

Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire

A. Mefti et M.Y. Bouroubi

Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

Résumé – L'objet de ce travail est la présentation d'une approche pour l'estimation de l'irradiation globale, par ciel clair et par ciel moyen, applicable à l'ensemble du territoire algérien. Approche qui tient compte de la nature du réseau de mesures algérien, caractérisé par une faible densité de stations radiométriques (7 stations) réparties sur une superficie d'environ 2 500 000 km². L'application de l'analyse en composantes principales à la fraction d'insolation mesurée par 54 stations du réseau de l'Office National de la Météorologie a permis de définir cinq zones énergétiques homogène. Une relation de type Angstrom reliant l'irradiation solaire globale mensuelle à la fraction d'insolation a été établie pour chacune des zones Son extrapolation à l'ensemble du réseau est présentée sous forme de cartes. Le rayonnement par ciel clair est modélisé, pour cinq stations radiométriques, en fonction de la distance zénithale illustrant la distribution à grande échelle de l'irradiation globale mensuelle.

Abstract - The object of this work is the presentation of an approach for the estimate of global irradiation, by clear sky and average sky, applicable to the whole of the Algerian territory. Approach which takes account of the nature of the Algerian network of measurements, characterised by a low density of radiometric stations (7 stations) distributed on a surface of approximately 2 500 000 km². The application of the analysis in principal components to the fraction of insolation measured by 54 stations of the network of the National office of Meteorology made it possible to define five energy zones homogeneous. A relation of the Angström type connecting the monthly global solar irradiation to the fraction of insolation was established for each zone. Its extrapolation to the whole of the network is presented in the form of charts. The radiation by clear sky is modelled, for five radiometric stations, according to the zenith distance illustrating the distribution on a large scale of monthly global irradiation.

Mots clés: Energie solaire - Météorologie - Irradiation solaire - Durée d'insolation - Analyse en composantes principales - Cartographie.

1. INTRODUCTION

L'Algérie de par sa situation géographique (située entre le 19^{ème} et le 38^{ème} parallèle nord), constitue sur le globe terrestre une zone particulièrement bien ensoleillée. Aussi les moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600 h/an dans le Nord à 3500 h/an dans le Sud [1].

Eu égard à la superficie du territoire algérien (2.500.000 km²) le réseau de mesure de paramètres radiométriques est peu dense. En effet, sur les cinquante quatre stations (Fig. 1) qui mesurent la durée d'insolation, seules sept assurent la mesure des composantes globale et diffuse du rayonnement solaire reçu sur plan horizontal. Ainsi, des modèles ou des techniques de reconstitution du rayonnement solaire à partir de la durée d'insolation ou autres paramètres météorologiques sont utilisés [2, 3].

Dans cette étude, qui constitue une partie d'un programme global d'étude du gisement solaire algérien, on se propose d'une part, d'analyser la structure spatiale du champ insolation constitué de 54 stations du réseau ONM, et d'autre part d'établir des modèles permettant l'estimation des irradiances globales par ciel clair et par ciel moyen.

