

RAYONNEMENT SOLAIRE ET DURÉE D'INSOLATION À TUNIS.

Ch. Riou*

INTRODUCTION

L'Institut National de la Météorologie de Tunisie possède près de Tunis, au bord de la mer, à Sidi Bou Saïd, une station de mesure du rayonnement solaire qui fonctionne depuis 1969.

Les appareils de mesure du rayonnement global sont des piles thermoélectriques (KIPP, EPPLEY), d'abord reliées à un enregistreur (MECI), puis, récemment, à un intégrateur.

Ces piles sont étalonnées périodiquement par comparaison avec un pyrrohéliomètre de LINKE-FEUSSNER, lui même vérifié à DAVOS. La durée d'insolation est mesurée par un héliographe de CAMPBELL-STOKES.

D'autres stations existent en Tunisie, formant un réseau relativement dense, elles sont équipées de pyranographes de ROBITSZCH ; ces appareils sont peu précis, et nous ne ferons état dans cette note que des mesures effectuées à Tunis.

Dans une première partie, nous déterminerons, à partir des mesures, les valeurs mensuelles du rayonnement solaire global par «beau temps», soit \bar{G}_{max} .

\bar{G} symbolisant les valeurs moyennes mensuelles du rayonnement solaire global et \bar{SS} celles de la durée d'insolation, nous comparerons ensuite les rapports \bar{G}/\bar{G}_{max} et \bar{SS}/\bar{SS}_{max} .

Dans une deuxième partie, nous utiliserons les données numériques fournies par Ch. Perrin de Brichambaut,

pour estimer théoriquement les valeurs du rayonnement solaire global par beau temps, soit \bar{G}_{cal} .

Ces valeurs ont été calculées par l'auteur, à partir de caractéristiques données de l'atmosphère (épaisseur réduite d'ozone, épaisseur d'eau condensable, trouble atmosphérique) elles peuvent être ensuite corrigées en fonction des conditions locales.

Dans notre calcul, seul le coefficient de trouble ne donnera pas lieu à des corrections, faute de données sur les valeurs qu'il prend à Tunis.

La comparaison entre les valeurs du rayonnement global par beau temps, déterminées expérimentalement et celles obtenues par calcul, fera apparaître des écarts qui pourront être attribués, aux imprécisions près, à l'influence du trouble atmosphérique.

DETERMINATION DES VALEURS MENSUELLES DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL PAR BEAU TEMPS, A PARTIR DES MESURES

Période de référence

Nous disposons d'une série de valeurs journalières du rayonnement global mesuré, allant de Février 1969 à Juillet 1978 soit 114 mois et près de 3500 jours.

* Maître de conférences à l'Institut National Agronomique de Tunis (Maître de Recherches principal à l'ORSTOM).

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39659

Cote : B

L'examen attentif des données conduit à en éliminer un certain nombre. Le critère d'élimination a été volontairement sévère : dès qu'une valeur journalière visiblement erronée apparaissait, l'ensemble du mois était écarté. Les erreurs proviennent d'une mauvaise transcription, éventuellement du dépouillement, parfois d'arrêts momentanés des appareils d'enregistrement non pris en compte . . . Une valeur journalière était déclarée erronée, quand il y avait desaccord évident entre la durée d'insolation et le rayonnement global (journée à forte insolation et très faible rayonnement, ou l'inverse), ou, quand elle était manifestement trop forte (proche ou supérieure au rayonnement extra-atmosphérique). La vérification de la durée d'insolation était aisée, car il existe près de Sidi Bou Saïd, une autre station, Tunis-Carthage, équipée également d'un héliographe.

A la suite de cette élimination qui a d'ailleurs montré que les mois écartés formaient des séquences, nous avons conservé 93 mois, soit 2829 jours.

