

Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre)

Maigargué Dankassoua¹, Souley Madougou¹, Almoustapha Aboubacar² et Andre Ibrahim Foulani¹

¹ Laboratoire d'Energétique, d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Automatique et d'Informatique Industrielle, Université Abdou Moumouni, B.P. 10963, Niamey, Niger

² Laboratoire Climat-Environnement et Matériaux-Rayonnement
Université Abdou Moumouni, B.P. 10662, Niamey, Niger

(reçu le 10 Février 2017 - accepté le 30 Mars 2017)

Résumé - Le soleil rayonne sur la terre une puissance de $1.6 \cdot 10^{18}$ kWh/m²/an dans toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière. C'est une source d'énergie renouvelable inépuisable à l'échelle humaine. Aujourd'hui, cette énergie renouvelable suscite une attention particulière au regard des enjeux de la politique énergétique. Elle constitue une réponse capitale au besoin énergétique mondial dans le contexte du réchauffement climatique. Pour un site donné, la connaissance du potentiel énergétique solaire est un paramètre capital pour le développement des recherches scientifiques, technologiques et économiques des systèmes solaires photovoltaïques, mais aussi pour plusieurs autres applications (thermiques, biomasse). Dans ce travail, à l'aide d'un pyranomètre CMP3, nous avons effectué des mesures du rayonnement solaire global au cours de la période de Mai à Octobre 2013 sur le site de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger) pour évaluer le potentiel du site. L'utilisation aussi de modèles validés d'estimation du rayonnement solaire, nous a permis de calculer ce potentiel. Il ressort de l'analyse des résultats une bonne corrélation entre les résultats mesurés et ceux calculés des modèles. Il se dégage aussi que la région de Niamey dispose d'une bonne insolation.

Abstract - The sun shines on the earth a power of $1.6 \cdot 10^{18}$ kWh/m²/year in all of the spectrum of light wavelengths. It is a renewable energy source inexhaustible on a human scale. Today, this renewable energy is special attention given the challenges of energy policy. It is a major response to the global energy needs in the context of global warming. For a given site, knowledge of the solar energy potential is a critical parameter for the development of scientific, technological and economic research of solar photovoltaic systems but also in many other applications (thermal, biomass). In this work, using a pyranometer CMP3, we performed measurements of global solar radiation during the period of May to October 2013, on the site of the Faculty of Sciences and Technique of the University Abdou Moumouni of Niamey (Niger) to evaluate the potential of the site. The use of also validated models for estimating solar radiation, has allowed us to calculate this potential. It appears from the analysis of the results a good correlation between the measured results and those calculated with the models. It also implies that Niamey area has a good insolation.

Mots clés: Rayonnement solaire global - Insolation - Energie solaire - Potentiel du rayonnement solaire - Energie solaire photovoltaïque.

1. INTRODUCTION

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre moyen atteint 1 392 684 km. Il est situé à une distance moyenne de 149.597×10^6 km de la terre. Composé de matières gazeuses, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, le soleil est le siège des réactions thermonucléaires permanentes. Sa température de cœur atteint 1.4×10^7 °C [1].

La terre intercepte une infime partie de l'énergie rayonnée par le soleil: environ 1.6×10^{18} kWh/an (soit une puissance moyenne de 160×10^{10} GWh/an). Une partie de ce

capital est absorbée par le sol, puis réémise (un peu moins de la moitié), afin de maintenir une température au sol acceptable pour l'Homme.

En admettant qu'on puisse 'récupérer' 1 % de ces 1.6×10^{18} kWh, ceci représenterait plusieurs dizaines de fois la consommation énergétique mondiale. On voit donc l'énorme potentiel que représente 'l'énergie solaire' [2].

Une étude de la NASA conduite entre 1983 et 2005 place la région d'Agadem dans le Sahara nigérien en 2^{ème} position des régions les plus ensoleillées du globe avec un ensoleillement moyen annuel de 6.92 kWh/m²/j [3].

Pour un site donné, la connaissance du potentiel énergétique solaire est un paramètre capital pour le développement des recherches scientifiques, technologiques et économiques des systèmes solaires photovoltaïques, mais aussi pour plusieurs autres applications (thermiques, biomasse).

Or, les données météorologiques in situ du rayonnement solaire ne sont généralement pas 'disponibles' pour pouvoir quantifier tous les phénomènes qui se produisent lorsqu'un capteur solaire reçoit de la lumière. Il est donc nécessaire de compléter ces données en faisant usage des calculs géométriques de la position du site sur la terre, des calculs astronomiques de la position du soleil, et des modèles d'estimation du rayonnement solaire et du temps.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel du rayonnement solaire à Niamey pendant la période de pré-mousson et de mousson de l'année 2013 (de mai à octobre) et d'identifier les facteurs qui l'influencent à travers une série de mesures du rayonnement solaire global effectuées sur le plan horizontal et incliné. En effet, la période allant de la pré-mousson à la mousson est considérée au Niger comme la période la plus ensoleillée.

Dans cet article, nous présentons tout d'abord en problématique, la modélisation du rayonnement solaire, avant d'aborder le site de mesures, le matériel et de la méthode utilisée, ensuite présenter les résultats des mesures et leur analyse et finir par la conclusion.

2. MODELISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

2.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la quantité d'énergie provenant du soleil sous forme des rayonnements électromagnétiques composés de 'grains' de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C . L'énergie, E , de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde λ par la relation (1) [4]:

$$E = h \cdot C / \lambda \quad (1)$$

Où, h , est la constante de Planck, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js.

Le rayonnement solaire se compose des radiations électromagnétiques émises par le soleil dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) aux grandes longueurs ondes (radioélectriques). Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celle des micro-ondes.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-Soleil de 15.107 km). C'est ce que l'on appelle la constante solaire [5]. Lorsque ce rayonnement traverse

l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.

La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses, les gouttelettes et les aérosols dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde.

Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les nuages réduisent considérablement le rayonnement reçu au sol surtout pour les longueurs d'ondes supérieures à 1 μm . La contribution de ces différents phénomènes est illustrée par la figure 1.

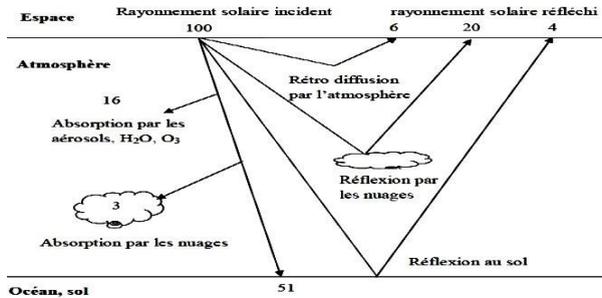


Fig. 1: Processus de transmission, de diffusion, d'absorption et de réflexion dans l'atmosphère (les chiffres sont des pourcentages du rayonnement solaire incident) [6]

2.2 Rayonnement solaire au sol

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. La figure 2 présente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol en fonction de la longueur d'onde [7].

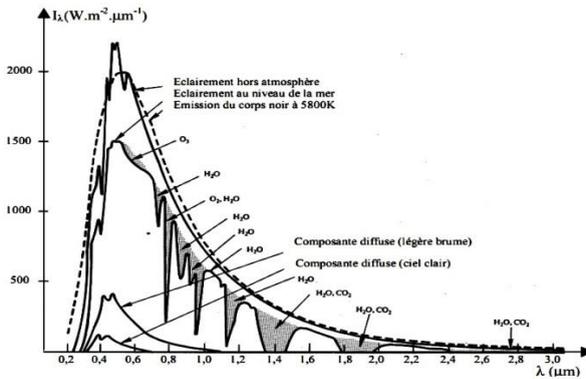


Fig. 2: Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre [7].

Le rayonnement solaire au niveau du sol est constitué principalement du rayonnement direct I_b (provenant directement du soleil, légèrement affaibli par la diffusion ou l'absorption lors de sa traversée dans l'atmosphère), du rayonnement diffus I_d (provenant de la voûte céleste par suite de la diffusion du rayonnement direct par les molécules et les aérosols), et de l'albédo I_r (qui est la fraction d'un rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle), comme illustre la figure 3.

Ainsi le rayonnement solaire global reçu au sol I_g , est la somme de toutes ces composantes.

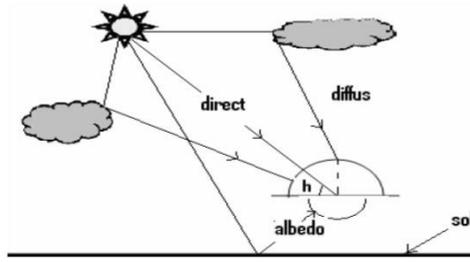


Fig. 3: Les différentes composantes du rayonnement solaire [6]

L'irradiation solaire dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon. La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation solaire.

2.3 Indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol (H) et le rayonnement extraterrestre (H_0) est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons. Il est défini par :

$$K_t = H / H_0 \quad (2)$$

La donnée H est la valeur mesurée de l'irradiation globale (journalière) sur une surface horizontale. Cette donnée est généralement disponible et peut être mesurée par un pyranomètre. Cependant, H_0 peut être calculée par la formule 3 ci-après, [4]

$$H_0 = \frac{1440}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left(1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right) \times [\omega \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\delta) + \cos(\theta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_0)] \quad (3)$$

où, I_0 est la constante solaire égale à $8.2 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{mn}$; n , le numéro du jour dans l'année à partir du 1^{er} Janvier; δ , la déclinaison solaire; ω_0 , l'angle horaire au coucher du soleil.

2.4 Durée et taux d'insolation

La durée d'insolation S correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. En l'absence permanente des nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi durée astronomique ou théorique du jour. Elle est notée S_0 et est définie par l'équation (3) ci-dessous [4].

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0 \quad (4)$$

avec ω_0 , l'angle horaire au coucher du soleil.

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \theta \tan \delta) \quad (5)$$

où, θ est la latitude du lieu et δ la déclinaison.

Le taux d'insolation σ est donné par l'expression ci-dessus,

$$\sigma = S / S_0 \quad (6)$$

2.5 Estimation du rayonnement solaire sur le plan horizontal

Nous utilisons l'expression suivante [4],

$$I = 1370 \exp[-TL / (0.9 + 9.4 \sin(\gamma))] \quad (7)$$

Où, TL désigne le facteur de Trouble de Linke calculable par,

$$TL = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta)\ln(P_v) \quad (8)$$

Où, β est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à,

- $\beta = 0.05$ en zone rurale;
- $\beta = 0.1$ en zone urbaine;
- $\beta = 0.2$ en zone industrielle ou polluée.