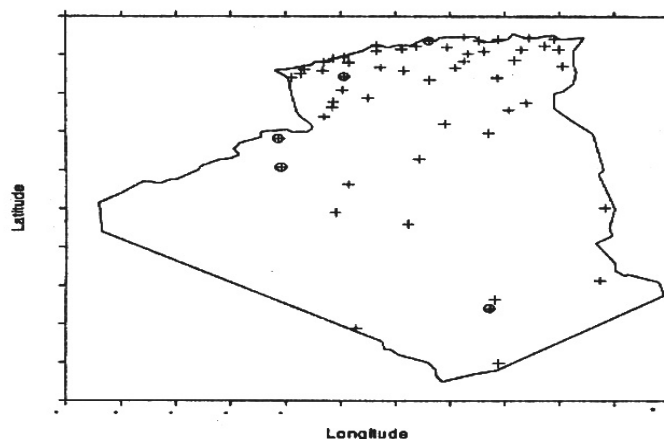


Fig. 1: les stations du réseau météorologique et radiométrique algérien

Sur la base de données de cinq stations radiométriques (Tableau 1), nous avons déterminé le rayonnement solaire par beau temps reçu sur plan horizontal en établissant une relation empirique entre cette dernière et la distance zénithale, relation extrapolable à tout réseau de mesures. Dans la deuxième partie, nous avons étudié la variation spatiale du champs insolation en appliquant l'Analyse en Composantes Principales dans le but d'identifier des zones homogènes. Pour chacune des zones ainsi définies, nous avons établi une relation de type Angström reliant l'irradiation solaire globale reçue par ciel moyen à l'insolation. Son extrapolation à l'ensemble du réseau est présentée sous forme de cartes (Fig. 6).

Tableau 1: Liste nominative des stations du réseau météorologique et radiométrique national

| | | | | | | | |
|----|----------------|----|--------------------|----|------------|----|------------------|
| 1 | Béni Saf | 15 | Bouira | 29 | Batna | 43 | Ouargla |
| 2 | Oran | 16 | Béjaïa | 30 | Souk Ahras | 44 | El Goléa |
| 3 | Arzew | 17 | Jijel | 31 | Tébessa | 45 | Timimoun |
| 4 | Mosta. | 18 | Skikda | 32 | Saïda* | 46 | Beni .Abbès* |
| 5 | Maghnia | 19 | Annaba | 33 | Kheider | 47 | Adrar |
| 6 | Tlemcen | 20 | Guelma | 34 | Bayadh | 48 | In Salah |
| 7 | Mascara | 21 | Tiaret | 35 | Mecheria | 49 | In Aménas |
| 8 | Sidi Bel Abbès | 22 | Djelfa | 36 | Ain Sefra | 50 | Djanet |
| 9 | Chlef | 23 | K.Chelala | 37 | Naâma | 51 | Tam.* |
| 10 | Ténès | 24 | M'sila | 38 | Béchar* | 52 | Assekrem |
| 11 | Miliana | 25 | Bousaâda | 39 | Biskra | 53 | B. Badji Mokhtar |
| 12 | Médéa | 26 | Bordj Bou Arreridj | 40 | Ghardaïa | 54 | In Guezzem |
| 13 | Alger* | 27 | Sétif | 41 | Tougourt | | |
| 14 | Tizi Ouzou | 28 | Const. | 42 | El Oued | | |

* Réseau radiométrique

2. ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR ‘BEAU-TEMPS’

A partir d'un fichier de données d'irradiation solaire globale journalière, nous avons extrait l'irradiation globale maximale reçue pendant chaque décade sur la période 1972-1982. L'ajustement du nuage de points formé par la moyenne mensuelle de l'irradiation globale reçue par ciel clair "Ghmax" et la distance zénithale "lat-dec" donne un coefficient de corrélation de l'ordre de 97 %.

En figure 2 est présenté, pour chaque site, le nuage de points formé par le couple (‘Ghmax’, ‘lat-dec’).

