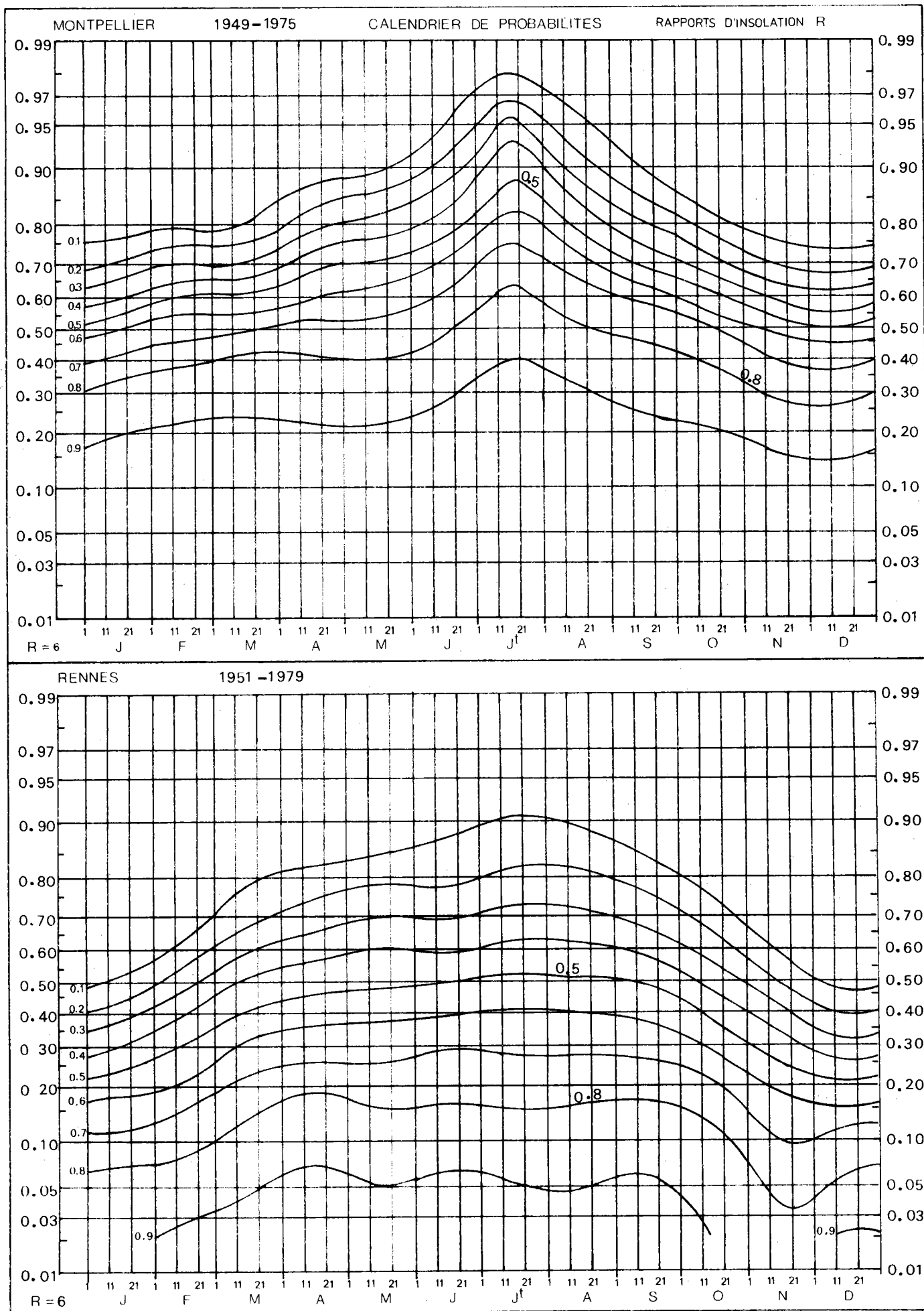


FIGURE 2 : Variations au cours de l'année des distributions de la fraction d'insolation journalière. Traitements ER 30, CNRS (St.Martin, 1981)

Les données y ont été traitées mois par mois. Pour chacun d'eux ont été déterminées les probabilités de dépassement des seuils $R = 0.8$ (grand beau) et $R = 0.5$ (beau temps), ainsi que la probabilité que ne soit pas atteint le seuil $R = 0.1$ (soleil voilé pendant les 9/10 du temps). Une quatrième carte donne, pour chaque mois, la moyenne arithmétique des rapports d'insolation journaliers.