Méthode utilisée

Plusieurs procédés, pour déterminer les valeurs de \bar{G}_{max} étaient a priori, possibles ; courbe enveloppe de toutes les mesures disposées en fonction du temps,

moyennes des n valeurs maximum de chacune des périodes successives considérées etc. . . Ces procédés ont l'inconvénient de privilégier quelques valeurs extrêmes, susceptibles d'être entachées d'erreurs.

La méthode utilisée ici a consisté à sélectionner tous les jours où la durée d'insolation était supérieure ou égale à $0,92 SS_{max}$.

Les valeurs de SS_{max} ont été calculées pour différentes latitudes par Perrin de Brichambaut, en tenant compte du seuil de sensibilité de l'héliographe CAMPBELL, qui ne réagit que pour des hauteurs du soleil supérieures à 3° environ.

Ces valeurs-seuils de SS , permettent de retenir un nombre de jours relativement important ; au dessus de ce seuil, on constate qu'il n'y a guère de correspondance entre SS et G , pour des journées groupées dans le temps. En effet, pendant ces journées à forte insolation, la faible nébulosité qui persiste, peut se produire à différentes heures de la journée, ce qui entraîne, selon le cas, des réductions différentes du rayonnement global.

On dispose ainsi, finalement, de 572 valeurs de G réparties comme suit :

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Nombre de jours retenus | 29 | 30 | 42 | 38 | 52 | 67 | 86 | 68 | 36 | 40 | 50 | 34 |

Nous appellerons G_1 , ces valeurs. Les moyennes mensuelles \bar{G}_1 sont identiques (moins de 1% d'écart) aux médianes. Les coefficients de variation sont différents

d'un mois à l'autre, comme l'indique le tableau ci-dessous, où \bar{G}_1 est exprimée en calories cm^{-2} jour $^{-1}$.

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| Moyenne \bar{G}_1 | 287 | 386 | 501 | 600 | 685 | 696 | 678 | 632 | 535 | 417 | 326 | 265 |
| Ecart-type | 27 | 35 | 35 | 28 | 25 | 20 | 27 | 36 | 30 | 38 | 37 | 20 |
| Coefficient de variation % | 9,4 | 8,7 | 7,0 | 4,7 | 3,6 | 2,9 | 3,9 | 5,7 | 5,6 | 9,1 | 11,3 | 7,3 |

La dispersion des résultats, outre différentes causes possibles, comme le moment au cours de la journée où le soleil est voilé (déjà signalé), à une origine facile à établir : entre le début et la fin d'un mois, le rayonnement solaire global maximum évolue de façon notable.

Le nombre relativement important de jours retenus chaque mois permet d'admettre, (et nous l'avons vérifié), que les valeurs s'échelonnent au hasard entre le début et la fin du mois, ce qui se manifeste dans les paramètres de dispersion.

Pour mettre en évidence cette dispersion «naturelle», nous avons calculé les rapports mensuels $(G_0^X - G_0^N)/2\bar{G}_0$, où pour un mois donné, \bar{G}_0 représente le rayonnement solaire moyen extra-atmosphérique, reçu sur une surface horizontale, G_0^X et G_0^N , les rayonnements extra-

atmosphériques maximum et minimum, confondus 10 mois sur 12, avec les rayonnements des jours extrêmes du mois.

Les valeurs sont les suivantes en %, à Tunis.

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|--|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|-----|
| $100 \frac{G_0^X - G_0^N}{2\bar{G}_0}$ | 11 | 13 | 12 | 7,6 | 3,8 | 0,6 | 2,9 | 6,5 | 10 | 14 | 12,5 | 3,4 |

On constate que la dispersion des valeurs G_1 peut être effectivement attribuée à une cause d'origine cosmique ; compte tenu de cette variation naturelle, on note cependant pour les mois de Novembre, Décembre et Janvier, une dispersion un peu plus forte.