P_v est la pression partielle de vapeur d'eau (exprimée en mm Hg) calculée par l'équation suivante,

$$P_v = 0.0075 (P_{at} - P_{sec}) \quad (9)$$

Avec P_{at} la pression atmosphérique (Pa), P_{sec} , pression de l'air sec (soit 1.01222×10^5 Pa) [8].

L'éclairement direct sur un plan horizontal est donné par l'équation suivante,

$$I_b = I \sin(\gamma) \quad (10)$$

L'éclairement diffus est calculé par l'équation suivante,

$$dI_d = 54.8 \sqrt{\sin(\gamma)} [TL - 0.5 - \sqrt{\sin(\gamma)}] \quad (11)$$

L'éclairement global, sur un plan horizontal, est la somme de l'éclairement diffus et direct, il est donné par l'équation (12) suivante [8].

$$I_g = I_b + I_d \quad (12)$$

2.6 Estimation du rayonnement sur un plan quelconque

Sur une surface plane inclinée d'un angle I par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle χ avec la direction Sud (χ compté positivement vers l'Ouest). Le rayonnement global I'_g reçu par cette surface est la somme de trois termes [7].

$$I'_g = I'_b + I'_d + I'_r \quad (13)$$

Chacun des trois termes se calcule de la façon suivante,

- **Rayonnement direct**

$$I'_b = (I_b / \sin(\gamma)) [\cos(\gamma) \sin(i) \cos(\Psi - \chi) + \cos(I) \sin(\gamma)] \quad (14)$$

- **Rayonnement diffus**

$$I'_d = (I_d / 2) [1 + \cos(I)] \quad (15)$$

- **Rayonnement réfléchi**

$$I'_r = (I_g / 2) \rho [1 - \cos(I)] \quad (16)$$

Où ρ est le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire, ρ est aussi appelé albédo.

2.7 Coordonnées géographiques terrestres

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques: longitude ρ , latitude θ et son altitude Z , comme l'illustre la figure 4.

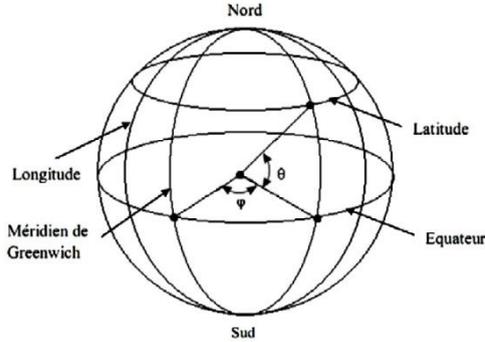


Fig. 4: Coordonnées géographiques terrestres [4]

2.8 Coordonnées solaires

La terre tourne autour du soleil en formant une trajectoire « elliptique ». La distance terre-soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à sa valeur moyenne qui est de $149\ 675 \times 10^6$ km. Cette distance est minimale au début de Janvier et maximale au début de Juillet, comme présenté à la figure 5.

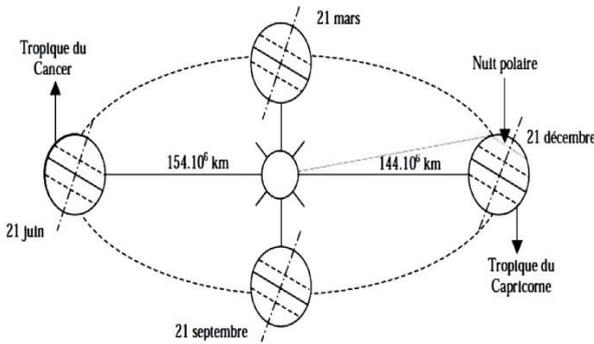


Fig. 5: Mouvement de la terre autour du soleil [4, 7]

- Déclinaison du soleil δ

La déclinaison du Soleil est l'angle de la droite Terre-Soleil avec le plan équatorial. Elle varie entre $+23^{\circ}27'$ (au solstice d'été, 22 juin) et $-23^{\circ}27'$ (au solstice d'hiver, 22 décembre), sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). La valeur de la déclinaison au jour J (J est le numéro du jour dans l'année à compter du 1er Janvier) est approximée à 1° près, par la formule,

$$\delta = 23.45 \sin(0.986 \times J - 80) \tag{17}$$

- Angle horaire ω

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante,

$$\omega = 15(TSV - 12) \tag{18}$$

Où TSV est le temps solaire vrai.

- Angle de la hauteur solaire γ

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal.