L'aménageur, l'utilisateur en matière d'habitat solaire ou l'économiste regretteront peut-être de ne pouvoir lire directement sur ces cartes des données exprimées en unités de mesure de quantité de chaleur ou de flux d'énergie. Mais, il est nécessaire auparavant de multiplier les analyses des séries de mesures de la radiation globale qui commencent à être utilisables et d'homogénéiser les méthodes de calcul qui doivent suppléer ou compléter ces séries de mesures encore trop rares.

II - ANALYSES STATISTIQUES DE LA RADIATION GLOBALE APPLIQUÉES A LA REGION DE RENNES (HAUTE-BRETAGNE INTÉRIEURE)

L'étude de la série de mesures quotidiennes de la radiation globale, effectuées à Rennes -St-Jacques sur près de 11 ans (1968-1978), permet d'atteindre une connaissance plus précise, sans à priori, des potentialités en énergie solaire des régions intérieures de la Haute-Bretagne. D'une part, il s'agit de dégager les lois de distribution des valeurs quotidiennes de la radiation globale mesurée, d'autre part d'utiliser ces données pour mieux adapter à l'échelle régionale, les formules permettant de calculer en fonction de la fraction d'insolation quotidienne, R , la radiation globale ($R.G.$) arrivant sur une surface réceptrice au voisinage du sol.

1. L'analyse fréquentielle de la radiation globale mesurée à Rennes

Les distributions des valeurs mesurées de RG ont été déterminées pour différents mois caractéristiques de l'année décembre et juin, octobre et mars. Les histogrammes ainsi obtenus suggèrent des distributions en général plus proches d'une **répartition log-normale** que les distributions de la fraction quotidienne d'insolation. Ce rapprochement avec la distribution théorique log-normale autorise une représentation des fréquences cumulées (cumulations rétrogrades : fréquences des journées au cours desquelles RG atteint et dépasse une valeur donnée) de la radiation globale sur des graphiques de probabilité gaussio-logarithmiques (fig. 3).

Parmi les mois les plus exigeants pour l'homme en besoins d'énergie, décembre est évidemment celui qui reçoit les plus faibles apports énergétiques. Si l'on retient la valeur de 360 J. cm^{-2} , correspondant à un flux de chaleur intégré durant la journée de 1 kWh. m^{-2} , on observe que la probabilité d'atteindre et de dépasser un tel seuil est de l'ordre d'un jour sur quatre (5). Pendant, les mois d'octobre et de mars qui coïncident généralement avec les limites de la période nécessitant un chauffage continu, les possibilités sont plus avantageuses. Durant plus de neuf jours sur dix, la RG , reçue sur une surface horizontale, est au moins égale à 1 kWh. m^{-2} , bien plus, au cours d'un jour sur deux, RG atteint et dépasse $2,2 \text{ kWh.m}^{-2}$ en octobre, $2,5$ en mars. Enfin, au début de l'été, la fréquence des jours au cours desquels est enregistrée une valeur de RG égale ou supérieure à $5,8 \text{ kWh. m}^{-2}$ est de 50 % et celle de dépasser 8 kWh.m^{-2} de 10 % (6) ; ces données apparaissent comme les conditions les plus élevées à l'emploi de l'énergie solaire à des fins économiques...

La seule étude fréquentielle des valeurs quotidiennes de la variation globale mesurée constitue donc un indicateur indispensable pour déterminer la qualité du gisement solaire d'une région. Par contre, il paraît nécessaire également de souligner les contraintes climatiques, celles-ci pouvant être évaluées par une étude fréquentielle des séquences ou successions de jours caractérisés par de faibles valeurs de RG , inférieures par exemple à 360 J/cm^{-2} . Cette étude est particulièrement intéressante pour la période qui s'étend de novembre à février. Au cours de la saison froide ainsi délimitée, un jour sur quatre appartient à une séquence d'au moins quatre jours de faible radiation. Surtout, les séquences de plus de dix jours consécutifs de faible radiation se produisent en décembre ou s'étalent de décembre à janvier, à raison d'une année sur deux.