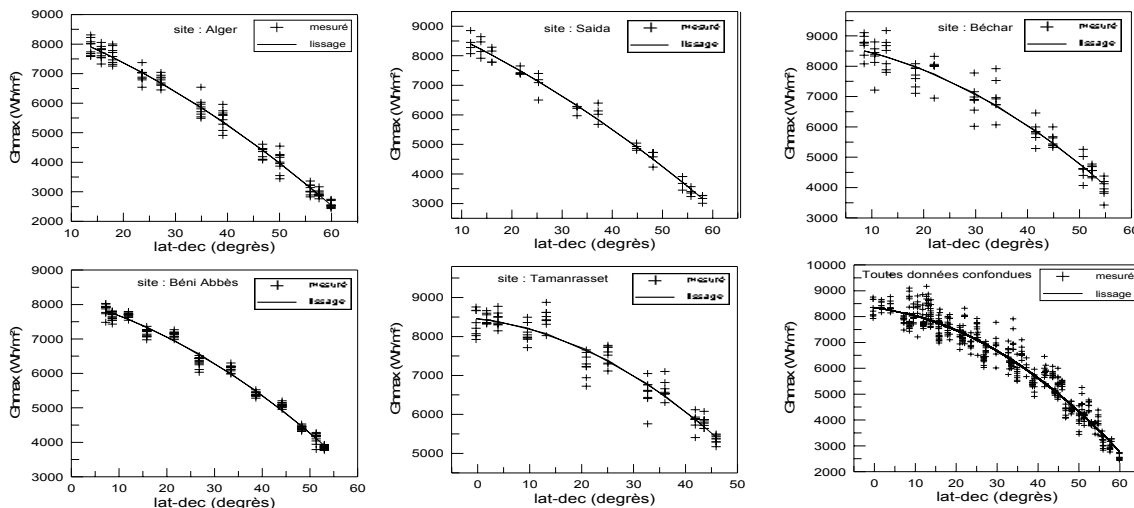


Fig. 2: Validation de la relation entre ‘Gh_{max}’ et ‘lat-dec’ pour les 5 sites étudiés

L'ajustement de ce nuage de points par un polynôme d'ordre 2 est donné par l'expression suivante :

$$Gh_{\max} = a (\text{lat} - \text{dec})^2 + b (\text{lat} - \text{dec}) + c \quad (1)$$

Les coefficients a, b et c sont donnés pour chaque site par le tableau 2. Etant donné que ces coefficients sont assez proches pour toutes les stations nous proposons des valeurs valables pour tous les sites. La latitude 'lat' et la déclinaison 'dec' sont exprimées en degrés.

Tableau 2: Coefficients du polynôme d'ordre 2

| Site | a | b | c |
|----------------------|------|-------|------|
| Alger | -0.8 | -58 | 8852 |
| Saida | -0.6 | -70.4 | 9309 |
| Béchar | -1.2 | -19.8 | 8759 |
| Béni Abbès | -0.8 | -36.5 | 8123 |
| Tamanrasset | -1.1 | -13.8 | 8453 |
| Tous sites confondus | -1.3 | -16.6 | 8337 |

3. STRUCTURE SPATIALE DE LA FRACTION D'INSOLATION

Nous avons étudié la fraction d'insolation qui est le rapport entre l'insolation mesurée SS et l'insolation potentielle SS₀, soit $\sigma = SS/SS_0$, à l'aide de la technique d'Analyse en Composantes Principales, méthode d'analyse de données qui fournit des représentations graphiques de vastes ensembles de valeurs numériques [4, 5]. Nous avons appliqué l'Analyse en Composantes Principales aux valeurs mensuelles des fractions d'insolation mesurées sur la période 92-96 par les 54 stations du réseau. On constitue donc une matrice X 54 individus – 60 variables qui sont respectivement les stations et les moyennes mensuelles de la fraction d'insolation correspondante. Le calcul des axes principaux s'effectue en évaluant la matrice des corrélations C de X pour laquelle on extrait, ensuite les valeurs propres λ_i .

Le tableau 3 donne les valeurs propres des premières composantes ainsi que le pourcentage de variance expliquée ($IE_i = \lambda_i / \sum \lambda_j$) par chacune d'elles. On remarque que les trois premières composantes sont les plus significatives. Elles expliquent plus de 68 % de la variance totale. Les 30 % restants sont réparties entre les 57 composantes restantes.

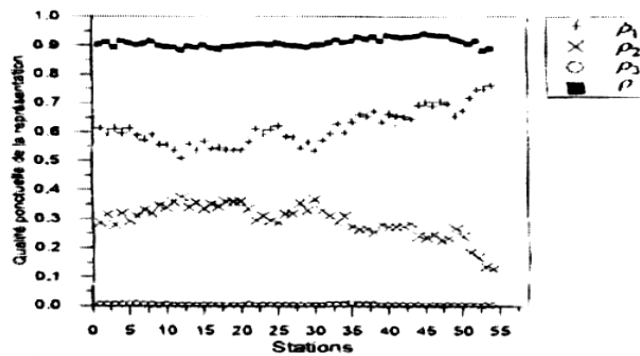


Fig. 3: Qualité ponctuelle de la représentation

Tableau 3: Valeurs propres et variance expliquée par les composantes principales

| Ordre de la composante principale | Valeur propre | Variance expliquée par la composante (%) | Variance expliquée par l'ensemble des composantes (%) |
|-----------------------------------|---------------|--|---|
| 1 | 26.50 | 44.15 | 44.15 |
| 2 | 9.88 | 16.46 | 60.61 |
| 3 | 4.80 | 8.00 | 68.61 |
| 4 | 2.61 | 4.36 | 72.97 |
| 5 | 2.01 | 3.35 | 76.32 |
| 6 | 1.97 | 3.30 | 79.61 |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| 60 | 0 | 0 | 100 |