Cet angle varie de 0° à 90° vers le Zénith et de 0° vers -90° vers le Nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par la formule suivante,

$$\sin(\gamma) = \sin(\delta) \sin(\theta) + \cos(\delta) \cos(\theta) \cos(\omega) \tag{19}$$

- Azimut Ψ

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction Sud. Il se compte de 0° à 360° à partir du Sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous,

$$\sin(\Psi) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(\gamma)} \tag{20}$$

- Distance zénithale z

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle zénithal est complémentaire de l'angle γ et est déterminé par,

$$\cos(z) = \sin(\delta) \sin(\theta) + \cos(\delta) \cos(\theta) \cos(\omega) \tag{21}$$

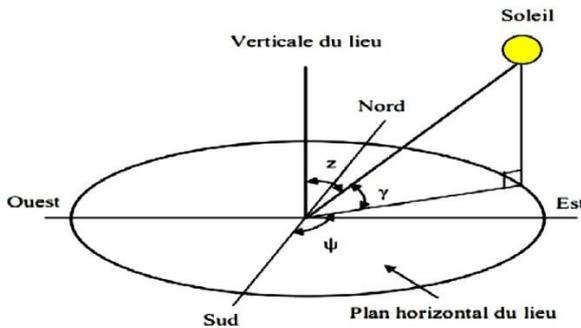


Fig. 6: Coordonnées solaires selon le repère horizontal [4]

2.9 Le temps

Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de la journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de 15° . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai (TSV) [4].

- Temps universel (TU)

Pour en déduire le temps légale ou local (TI), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire (DE).

$$TI = TU + DE \tag{22}$$

Où DE est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale +1 pour Niamey).

- Temps solaire moyen (TSM)

Il se déduit de l'équation suivante,

$$TSM = TU + \varphi / 15 \tag{23}$$

Où TSM est exprimé en heure.

- Temps solaire vrai (TSV)

Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude de référence [7].

$$TSV = T1 - DE + \frac{(Et + 4\phi)}{60} \quad (24)$$

Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable. T1, temps légal (donné par une montre); Et, équation du temps.

- Equation du temps (Et)

Le temps Et varie de -14.5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16.5 minutes (du 25 Mars au 30 Octobre). Une bonne approximation du temps Et est donnée par l'équation suivante,

$$Et = 9.9 \sin[2(0.986 \times J + 100)] - 7.7 \sin(0.986 \times J - 2) \quad (25)$$

Où Et, est exprimé en minutes, J le numéro du jour dans l'année à partir du 1^{er} Janvier.

3. MATERIELS ET METHODE

3.1 Présentation du site de mesures

Notre site de mesures est situé sur le toit du Département de Physique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Abdou Moumouni de Niamey au Niger.

Tableau 1: Coordonnées géographiques du site de mesures

Site	Longitude ϕ (°)	Latitude θ (°)	Altitude Z (m)
Toit du Dpt Physique	2°11' Est	13°51' Nord	10.8

3.2 Matériels et méthode de mesures

Le dispositif de mesures est constitué d'un certain nombre de matériels et du kit CMP 3.



Fig. 7: Le kit du pyranomètre CMP 3 [9-12].

Le **Tableau 2** ci-dessous présente les différents instruments utilisés [9-12]

Le pyranomètre CMP 3 (seconde classe ISO 9060: 1990) est destiné à mesurer le rayonnement solaire global aux courtes longueurs d'ondes, dans la gamme spectrale allant de 300 à 2800 nm. Le détecteur à thermopile mesure le flux lumineux pouvant atteindre 2000 W/m², avec un temps de réponse inférieur à 18 secondes et une sensibilité estimée

habituellement à $10 \mu\text{V/W/m}^2$ et qui varie à plus ou moins 5% de -10°C à $+40^\circ\text{C}$. La gamme de températures de service s'échelonne de -40°C à $+80^\circ\text{C}$ et la stabilité est supérieure à 1 % par an. Le choix du pyranomètre dépend de la précision et des performances demandées. Le pyranomètre est installé sur un support dans un endroit dégagé, sans obstacle et loin de mur blanc pouvant réfléchir le rayonnement solaire. Un niveau à bulle solidaire du corps de l'instrument permet de surveiller l'horizontalité du capteur.

Tableau 2: Matériels de mesures

Matériels	Désignation	Utilité
Pyranomètre CMP 3	Pyranometer CMP 3, Serial No : 130027, Sensitivity 9,87 $\mu\text{V/W/m}^2$	Capture du rayonnement solaire global.
Logiciel et afficheur-enregistreur METEON	Serial number : 07081123, Type 060501_Sensor : CMP 3_Reading in W/m^2	Paramétrage et affichage instantané des valeurs relevées sur l'afficheur METEON et le PC.
Sonde de température	Capteur thermocouple K_SK 2, Ref: P03652902	Capture de température.
Multimètre et un éventuel logiciel	Digital Multimeter Vellman DVM345DI	Support de la sonde, affichage instantané des températures.
Inclinomètre	SOLA NAM_50 cm	Fixation de l'inclinaison du pyranomètre
Câble du capteur	H05 VV - F_10 m	Connexion entre le capteur solaire et l'afficheur METEON.
C interface USB	28AWG/1P+24AWG/2C, Type CM 75°C CSA, CMG FT4	Connexion entre l'afficheur METEON et l'ordinateur.
Ordinateur (PC)	Ordinateur portable de marque DELL	Visualisation, réglage et enregistrement des données mesurées.
Support métallique de CMP 3	Support métallique de CMP 3 accompagnant le dispositif	Maintien le CMP 3 dans l'orientation et l'inclinaison désirées.

Une fois que les mesures commencent, on peut visualiser à tout moment sans aucun inconvénient, les données mesurées sous forme des courbes via l'interface d'un ordinateur comme illustré à la figure 8.



Fig. 8: Fenêtre de visualisation des mesures sous forme de courbes.