La moyenne \bar{G}_1 d'un mois donné sera donc considérée comme le rayonnement solaire global moyen de ce mois, pour des journées à «forte insolation» un peu inférieure à l'insolation maximum ; ce rayonnement est donc un peu inférieur au rayonnement solaire global maximum \bar{G}_{max} . Admettons qu'il existe une relation linéaire entre

\bar{G}/\bar{G}_{max} et \bar{SS}/\bar{SS}_{max} , de la forme

$$\bar{G}/\bar{G}_{max} = a + b \rightarrow \bar{SS}/\bar{SS}_{max}$$

avec

$$a + b = 1.$$

Nous supposons que pour les 12 mois de l'année, nous avons :

$$\bar{G}_{max}/\bar{G}_1 \neq c.$$

avec

$$c \text{ un peu supérieur à } 1.$$

La relation précédente devient :

$$\bar{G}/c\bar{G}_1 = a + b \rightarrow \bar{SS}/\bar{SS}_{max}$$

soit :

$$\bar{G}/\bar{G}_1 = ac + bc \rightarrow \bar{SS}/\bar{SS}_{max}.$$

avec

$$ac + bc \neq c.$$

La détermination de l'équation de la régression de \bar{G}/\bar{G}_1 en \bar{SS}/\bar{SS}_{max} , nous fournira ac et bc , et du même coup \bar{G}_{max} , a et b .

L'étude de la régression a porté sur les 93 valeurs mensuelles retenues de \bar{G} et \bar{SS} .

La droite de régression a pour équation :

$$\bar{G}/\bar{G}_1 = 0,716 \bar{SS}/\bar{SS}_{max} + 0,323.$$

Le coefficient de corrélation est de 0,926.

La somme des coefficients ac et bc est donc de 1,039.

Les valeurs \bar{G}_{max} obtenues en calculant $1,039 \bar{G}_1$ sont alors les suivantes, en calories $cm^{-2} \text{ jour}^{-1}$.

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| \bar{G}_{max} | 298 | 401 | 521 | 623 | 712 | 723 | 704 | 657 | 556 | 433 | 339 | 275 |

La droite de régression devient :

$$\bar{G}/\bar{G}_{max} = 0,69 \bar{SS}/\bar{SS}_{max} + 0,31$$

$$r = 0,926$$

REMARQUES

Nous avons comparé les valeurs de \bar{G}_{max} ainsi obtenues

aux valeurs G_1 mesurées. Pour cela, nous avons sélectionné toutes les valeurs G_1 mesurées pendant la 2ème décade de chaque mois, pour éviter la dispersion naturelle due à l'évolution de G_1 au cours du mois ; pour chaque mois, nous avons alors retenu la valeur de G_1 égale ou dépassée 2 fois sur 10. Cette valeur que nous appellerons G_2 est indiquée page suivante :

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| G ₂ | 296 | 402 | 524 | 616 | 706 | 710 | 696 | 654 | 551 | 433 | 348 | 280 |

L'écart avec \bar{G}_{\max} est faible, il est inférieur à 1%, 7 fois sur 12, inférieur à 2%, 11 fois sur 12, et il est de 2,7% en Novembre.

ne semble guère ici discutable, bien que certains auteurs aient souligné qu'une relation non linéaire était mieux indiquée ; le tableau de correspondance qu'ils préconisent est d'ailleurs très proche des résultats rencontrés ici, comme il est montré ci-dessous.

La linéarité de la relation entre \bar{G}/\bar{G}_{\max} et \bar{SS}/\bar{SS}_{\max}

| \bar{SS}/\bar{SS}_{\max} | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
|--|------|------|------|-------|-------|------|-----|
| \bar{G}/\bar{G}_{\max} déterminé ici | 0,31 | 0,45 | 0,59 | 0,655 | 0,725 | 0,86 | 1,0 |
| \bar{G}/\bar{G}_{\max} préconisé. | 0,24 | 0,42 | 0,58 | 0,65 | 0,73 | 0,86 | 1,0 |

L'absence ici de valeurs \bar{SS}/\bar{SS}_{\max} inférieures à 0,4 (la plus faible valeur est de 0,42) peut d'ailleurs justifier l'approximation linéaire.