3.1 Les axes principaux

Ce sont les vecteurs propres associés aux trois plus grandes valeurs propres λ_1, λ_2 et λ_3 que l'on s'est proposé de garder, soit v_1, v_2 et v_3 . Le nouveau tableau de variables est donc : $Y = [y_1, y_2, y_3] = [v_1, v_2, v_3]X$, où Y représente le nouveau tableau d'individus - nouvelles variables. Les coordonnées des individus dans le nouveau repère formé les axes principaux sont respectivement y_1, y_2, y_3 .

3.2 Qualité ponctuelle de la représentation

La qualité ponctuelle de la représentation " ρ " est la projection des vecteurs individus sur les axes principaux. La figure 3 illustre la qualité ponctuelle de la représentation des 54 individus sur les trois premiers axes principaux (respectivement ρ_1, ρ_2 et ρ_3). On a représenté également sur la figure 3, la qualité ponctuelle du premier plan principal constitué des deux premiers axes principaux : $\rho = \rho_1 + \rho_2$.

On constate que la projection des vecteurs individus sur le premier axe est élevée, elle est supérieure à 0.5 pour tous les individus. La projection des individus sur le second axe est relativement élevée atteignant la valeur 0.4 pour certains sites. L'association des deux premiers axes donne une qualité ponctuelle $\rho_i = \rho_{i1} + \rho_{i2}$ supérieure à 0.9 pour toutes les stations. Ceci se traduit par une très bonne qualité ponctuelle de représentation dans le plan constitué par le premier et le second axe. Par contre, la projection ρ_3 des individus sur le troisième axe est négligeable pour toutes les stations. Les vecteurs individus sont donc diagonaux au troisième axe principal même si celui-ci représente 8 % de l'inertie totale. On en déduit donc qu'à l'exception des deux premières composantes principales, le reste des composantes représentent éventuellement le bruit contenu dans les variables [2, 6].

3.3 Description des individus

L'utilisation de l'ACP dans notre contexte est l'analyse descriptive d'un phénomène spatial dans le but d'extraire une typologie permettant un regroupement de stations ayant des caractéristiques similaires. L'information contenue dans 60 variables est exprimée par deux composantes y_1 et y_2 uniquement. Ainsi la première composante qui représente la variation commune (effet de taille) pour toutes les variables traduit l'opposition Nord-Sud. La deuxième composante caractérise les régimes saisonniers [6]. La cartographie des deux premières composantes nous permet de proposer la classification en cinq zones du réseau étudié (Fig. 4a et 4b). Connaissant le sens physique des deux composantes principales retenues on peut décrire le régimes radiatifs de ces zones. Ainsi :