Sur cette fenêtre de visualisation, on observe trois courbes qui évoluent simultanément. Ce sont respectivement les courbes d' I_g minimal (en bleu), I_g maximal (en vert) et I_g moyen (en rouge).

Un thermomètre de contact est placé en-dessous du radiomètre pour mesurer la température de l'air ambiant. Dans toutes nos mesures, les températures sont relevées manuellement toutes les trente minutes.

Lorsque ces différentes opérations sont bien achevées, le dispositif est prêt pour mesurer le rayonnement solaire global et la température ambiante.

Comme indiqué sur la figure 9 ci-après, le dispositif de mesure se compose de deux parties reliées entre elles par le câble jaune,

- la première partie (sous le soleil) composée du pyranomètre CMP 3 et du thermomètre de contact, permet d'effectuer les mesures.
- la deuxième partie (sous l'ombre) composée du PC et de l'afficheur-enregistreur, permet d'enregistrer et de visualiser les mesures du rayonnement solaire, puis d'effectuer d'éventuels réglages.



Fig. 9: La première partie du dispositif de mesures sur le site (a) à gauche la 1^{ère} partie du dispositif et (b) à droite la seconde partie

4. RESULTATS ET INTERPRETATION

4.1 Résultats des mesures du rayonnement solaire global

A partir des mesures effectuées, les courbes sont enregistrées de manière journalière (chaque jour) par groupe de trois, de couleurs différentes, comme indiquées sur les figures 10, 11 et 12, ci-dessous. Ces dernières donnent,

- l'évolution du rayonnement solaire global au cours de la journée;
- l'influence des nuages et poussières sur les mesures du rayonnement global I_g ;
- le potentiel d'énergie solaire au niveau du site.

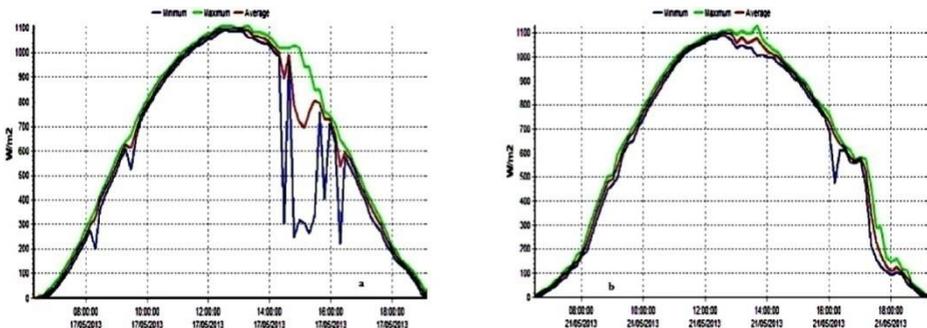


Fig. 10: Relevé de I_g sur le plan horizontal (a) Journée du 17/05/13 et (b) Journée du 21/05/13

A chaque instant l'afficheur-enregistreur METEON enregistre les valeurs minimales et maximales de I_g , puis calcule la moyenne de toutes les valeurs enregistrées sur un intervalle de temps (programmé au préalable). Ainsi, nous observons sur chaque figure trois courbes qui évoluent simultanément.

Ce sont respectivement les courbes de l'éclairement global I_g minimal (en bleu), de I_g maximal (en vert) et de I_g moyen (en rouge).

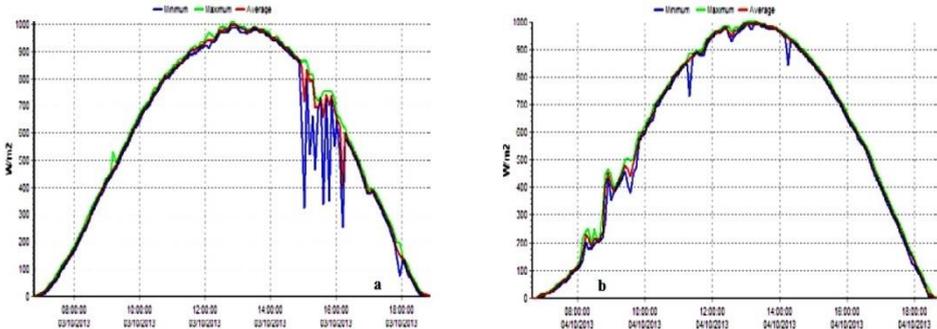


Fig. 11: Relevé de I_g sur le plan incliné à 13.51° et orienté au plein Sud
(a) Journée du 03/10/13 et (b) Journée du 04/10/13

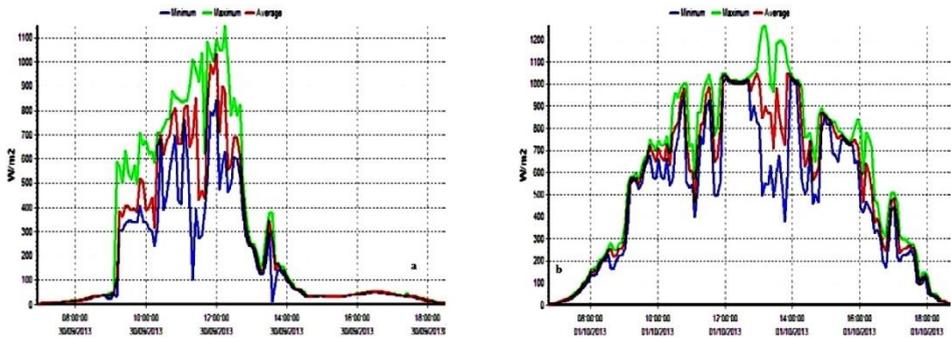


Fig. 12: Relevé de I_g sur le plan incliné à 28.51° et orienté au plein Sud
(a) Journée du 30/09/13 et (b) Journée du 01/10/13