2. La radiation globale estimée, la gamme des formules

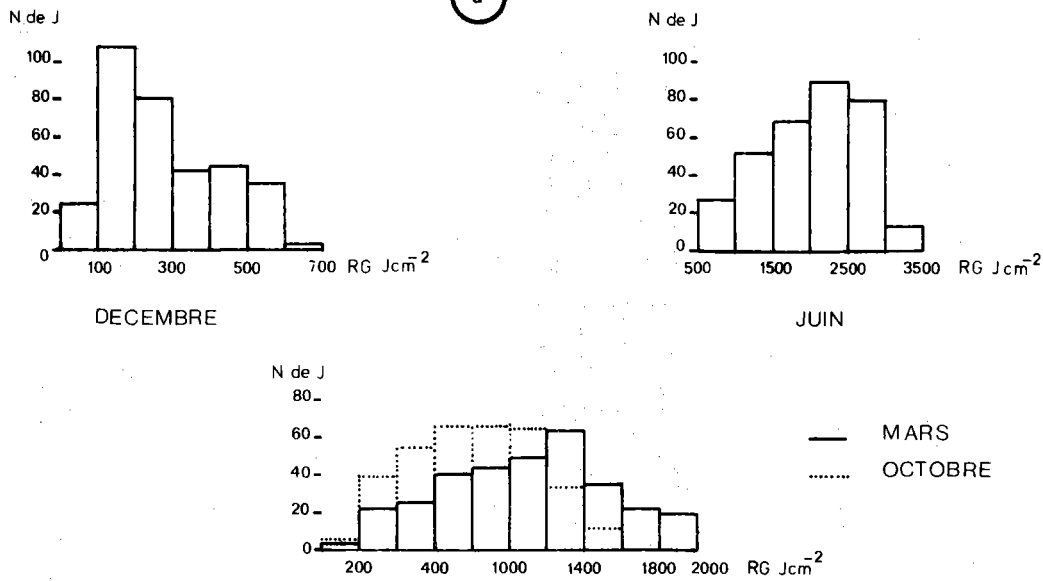
Ces études de la «distribution» des valeurs de RG , même quand elles ne portent encore que sur une seule station, ont déjà leur intérêt propre. Mais les mesures ont une portée méthodologique beaucoup plus grande puisqu'elles permettent de tester les **estimations** de RG proposés par divers auteurs selon des méthodes **ad hoc**, en fonction de paramètres météorologiques dont les observations sont beaucoup plus répandues.

C'est ainsi que la Météorologie Nationale a effectué des recherches, sous la direction de Ch. PERRIN de BRICHAMBAUT (1975-1978), ultérieurement élargies dans le cadre du PIRDES (LESTIENNE et al., 1979), visant à introduire un paramètre régional dans les diverses formules d'estimation de la radiation globale. A une constante près - la transparence de l'atmosphère - RG est fonction de la constante solaire, de la nébulosité, de la hauteur du soleil, h , qui varie selon la latitude du lieu et la déclinaison du soleil. A partir de ces bases, deux voies peuvent être suivies pour déterminer la radiation globale, RG_{ho} sur une surface horizontale au niveau du sol.

(5) Rappelons les relations adoptées $1 \text{ Wh.m}^{-2} = 0,36 \text{ J. cm}^{-2}$ ou $1 \text{ J.cm}^{-2} = 2,78 \text{ Wh. m}^{-2}$ pour passer des mesures exprimées en joules aux mesures estimées en Wh.

(6) Cette dernière valeur peut paraître élevée, elle représente en fait 0,69 de l'ordre de grandeur de la valeur moyenne journalière en juin de la radiation globale à l'entrée de l'atmosphère : $RGA = 11,6 \text{ kWh. m}^{-2}$.