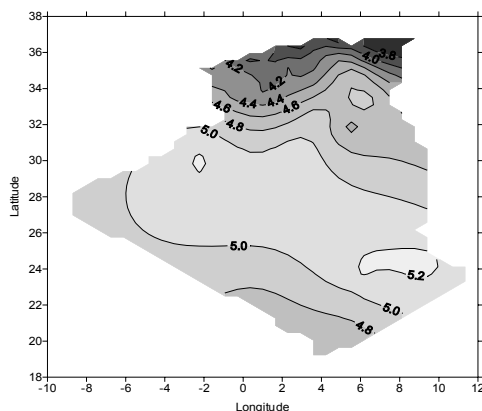


Fig. 4a: Cartographie de la 1^{ère} composante

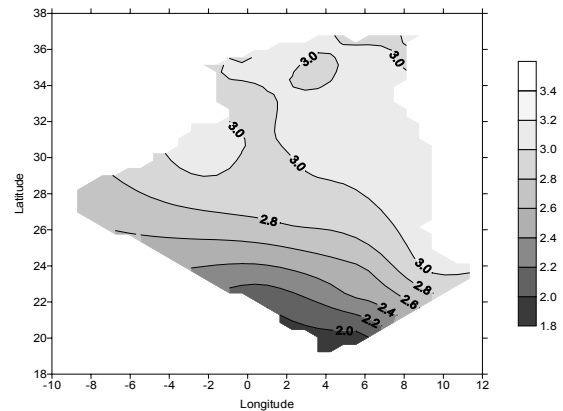


Fig. 4b: Cartographie de la 2^{ème} composante

La zone 1 : s'étend sur les régions côtières de l'Est et du centre. Elle est caractérisée par une fraction d'insolation faible dont la répartition est très différente durant l'année entre les mois d'hiver et les mois d'été.

La zone 2 : contient les régions côtières de l'Ouest et l'ensemble des hauts plateaux. Elle est caractérisée par une fraction d'insolation faible mais un peu plus élevée que celle de la zone 1. La répartition est très différente durant l'année. Comme pour la zone 1, Les mois d'été sont beaucoup plus ensoleillés que les mois d'hiver.

La zone 3 : constitue le nord du Sahara, elle est caractérisée par une fraction d'insolation élevée et répartie différemment le long de l'année.

La zone 4 : cette zone, qui représente le centre du Sahara, est caractérisée par une fraction d'insolation très élevée, répartie presque uniformément durant l'année.

La zone 5 : c'est le Hoggar et le Tassili. L'insolation totale y est moins élevée et l'effet des saisons est accentué. et les mois d'hiver possèdent une fraction d'insolation plus élevée que les mois d'été.

4. ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR CIEL MOYEN

La durée d'insolation est le paramètre climatique le mieux connu expérimentalement. En effet, partout dans le monde, les stations météorologiques mesurent la durée d'insolation depuis de nombreuses années. Très tôt on a cherché à relier la fraction d'insolation au rayonnement global reçu sur plan horizontal [1,2]. Ces relations permettent de reconstituer du rayonnement solaire en un lieu où seule l'insolation est connue.

La relation que nous avons utilisé est de type Angström :

$$Gh/Gh_{max} = a \cdot \sigma + b \tag{2}$$

où Gh_{max} est le rayonnement solaire par ciel clair.

Le tableau 4 donne les résultats de l'ajustement pour chaque site représentatif de chaque zone et ses limites géographiques. On constate une forte variabilité d'une station à une autre des coefficient a et b. Celle-ci traduit les caractéristiques climatiques de chaque zone. En figure 5 où est représenté le nuage de points formé par le couple $(Gh/Gh_{max}, SS/SS_0)$, on note une forte concentration du nuage de points pour les valeurs élevées de la fraction d'insolation pour les stations situées dans les zones 3 et 4 .

Tableau 4: Coefficients de l'ajustement de type Angström

| Site | a | b | Validité |
|-------------|------|------|---------------|
| Alger | 0.49 | 0.45 | Lat>35.5° |
| Saida | 0.41 | 0.55 | 33°<Lat<35.5° |
| Béchar | 0.38 | 0.6 | 31°<Lat<33° |
| Béni Abbès | 0.33 | 0.65 | 23°<Lat<31° |
| Tamanrasset | 0.25 | 0.7 | Lat<23° |