4.2 Analyse et interprétation des résultats

Les valeurs maximales du rayonnement global I_g , sur le plan horizontal et sur le plan incliné à 13.51° orienté au plein Sud, varient entre 950 à 1040 W/m^2 de I_g sur le plan horizontal et 950 à 990 W/m^2 sur le plan incliné à 13.51° orienté au plein Sud, entre 12h00 et 14h00 entre 12h00 et 14h00, respectivement.

Les heures du levé du soleil sont autour de 7h00 et ceux du coucher autour de 19h00, soit une durée moyenne d'ensoleillement par jour de 12 heures durant ces périodes de pré-Mousson et de Mousson. Nous observons aussi des fluctuations plus ou moins importantes sur les 03 figures ci-dessus, surtout sur la figure (12 a et b).

Ces fluctuations sont dues au passage des nuages, comme illustrées par la figure (13 a et b) ou par des brumes de poussières en période d'Harmattan (de novembre à février).

Ainsi nous pouvons dire que les nuages, mais surtout les brumes de poussières et les aérosols sont les principales causes d'atténuation du rayonnement solaire global I_g au niveau de notre site.



Fig. 13: Vue du ciel du 30/09/13, un ciel perturbé par les nuages (a) des cumulus (à gauche), (b) des cumulonimbus et nimbostratus (à droite)

En l'absence des nuages et des brumes de poussières, les trois courbes sont quasi confondues. Les courbes obtenues par mesures sont des données brutes. Pour mieux les analyser, nous avons échantillonné les différentes courbes du rayonnement global moyen I_g sur des intervalles de temps d'une heure chacune. Les résultats montrent une variation entre les deux extrémums (I_g minimal (en bleu), et I_g maximal (en vert)).

4.2.1 Estimation du rayonnement solaire global par le Modèle de CRAER

Nous avons utilisé le modèle de CRAER afin d'estimer les valeurs de I_g de notre site durant la période de mesures. Nous présentons directement les résultats de I_g estimé sur le plan horizontal dans le **Tableau 3** et ceux des plans inclinés sur le **Tableau 4**.

Tableau 3: Valeurs estimées du rayonnement solaire global sur un plan horizontal

Temps	15-mai	16-mai	17-mai	21-mai	23-mai	24-mai	25-sept	02-oct
7h	96	94	95	96	95	94	66	66
8h	281	281	281	281	281	281	235	235
9h	503	504	503	503	504	504	469	457
10h	728	730	728	728	717	718	690	678
11h	889	892	890	889	890	892	863	850
12h	991	993	991	990	992	993	964	938
13h	1016	1019	1017	1016	1017	1019	977	963
14h	965	968	966	965	966	968	908	883
15h	827	829	827	826	828	829	776	752
16h	643	645	644	643	644	644	571	538
17h	414	415	415	414	415	415	330	310
18h	192	192	192	201	200	200	127	114
19h	41	41	42	47	47	47	0	0

Tableau 4: Valeurs estimées du rayonnement solaire global sur les deux plans inclinés

Inclinations Temps	$\beta_i = 28,51^\circ$				$\beta_i = 13,51^\circ$			
	27-sept	28-sept	30-sept	01-oct	03-oct	04-oct	05-oct	
7h	66	67	66	67	67	65	66	
8h	235	235	235	235	235	235	235	
9h	458	468	458	457	457	457	457	
10h	678	690	679	678	668	668	678	
11h	850	850	851	850	849	837	837	
12h	951	951	952	950	937	938	938	
13h	977	976	964	963	950	951	951	
14h	897	895	898	883	881	883	872	
15h	764	763	755	751	738	741	741	
16h	560	559	550	548	536	538	538	
17h	330	320	320	310	310	310	300	
18h	127	121	120	114	115	108	108	
19h	0	0	0	0	0	0	0	

4.2.2 Comparaison entre les résultats mesurés et les résultats estimés

Nous avons tracé sur chaque figure ci-dessous, la courbe du rayonnement solaire estimé (calculé avec le modèle de CRAER) et celle du rayonnement mesuré.