a



b

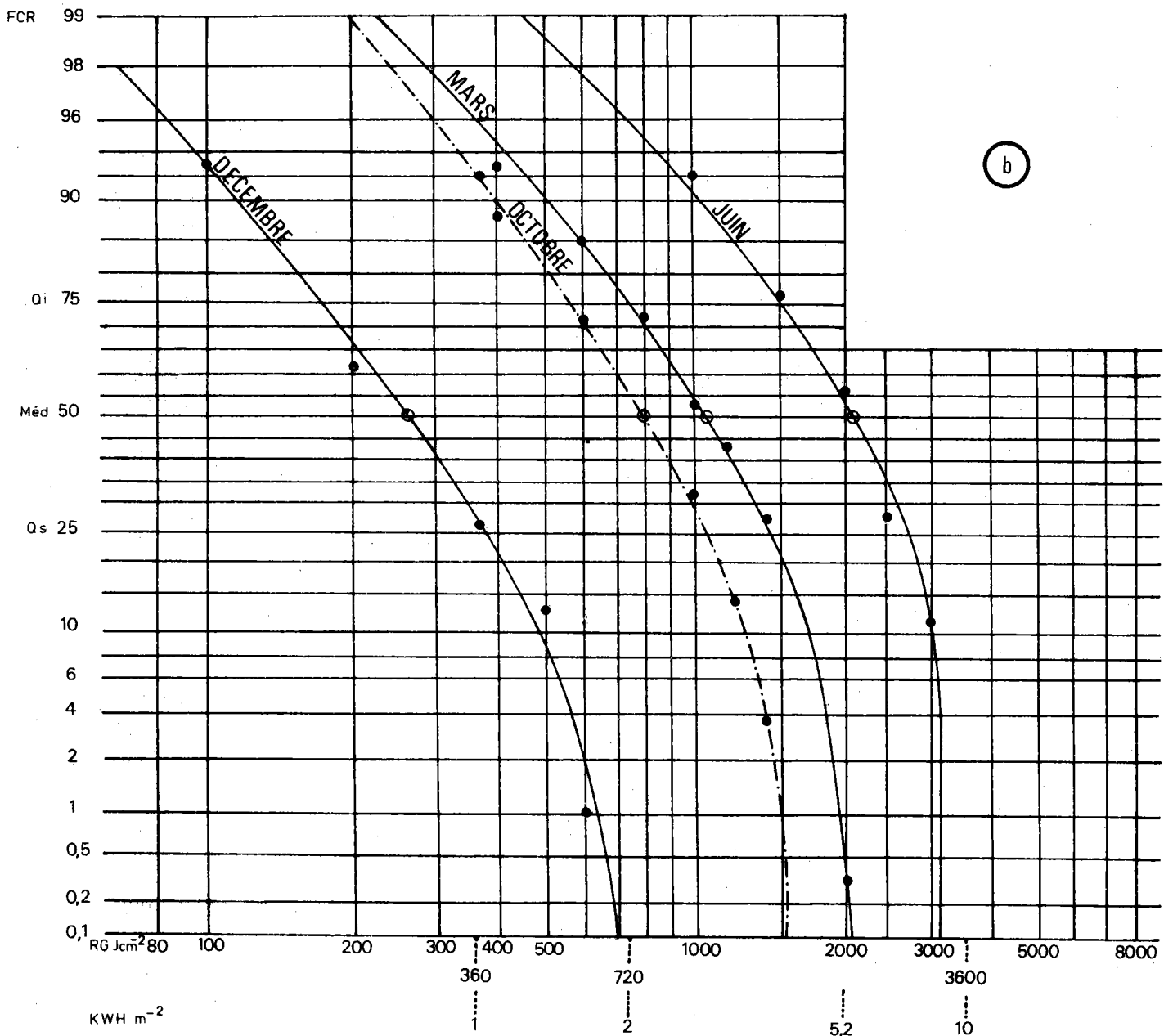


FIGURE 3 : Études fréquentielles de la radiation globale journalière mesurée (J.cm⁻²) à Rennes St-Jacques (1968-1978)

a : histogrammes mensuels. b : courbes de probabilités gaussollogarithmiques, fréquences en % d'atteindre et de dépasser un seuil donné, FCR : fréquences cumulées rétrogrades.

La première solution, la plus simple, consiste à calculer directement RGho en fonction de R à partir d'une régression linéaire qui unit le rapport de RGho à RGA, radiation globale extra-terrestre (sur surface horizontale à l'entrée de l'atmosphère) à la fraction d'insolation :

$$\frac{RGho}{RGA} = b + aR \quad \text{d'où} \quad RGho = RGA (b + aR) \quad (1)$$

C'est la formulation déjà retenue par L. TURC pour l'évaluation de ETP avec des coefficients a et b constants dans le temps et dans l'espace. Mais cette méthode est seulement valable pour fournir des moyennes décennales ou mensuelles de la radiation globale quotidienne.

La deuxième solution consiste à calculer, en fonction de RG d'une journée totalement ensoleillée ($R = 1$), RGho, d'une journée de fraction d'insolation quelconque ayant $R < 1$. Le flux d'énergie, RG_i, d'un instant donné d'un jour de total ensoleillement peut être calculée en $W \cdot m^{-2}$ à partir de plusieurs fonctions de $\sin h$: soit, en tenant compte seulement de la valeur moyenne de la radiation directe solaire extra-terrestre (à l'entrée de l'atmosphère).

$$RG_i = 1350 \times 0.70 \times \sin h \quad (2) \quad (\text{BERGER 1979}).$$

soit en faisant intervenir également le trouble atmosphérique T, selon la formule retenue par Ch. PERRIN de BRICHAMBAUT (1978).

$$RG_i = (1270 - 56 T) (\sin h)^{\frac{36-T}{33}} \quad (3), T \text{ compris entre 2 et 5.}$$

La valeur ainsi obtenue, encore appelée éclaircissement énergétique, est en fait la dérivée d'une énergie par rapport au temps, selon l'explication de Ch. PERRIN de BRICHAMBAUT ; il faut donc intégrer les valeurs RG_i, en fonction des variations de h au cours du périple diurne apparent du soleil, pour calculer la valeur moyenne de RG exprimée en $wh \cdot m^{-2}$ ou $J \cdot cm^{-2}$ d'un jour de ciel serein.

