

Courbes de fréquences cumulées de l'ensoleillement

L'analyse des données météorologiques nécessaires aux calculs, et notre expérience des simulations fines nous ont conduits à choisir une forme de présentation des données qui privilégie les phénomènes de seuils et de non linéarité : les **courbes de fréquences cumulées (CFC) de l'irradiation solaire** reçue par une surface réceptrice.

1 Obtention des courbes

Ces courbes (voir figure 1) sont obtenues de la manière suivante : on considère le fichier chronologique des relevés horaires correspondant à une période donnée (généralement le mois) : la puissance solaire E_s (en moyenne sur une heure) peut y prendre des valeurs allant de 0 W/m^2 à 1200 W/m^2 . On divise cet intervalle en M classes de largeur égale (25 W/m^2 si $M = 48$). On trie alors les relevés horaires, pour dresser le tableau des fréquences absolues $N(I)$, I variant de 1 à M , tableau qui donne le nombre d'heures de la période considérée où la puissance solaire a été comprise entre les bornes de la classe I .

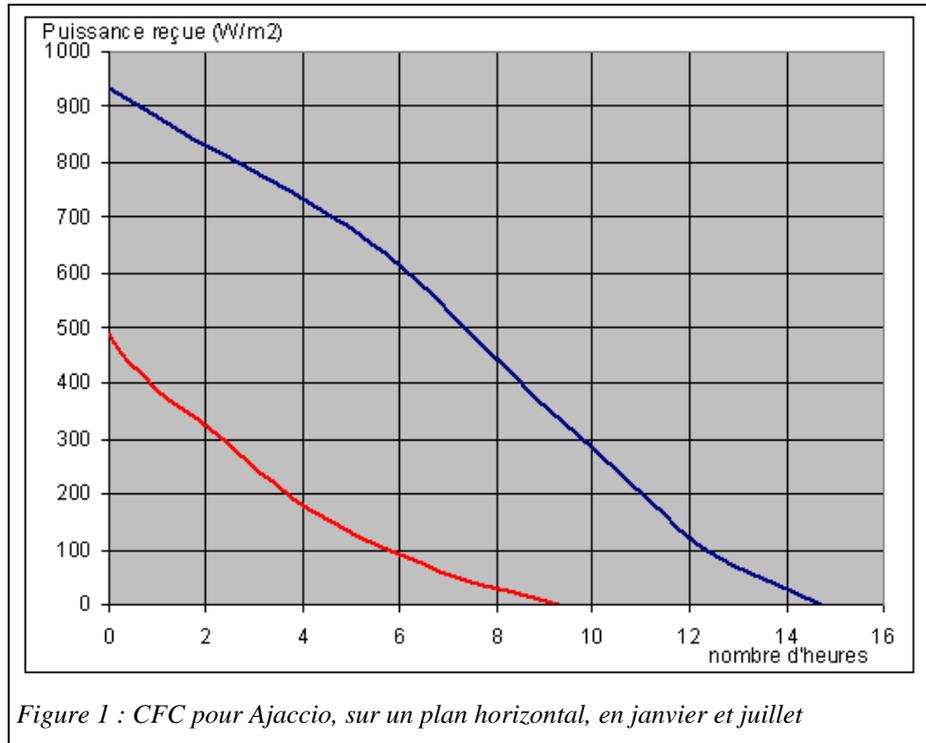


Figure 1 : CFC pour Ajaccio, sur un plan horizontal, en janvier et juillet

Njour étant le nombre de jours de la période considérée, on obtient ensuite le tableau $nh(I)$ des fréquences cumulées par l'expression :

$$nh(I) = \sum_{j=I}^M \frac{N(j)}{N_{\text{jour}}}$$

Il lui correspond le tableau $En(I)$ qui contient les valeurs des bornes inférieures des différentes classes.

Les courbes de fréquences cumulées se lisent donc de la manière suivante : on a en abscisse le nombre d'heures nh (ramené à une journée), pendant lesquelles la puissance solaire a dépassé la valeur En lue en ordonnée.

Par exemple, sur la figure 1, à Ajaccio en Juillet, le seuil de 600 W/m^2 a été dépassé en moyenne 6 heures par jour sur un plan horizontal. L'abscisse à l'origine correspond à la durée moyenne du jour pour la période considérée. L'aire délimitée par la courbe et les axes n'est autre que l'énergie moyenne journalière sur cette période.

Ces diagrammes peuvent être tracés, bien sûr, pour différentes orientations et inclinaisons de la surface réceptrice.

2 Lissage des courbes

Une fois la courbe des fréquences cumulées obtenue, il est possible de lisser l'histogramme par différentes familles de courbes, suivant l'utilisation que l'on veut en faire.

Sur la base des travaux réalisés dans les années 80 au Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, la représentation la meilleure de ces courbes est expliquée ci-après.

Les CFC sont exprimées par rapport à des variables réduites :

$x = nh/dj$, nombre d'heures rapporté à la durée du jour

$y = Es/ Es_{\max}$, ensoleillement reçu rapporté à l'ensoleillement maximal

$$x = f_0(y) + A_1 f_1(y) + A_2 f_2(y) + A_3 f_3(y) + A_4 f_4(y) + A_5 f_5(y) + A_6 f_6(y) + A_7 f_7(y) + A_8 f_8(y)$$

Les A_i , au nombre de 6 ou 8 selon la précision que l'on cherche, sont tabulés pour différents lieux et différentes inclinaisons.