Capteur solaire à l'horizontale

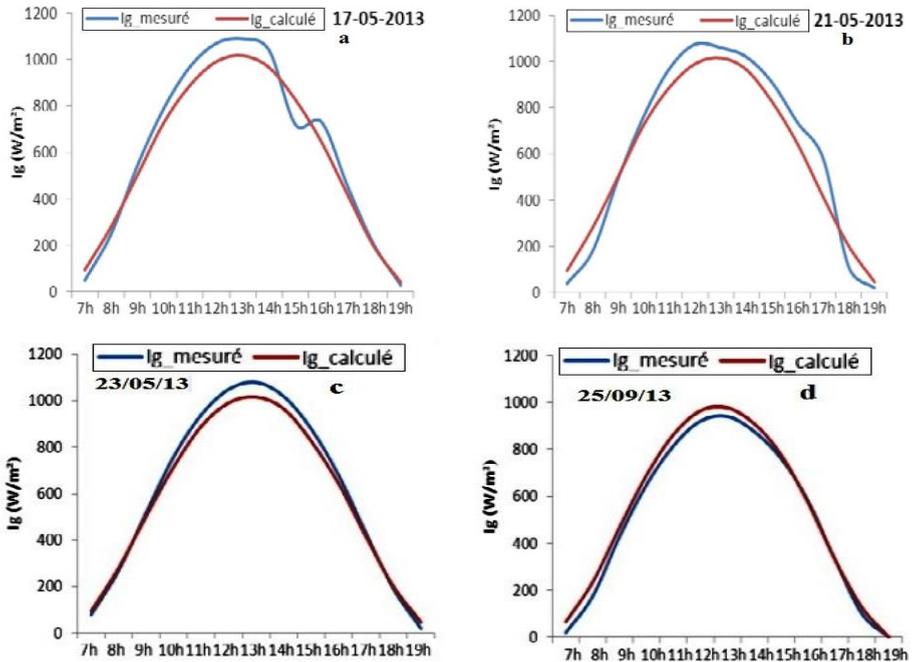


Fig. 14: Courbes de comparaison de I_g sur le plan horizontal
 (a) pour 17/05/13; (b) pour 21/05/13; (c) pour 23/05/13; (d) pour 25/09/13.

Capteur incliné à 13.51°

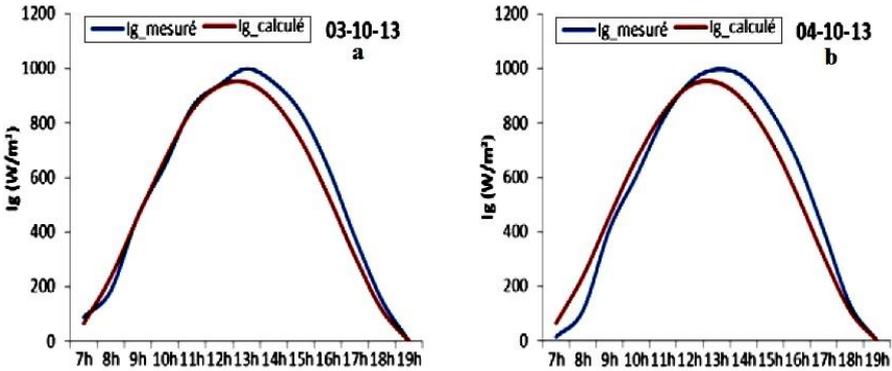


Fig. 15: Courbes de comparaison de I_g sur le plan incliné à 13.51°
(a) pour 03/10/13; (b) pour 04/10/13

Capteur incliné à 28.51°

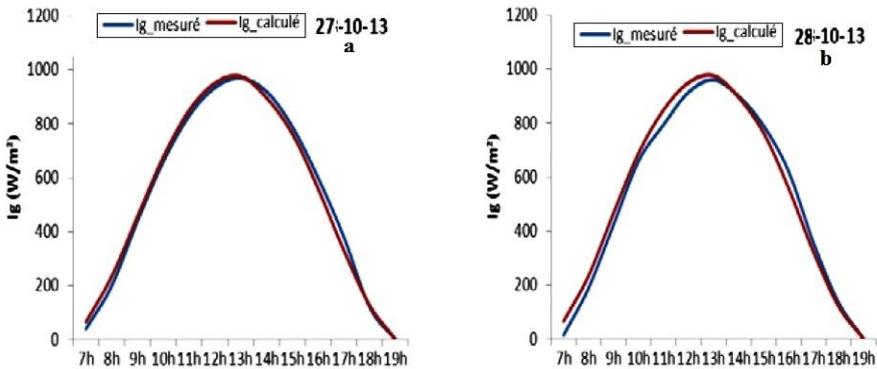


Fig. 16: Courbes de comparaison de I_g sur le plan incliné à 28.51°
(a) pour 27/09/13; (b) pour 28/09/13

Les figures ci-dessus montrent que pour des jours à ciel clair, les courbes estimées et mesurées présentent la même allure.

Pour le cas du plan horizontal, nous constatons que les valeurs mesurées de I_g dépassent les valeurs estimées de I_g , sauf pour le 25/09/13 où le ciel est atténué par les embruns et aérosols. Néanmoins, nous remarquons que les valeurs calculées de I_g sont supérieures aux valeurs mesurées de celui-ci au lever et au coucher du soleil. Cela est dû aussi à la présence des stratus et altostratus [6] à ces instants. Des écarts plus ou moins importants sont observés sur les courbes de comparaison. Ils sont dus au trafic des nuages qui varie selon les périodes.

Pour le cas du pyranomètre incliné à 13.51°, nous constatons que les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs mesurées dans la matinée, ensuite ces dernières dépassent les valeurs calculées avec un écart type de l'ordre de 0.5 dans la soirée. Cela

est aussi causé par la présence des nuages. Pour le cas du pyranomètre incliné à 28.51° , nous remarquons une concordance entre les deux courbes.

En comparant les irradiances journalières théoriques à celles mesurées nous constatons qu'à une inclinaison horizontale du capteur solaire, 50% des irradiances journalières mesurées sont supérieures aux valeurs journalières estimées. Lorsque le capteur est incliné à 13.51° , toutes les irradiances journalières (100%) mesurées sont supérieures à celle obtenues par le calcul.