CALCUL DU RAYONNEMENT GLOBAL A PARTIR DE LA DUREE D'INSOLATION. COMPARAISON AVEC LES MESURES

A l'aide de la formule $\bar{G}/\bar{G}_{\max} = 0,69 \bar{SS}/\bar{SS}_{\max} + 0,31$, nous avons calculé \bar{G} pour les 93 mois retenus, et reporté sur la figure 1 ces valeurs en fonction des moyennes mensuelles mesurées. On voit que la précision du calcul est supérieure ou égale à 10%; dans 68 cas sur 93, elle est supérieure ou égale à 5%.

Les moyennes mensuelles interannuelles calculées et mesurées sont indiqués ci-dessous. L'écart est inférieur ou égal à 2,5% et il n'apparaît pas d'écart systématique lié à la saison.

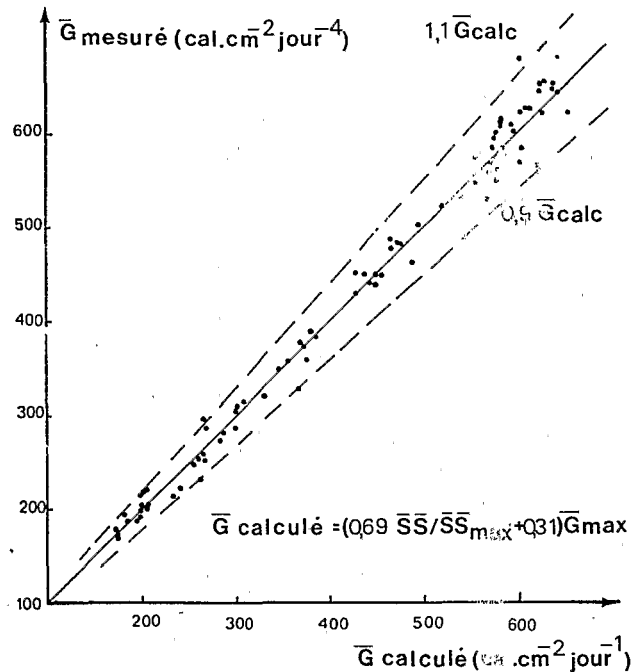


Fig. 1 : Comparaison des valeurs mensuelles mesurées et calculées du rayonnement global à Tunis (1969 à 1978)

Moyennes 1969 - 1978 Calories cm⁻²jour⁻¹

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------------------|------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| $\bar{G}_{\text{mesuré}}$ | 203 | 267 | 381 | 456 | 564 | 623 | 626 | 565 | 442 | 324 | 246 | 188 |
| $\bar{G}_{\text{calculé}}$ | 198 | 273 | 384 | 456 | 560 | 609 | 624 | 577 | 440 | 327 | 252 | 184 |
| Ecart % | -2,5 | 2,2 | 0,8 | 0 | -0,7 | -2,3 | -0,3 | 2,1 | -0,5 | 0,9 | 2,4 | -2,1 |

Afin de déceler éventuellement une variation systématique des données au cours de la période étudiée, la comparaison a porté également sur les totaux annuels successifs (généralement incomplets), elle est mentionnée ci-dessous en calories $\text{cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$.

| Année | Nbre de mois retenus | Rayonnement global | | Ecart % |
|-------|----------------------|--------------------------|---------------------------|---------|
| | | Moyenne annuelle mesurée | Moyenne annuelle calculée | |
| 1969 | 11 | (412) | (407) | - 1,2 |
| 1970 | 10 | (397) | (398) | + 0,3 |
| 1971 | 11 | (411) | (418) | + 1,7 |
| 1972 | 7 | (468) | (476) | + 1,7 |
| 1973 | 9 | (453) | (454) | + 0,2 |
| 1974 | 8 | (456) | (466) | + 2,2 |
| 1975 | 6 | (354) | (348) | - 1,7 |
| 1976 | 12 | (397) | 394 | - 0,8 |
| 1977 | 12 | 418 | 414 | - 1 |
| 1978 | 7 | (442) | (437) | - 1,1 |

Les écarts sont ici aussi peu importants, inférieurs à 2,5%; l'estimation théorique du rayonnement solaire global à partir de la durée d'insolation peut être considérée comme satisfaisante.