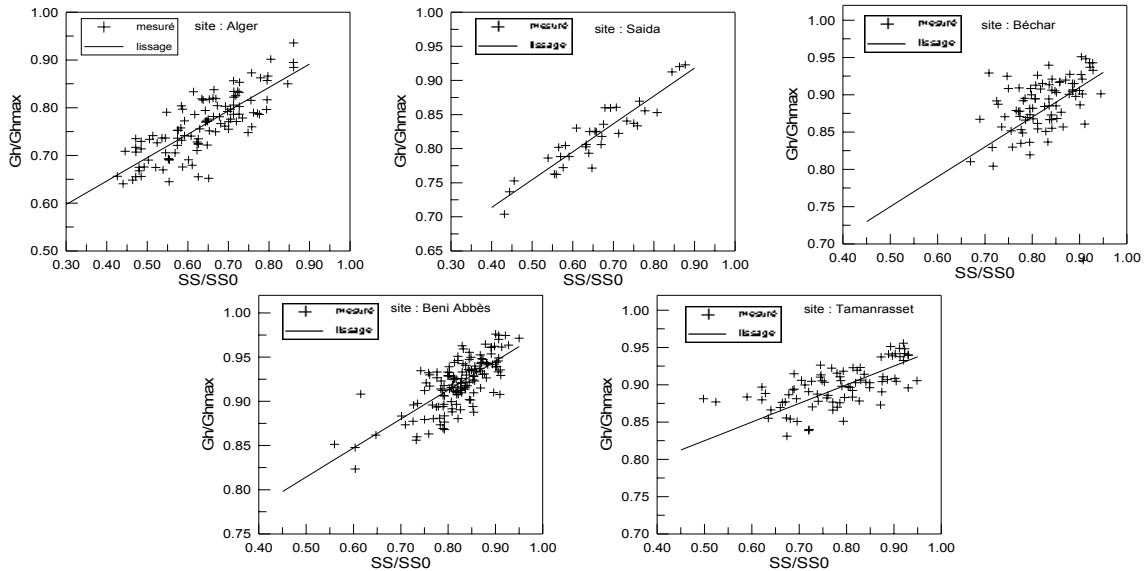


Fig. 5:Corrélation entre Gh/Gh_{max} et SS/SS_0 pour les 5 sites étudiés

Sur les cartes illustrant la distribution à grande échelle (Fig. 6) de l'irradiation solaire globale, on constate que:

- Les courbes d'isoraies des cartes saisonnières d'hiver, automne, et printemps suivent le tracé des parallèles dans la région nord. La valeur minimale (2.8 kWh/m²/jour) de l'irradiation solaire globale moyenne est observée dans la zone 1.
- En hiver comme en automne, les valeurs observées dans la zone délimitant le Hoggar et Tassili sont plus élevées que celles obtenues au centre du Sahara.

- En été, la distribution est homogène dans la région nord et dans le centre du Sahara. Sur l'extrême Sud (zone 5), les isorayonnements, tout en décroissant, suivent les parallèles. Cette dernière remarque est valable pour le printemps, mais avec une décroissance moins accentuée. La valeur maximale est observée en été à l'Est du Sahara et elle est de l'ordre de 8.4 kWh/m²/jour.