Les f_i sont des polynômes orthogonaux définis comme suit :

$$f_0 = (1-y)$$

$$f_1 = y (1-y) 30^{0,5}$$

$$f_2 = y (1-y) (-1 + 2y) 210^{0,5}$$

$$f_3 = y (1-y) (9 - 42y + 42y^2) 10^{0,5}$$

$$f_4 = y (1-y) (-1 + 8y - 18y^2 + 12y^3) 2310^{0,5}$$

$$f_5 = y (1-y) (2 - 24y + 90y^2 - 132y^3 + 66y^4) 1365^{0,5}$$

$$f_6 = y (1-y) (-18 + 300y - 1650y^2 + 3960y^3 - 4290y^4 + 1716y^5) 35^{0,5}$$

$$f_7 = y (1-y) (6 - 132y + 990y^2 - 3432y^3 + 6006y^4 - 5148y^5 + 1716y^6) 595^{0,5}$$

$$f_8 = y(1-y)(-6+168y-1638y^2+7644y^3-19110y^4+26208y^5-18564y^6+5304y^7) 1045^{0,5}$$

H étant l'énergie journalière moyenne reçue, la surface sous-tendue par la CFC vaut :

$$v = \frac{H}{dj Es_{\max}} = (0,5 + A_1 (5/6)^{0,5} + A_3 0,1^{0,5} + A_5 (13/420)^{0,5} + A_7 (17/1260)^{0,5}) dj Es_{\max}$$

Il suffit donc de connaître dj , Es_{\max} , H et les valeurs des 6 A_i pour reconstituer une CFC.

3 Estimation des CFC à partir de formules empiriques

Lorsque l'on ne dispose pas des valeurs des coefficients A_i qui entrent en jeu dans les expressions donnant les CFC, il est possible de reconstituer ces courbes à partir de corrélations empiriques reliant les A_i à v :

$$A_1 = -0,42297 + 0,16183 v + 2,48691 v^2 - 2,23697 v^3$$

$$A_2 = 0,34623 - 1,47635v + 1,83694 v^2$$

$$A_3 = -0,2789 + 1,91022 v - 4,77807 v^2 + 4,11137 v^3$$

$$A_4 = 0,18865 - 1,36236 v + 3,37632 v^2 - 2,75771 v^3$$

$$A_5 = -0,11845 + 0,98872 v - 2,77182 v^2 + 2,53303 v^3$$

$$A_6 = 0,06968 - 0,60008 v + 1,73839 v^2 - 1,65775 v^3$$

La précision d'une telle estimation étant limitée, 6 polynômes suffisent.

On peut trouver dans la littérature spécialisée sur la climatologie solaire des corrélations diverses permettant d'estimer H et Es_{\max} , et la durée du jour est donnée par : $dj = 1/w \text{ Arcos}(-\text{tg } \varphi/\text{tg } D)$, avec $w = 7,5$ si les angles sont exprimés en $^\circ$, et $w = 2\pi/24$ s'ils sont exprimés en radians.

4 Interpolations sur l'inclinaison

Les valeurs des paramètres des CFC sont données pour 0°, 30°, 45°, 60° et 90°. Pour une inclinaison différente, une interpolation linéaire suffit pour les A_i . Pour H et $E_{s_{\max}}$, il est recommandé d'utiliser un polynôme de degré 4 (mêmes coefficients pour H et $E_{s_{\max}}$) :

$$Y_0 = H(45)$$

$$Y_1 = H(90) - H(0)$$

$$Y_2 = H(90) + H(0)$$

$$Y_3 = H(60) - H(30)$$

$$Y_4 = H(60) + H(30)$$

$$a = Y_0$$

$$b = \frac{27 Y_3 - Y_1}{48}$$

$$d = \frac{Y_1 - 3 Y_3}{48}$$

$$e = \frac{16 Y_0 + Y_2 - 9 Y_4}{144}$$

$$c = Y_4 / 2 - a - e$$

$$z = \frac{s - 45}{15}$$

s , inclinaison en degrés du plan considéré

$$H(s) = a + b z + c z^2 + d z^3 + e z^4$$

BIBLIOGRAPHIE

BOURGES B., Final Scientific Report, Contract EN3S-0111- Armines, CEE, janvier 1990.

BOURGES B., European simplified methods for active solar system design, ISBN: 0792317165, Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1991.

ESRA: European Solar Radiation Atlas, 2000. Fourth edition, includ. CD-ROM. Edited by J. Greif, K. Scharmer. Scientific advisors: R. Dogniaux, J. K. Page. Authors : L. Wald, M. Albuisson, G. Czeplak, B. Bourges, R. Aguiar, H. Lund, A. Joukoff, U. Terzenbach, H. G. Beyer, E. P. Borisenko. Published for the Commission of the European Communities by Presses de l'Ecole, Ecole des Mines de Paris, France, France

GICOUEL R., "Présentation statistique des données relatives à l'ensoleillement". Revue Internationale d'Héliotechnique - 1er semestre 1977.

GICQUEL R., "Cumulated frequencies Diagrams", Energie Solaire : conversion et applications. CNRS 1977 (Cargèse).

PERROT M., "La Houille d'Or". Fayard 1963.