DETERMINATION THEORIQUE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL PAR BEAU TEMPS. COMPARAISON AVEC LES MESURES

Cette détermination est aisée, puisqu'on dispose d'un tableau de valeurs calculées par Ch. Perrin de Brichambaut, échelonnées de 10 en 10 degrés de latitude et qu'il suffit d'interpoler à la latitude de Tunis ($36^{\circ} 52$ Nord).

Il n'y a pas ici à faire intervenir de correction d'altitude, mais la quantité de vapeur d'eau de l'atmosphère varie sensiblement d'un mois à l'autre et nécessite une modification des valeurs précédentes.

Sur la base de la valeur mensuelle de la pression de vapeur d'eau au sol, et des corrections proposées par l'auteur cité plus haut, nous avons adopté le barème suivant :

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---------------------------------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Correction due à la vapeur d'eau en % | 0 | 0 | 0 | -1 | -2 | -3 | -3 | -4 | -3 | -3 | -1 | 0 |

Les valeurs du rayonnement solaire global par beau temps, \bar{G}_{cal} , ainsi obtenues, à partir de cette seule

correction sont alors, en calories $\text{cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$:

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| \bar{G}_{cal} | 289 | 393 | 528 | 653 | 730 | 761 | 742 | 657 | 555 | 427 | 322 | 265 |

L'écart entre \bar{G}_{max} et \bar{G}_{cal} peut provenir des imprécisions inhérentes aux procédés employés, des erreurs de mesure, et d'une erreur systématique due au «trouble atmosphérique» c'est-à-dire à la présence d'aérosols dans l'atmosphère.

Il n'y a pas lieu d'incriminer à ce jour, à Tunis, la pollution industrielle, mais il existe d'autres sources d'aérosols. Signalons tout d'abord la présence de particules salines dans l'atmosphère provenant de la mer ; quelques auteurs ont cherché à l'évaluer et lui ont même

attribuée une contribution non négligeable à la salure du sol, à la suite des pluies ou de la rosée. Une autre source d'aérosols est constituée par les vents de sable, relativement fréquents en Tunisie ; ces vents sont plus fréquents à Tunis, en été. Plus au Sud, ils se manifestent également au printemps, et c'est d'Octobre à Décembre qu'ils sont les moins nombreux.

A l'inverse, les pluies contribuent à diminuer la teneur en poussière de l'atmosphère, en les entraînant vers le sol, et augmentent ainsi la transparence de l'air.

Ces pluies, à Tunis, commencent en général en Septembre pour se terminer pratiquement en Mai.

$100 \frac{(\bar{G}_{\max} - \bar{G}_{\text{cal}})}{\bar{G}_{\text{cal}}}$, et indique donc «la correction de trouble» à apporter à \bar{G}_{cal} , dans l'hypothèse où il s'agit là, de la seule cause de l'écart constaté.

Le tableau qui suit, donne les valeurs du rapport

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|--|---|---|----|------|------|----|----|---|---|-----|---|---|
| $100 \frac{\bar{G}_{\max} - \bar{G}_{\text{cal}}}{\bar{G}_{\text{cal}}}$ | 3 | 2 | -1 | -4,5 | -2,5 | -5 | -5 | 0 | 0 | 1,5 | 5 | 4 |

Ces écarts sont faibles, inférieurs ou égaux à 5%. Ils présentent une variation presque continue au cours de l'année avec un minimum en Juin-Juillet et un maximum

en Novembre. Cette variation est tout à fait comparable à celle de la pluviosité, dont la valeur mensuelle moyenne entre 1970 et 1977 est indiquée ci-dessous.