Enfin pour une inclinaison du capteur à 28.51° , les 75% des puissances journalières mesurées sont inférieures aux valeurs estimées. Cependant, ces résultats ne varient pas réellement en fonction des inclinaisons réalisées, ils varient selon la période de mesure et de la nature du ciel (c'est-à-dire la couverture nuageuse, le taux d'aérosols et de poussières dans celui-ci). Mais nous pouvons sentir l'influence de l'inclinaison en comparant les résultats obtenus à 13.51° par rapport à ceux obtenus à 28.51° . Par ailleurs, nous constatons une importante insolation au sein de notre site, plus de 13h en Mai et plus de 12h en Septembre et Octobre à ciel clair.

5. CONCLUSION

Le Niger en général et la zone de Niamey en particulier dispose d'un potentiel solaire non négligeable. Les mesures du rayonnement solaire sont indispensables pour toute application d'énergie solaire parce qu'elles permettent non seulement de connaître le potentiel réel du site, mais aussi, de simuler le fonctionnement probable des systèmes énergétiques à installer afin de s'assurer de leur bon fonctionnement et de leur faisabilité.

Dans cette étude, nous avons non seulement effectué des mesures réelles du rayonnement solaire sur notre site, mais aussi, utilisé un modèle d'estimation du rayonnement solaire qui tient compte de l'humidité, des aérosols et des poussières contenus dans le ciel.

Ce modèle a été déjà utilisé et validé dans certains pays, mais pas au Niger à climat chaud et sec. Il nous a permis de comparer les irradiances journalières mesurées à celles obtenues par le calcul (celles estimées par le modèle CRAER).

Les résultats obtenus par mesure montrent que Niamey dispose d'un potentiel solaire considérable malgré les perturbations des nuages et de brumes poussières et aérosols. Les valeurs journalières de I_g mesurées rapportées en énergie par unité de surface (kWh/m^2) varient de 2.62 kWh/m^2 à 7.96 kWh/m^2 .

Une importante insolation est observée au niveau du site: plus de 12h/jour à ciel clair durant la pré-Mousson et la Mousson. Ces résultats obtenus indiquent que l'utilisation des systèmes solaires photovoltaïques comme système d'appoint dans la ville de Niamey, serait bien profitable pour satisfaire les besoins énergétiques des populations. Mais, il serait nécessaire aussi, d'étudier l'effet de la température sur le rendement des panneaux solaires photovoltaïques par exemple.

REFERENCES

- [1] G. Sarlos, P.A. Haldi, P. Verstra, R. Walther et M.A. Hirt, '*Systèmes Energétiques, Offre et Demandes d'Energie: Méthodes d'Analyse*', Traité de Génie Civil, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Vol. 21, Première Edition, Lausanne (Suisse), 875 p., 2003.

- [2] C. Lahache, '*Energie Solaire*' <http://claude.lahache.free.fr/coursts1elpartie/energie-solaire.pdf>, consulté le 26/01/2017, 10 p.
- [3] Cri de Cigogne, 'CDC', '*Bilan Energétique et Perspectives pour une Politique Energétique Ambitieuse au Niger*', 2009.
http://www.cridecigogne.org/sites/default/files/Bilan_et_perspectives_energetiques_au_Niger_-_Par_CrideCigogne.pdf, consulté le 26/01/2016 ; 27 pages.
- [4] S.A. Kalogirou, '*Solar Energy Engineering Processes and Systems*', 2nd Edition, Elsevier. Boston-Massachusetts (USA). 819 p. 2014.
- [5] B. Flèche et D. Delagnes, '*Energie Solaire Photovoltaïque*', Cours Sti Elt, Juin 2007, Ebook, 18 p., 2007.
- [6] J.C. Dupont, '*Impact des Nuages de Haute Altitude sur le Bilan Radiatif à la Surface de la Terre: Quantification Expérimentale et Analyse*', Thèse de Doctorat en Physique de l'Atmosphère de l'Ecole Polytechnique (Université Paris Saclay), 218 p., 2008.
- [7] Y. Jannot, '*Thermique Solaire*', 2011.
<http://www.thermique55.com/principal/thermiquesolaire.pdf>;
Consulté le 26/01/2016. 81 p., 2016.
- [8] B. Ould Bilal, V. Sambou, C.M.F. Kéné, M. Ndong et P.A. Ndiaye, '*Etude et Modélisation du Potentiel Solaire du Site de Nouakchott et de Dakar*', Journal des Sciences, Vol. 7, N°4, pp. 57 - 66, 2007.
- [9] Kipp & Zonen, '*Manuel d'Utilisation du Pyranomètre CMP 3, V1007*'.
www.kippzonen.com. Consulté le 02/5/13; 4 p., 2012.
- [10] <http://www.fr.m.wikipedia.org/wiki/Thermopile>. Consulté le 02/5/13.
- [11] T. Ferguson, '*Note d'Application N°043, Tutorial: Mesurer des Températures par Thermocouples*', National Instruments, 14 p., 2001.
- [12] Kipp & Zonen, '*Meteon Data Logger Manual*', 2012.
<http://www.kippzonen.fr/Download/108/METEON-data-logger-Manual>.
Consulté le 05/05/2013; 13 p.