Les résultats - nécessitant une confirmation ultérieure par le traitement d'une série plus longue d'observations - d'une première comparaison entre valeurs estimées et valeurs mesurées les jours entièrement ensoleillés montrent que la formule (3) paraît la mieux adaptée à la région de Rennes en hiver. Du 1er au 22 décembre, on obtient par application de (2) des estimations comprises entre 632 et 569 $J \cdot cm^{-2}$, entre 598 et 533 par application de la formule (3) en adoptant un faible coefficient de trouble atmosphérique, $T = 2,5$, soit $RG_i = 1130 (\sin h)^{1,17}$, alors que les mesures réalisées les jours de grand beau temps (7,7 à 8,2 h de soleil) oscillent entre 608 et 504 $J \cdot cm^{-2}$ avec une moyenne de 555.

Reste ensuite à calculer RGho pour un jour de ciel nuageux. On peut alors estimer le rapport $\frac{RG \text{ ho}}{RG}$ fonction linéaire ou non de la fraction d'insolation R. L'on peut ainsi tirer RGho en retenant les équations générales proposées par Ch. PERRIN de BRICHAMBAUT (1978), ou les relations polynomiales mises au point par M.J.J MEJON et Col (1979) pour les stations méditerranéennes.

Enfin, ces recherches améliorent leur intérêt dans le domaine de l'application (habitat solaire) si elles débouchent sur l'évaluation de RG reçue par une surface réceptrice inclinée. Pour cette situation, la radiation globale ne peut être calculée directement. Elle est déduite de la somme de la radiation directe et de la radiation diffuse, qui peuvent être calculées à partir d'un raisonnement mathématique. Le développement de ce dernier dépasse les limites de cet exposé, mais les équations trigonométriques employées à cet effet sont présentées dans de nombreux travaux (GIVONI 1974, PERRIN de BRICHAMBAUT 1978).

CONCLUSION

En fait, la base de ces différentes estimations de la radiation globale et de ces composantes repose sur la connaissance précise de la durée d'insolation et de ses variations spatiales. Cette nécessité justifie les recherches statistiques concernant ce paramètre du climat et l'élaboration d'une cartographie détaillée de l'insolation journalière, étendue à l'ensemble de la France.

BIBLIOGRAPHIE

SOURCES : Mesures de la radiation globale (1968-1978) à Rennes St-Jacques.

BERGER X (1979) : Étude du climat en région niçoise en vue d'application à l'habitat solaire in R. LESTIENNE, édit. *Analyse statistique des processus météorologiques appliqués à l'énergie solaire*, CNRS, PIRDES, Paris, p 41-76.

BUDYKO M.I. (1974) : *Climate and Life*, Academic Press, New-York, 508 p.

GIVONI B. (1978) : *L'homme, l'architecture et le climat*, Moniteur, Paris, 460 p.

GARNIER M. (1978) : Durée et fraction d'insolation en France, *Monographie n° 105 de la Météo. Nationale*, Paris, 75 p.

LESTIENNE R. et Col. (1979) : *Analyse statistique des processus météorologiques appliquée à l'énergie solaire*, CNRS, PIRDES, Paris, 398 p.

- MARTIN S** (1981): L'informatique dans la réalisation du calendrier de probabilités. *N° spécial sur le climat de « Informatique et Sciences Humaines »*, n° 48 - 86 p
- MÉJON M.J., GOUSEBAILLE J., BOIS Ph. et VACHAUD G.** (1979) : Étude des liaisons entre l'irradiation solaire de Carpentras, Nice et Ajaccio, in *LESTIENNE R. Analyse ...* p. 105-143.
- PÉGUY Ch. P.** (1978) : Une géographie de demain ? L'énergie solaire, *Inf. Géo.*, mai-juin, Paris, 112-118.
- PERRIN de BRICHAMBAUT Ch.** (1975) : Estimation des ressources énergétiques solaires en France, *Cahiers de l'AFEDES*, juillet n° 1.
- PERRIN de BRICHAMBAUT** (1978) : Énergie solaire disponible au sol, *la Météo*. VIe série, déc. 5-45.
- PIRDES** (1980) : *Atlas des fréquences de l'insolation journalière dans le Midi Méditerranéen*. C.N.R.S. - Grenoble, 44 p