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | TOTAL |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| Pluie moyenne (1970-1977) en mm/mois | 55,0 | 73,8 | 59,5 | 43,8 | 27,5 | 12,9 | 1,3 | 7,5 | 30,3 | 64,6 | 75,0 | 57,8 | 510 |

Cette remarquable transparence de l'atmosphère en hiver, que suggèrent ces chiffres, est confirmée par des mesures du rayonnement solaire direct effectuées par Gorczynski à Tunis de 1924 à 1927. Cet auteur a calculé à partir de mesures quotidiennes, les coefficients moyens de transmission de l'atmosphère pour chaque mois, et pour différentes masses atmosphérique traversées, après réduction à une même teneur en vapeur d'eau (pression de vapeur d'eau au sol de 15 mb). Pour une masse atmosphérique unité, le coefficient de transmission de l'atmosphère varie régulièrement en passant par un maximum en hiver (Novembre à Février) de 0,81 et un minimum en été (Juin à Septembre) de 0,65 ; le coefficient moyen étant de 0,75 (constante solaire = $1,94 \text{ calories cm}^{-2} \text{ minute}^{-1}$).

Perin de Brichambaut fournit, par ailleurs, un tableau de corrections à appliquer en fonction du trouble atmosphérique et de l'albédo du sol: La station de Sidi-Bou-saïd se trouve à la limite de la mer (faible albédo quand le soleil est haut, 0,05 en moyenne) et d'une zone continentale d'albédo variable (0,2 en hiver à 0,3 en été).

Les corrections vont de +7% à -11% pour un albédo nul et un trouble atmosphérique passant de 0 à 0,2 ; elles vont de +8% à -6% pour une même variation du trouble et un albédo de 0,2.

Les écarts rencontrés ici entre \bar{G}_{\max} et \bar{G}_{cal} , allant de

-5% à +5% sont donc tout à fait vraisemblables; la régularité de leur variation dans le temps, suggère que le trouble atmosphérique pourrait en être la cause.

CONCLUSION

L'estimation du rayonnement solaire global par une relation linéaire entre G/G_{\max} et SS/SS_{\max} , avec des valeurs de G_{\max} déterminées à partir des mesures, donne de bons résultats à Tunis, où existe une longue série d'observations. La précision sur les valeurs mensuelles interannuelles est de l'ordre de 2,5%.

La détermination des valeurs du rayonnement global par beau temps, à partir des données numériques de Perin de Brichambaut conduirait également à des résultats satisfaisants à condition d'effectuer une légère correction de trouble, allant de -5% à +5%. Cela semble confirmer des résultats anciens de Gorczynski mettant en évidence une transparence notable de l'atmosphère de Novembre à Janvier, alors que le trouble atmosphérique augmente en été.

Ainsi, pour les régions de Tunisie, où manquent encore des mesures du rayonnement solaire (en particulier dans le Nord), l'emploi de telles méthodes approchées s'avère justifié.

BIBLIOGRAPHIE

L. Gorczynski
Mesure du rayonnement solaire au service botanique de
Tunisie.
1928 — Tunis —

Institut de la Météorologie Nationale de Tunisie
Bulletins mensuels du Centre de Rayonnement de
Sidi Bou Saïd.

Ch. Perrin de Brichambaut
Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels.
1963 — Gauthier-Villars.

Ch. Perrin de Brichambaut et G. Lamboley.
Le rayonnement solaire au sol et ses mesures
1968. Cahiers de l'A.F.E.D.E.S. n° 1.

H. Soulmagnon, Constant, Scheur.
Recherches sur les chlorures apportés au sol par l'at-
mosphère.
Annales du Service Botanique et Agronomique de Tunisie.
Année 1933 — Tome X.

REMERCIEMENTS

Je tiens ici à remercier Monsieur Hallouche, Directeur
du Centre de Rayonnement solaire de Sidi Bou Saïd, qui
m'a communiqué avec beaucoup de cordialité tous les
renseignements nécessaires.