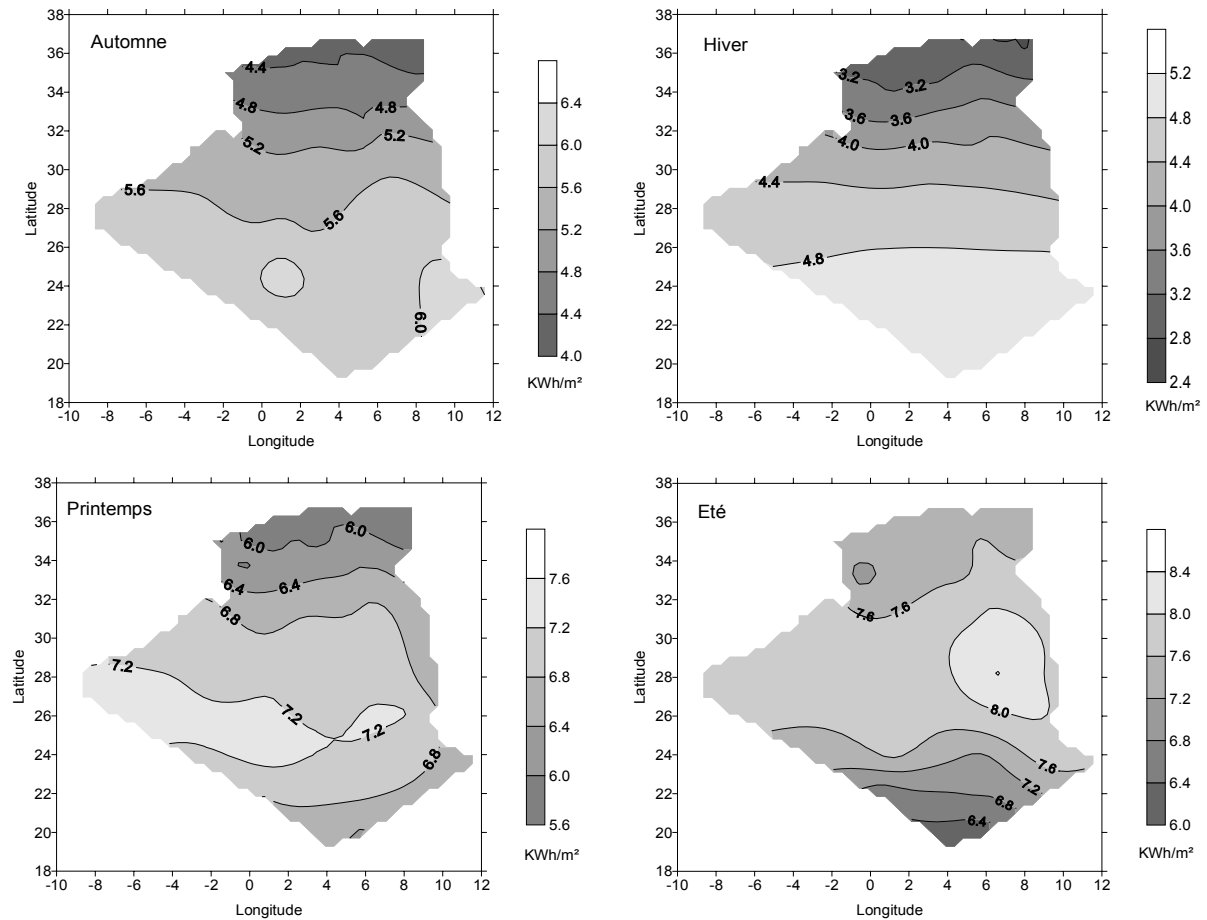


Fig. 6: Cartographie de l'irradiation globale simulée par ciel moyen pour les quatre saisons

5. CONCLUSION

Cette étude a montré que le réseau de mesures d'insolation peut être décomposé en cinq zones homogènes. Les deux premières zones couvrent respectivement les régions côtières du centre et de l'est, celles de l'ouest et des Hauts plateaux. Le nord du Sahara et le centre du Sahara constituent respectivement la troisième et la quatrième zone. Le Hoggar et le Tassili sont représentés par la cinquième zone. Ces différentes zones sont caractérisées plusieurs régimes saisonniers du nord au sud. Ceci est inhérent à la nature même du réseau, à forte étendue géographique, effet de relief et influence climatique. Au fur et à mesure que l'on descend vers le sud, le régime annuel diminue et des régimes saisonniers apparaissent [7].

Aussi, à partir de l'analyse globale des cartes, on constate que le potentiel énergétique de l'Algérie est très important. En moyenne annuelle, il dépasse les 5 kWh/m²/jour au nord pour atteindre les 7 kWh/m²/jour.

REFERENCES

- [1] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Tomes 1, 2 et 3. Office des Publications Universitaires, 1987.
- [2] A. Mefi, 'Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire', Rapport technique, CDER, 1992.
- [3] C. Perrin de Brichambaut et C. Vauge, 'Le Gisement Solaire', Technique et Documentation, 1984.
- [4] P. Bertelier, 'Analyse des Données Multidimensionnelles', Presses Universitaires de France.
- [5] B. Flytry, 'Multivariate Statistics, a Practical Approach', Chapman & Hall, New York.
- [6] M.Y. Bouroubi, 'Modélisation du Rayonnement Solaire à l'Echelle Journalière et Horaire', Thèse de Magister, USTHB, 1998.
- [7] A. Mefi, F. Youcef Ettoumi, M.Y. Bouroubi, M. Haddadi et A. Adane, 'Caractérisation des données d'insolation mensuelle en Algérie', 2^{ème} séminaire de Génie Electrique, SNGE'99, Biskra, Novembre 1999.