

Mesure du rayonnement solaire au Sahara (Algérie)

Sidi BAIKA ^{1*}

Abstract

L'énergie solaire est considérée comme l'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement et elle occupe une des places les plus importantes parmi les diverses sources d'énergies possibles. Une connaissance précise de distribution de la radiation solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances. Cet article montre l'intérêt des mesures du rayonnement dans la région de Tamanrasset qui fait partie d'un réseau mondial de surveillance du climat. On y expose les méthodes de calibrage des instruments de mesure ainsi que le contrôle qualité qui permet la validation des données. Enfin, Pour étudier la variabilité climatique du rayonnement solaire, une analyse de la tendance des séries de rayonnement solaire annuelles est conduite par plusieurs versions du test de Mann-Kendall.

Keywords

¹ Office National de la Météorologie, Tamanrasset, Algérie

*Correspondant: baika1971@gmail.com

Contents

1	Introduction	1
2	Matériel et méthodes	2
2.1	2.1 Centre de la veille de l'atmosphère globale (V.A.G)	2
2.2	2.1.1 Site de Tamanrasset « ville »	2
2.3	2.1.2 Site de l'Assekrem	2
2.4	2.2 Réseau de Base du Rayonnement de Surface (BSRN)	2
2.5	2.3 Traitement et calibrage des données de rayonnement:	2
2.6	2.4 Analyse de la tendance des séries annuelles:	3
3	Résultats et discussion	5
3.1	3.1 Variation de rayonnement journalière et mensuelle	5
4	Conclusion	7
	References	8

1. Introduction

Le soleil est une source essentielle de tout rayonnement reçu par la terre. Ce dernier lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie. La connaissance de la trajectoire du soleil et sa position en chaque point du ciel et la distance terre-soleil sont nécessaires à la détermination de la quantité du rayonnement extraterrestre et la durée du jour. Dans le domaine spectral 200 -3000 nm, la densité de flux de rayonnement émis par

la surface du soleil et reçue par une surface perpendiculaire au rayonnement, située au sommet de l'atmosphère, est presque constante en intensité et en composition. En effet, la distance terre-soleil varie au cours de l'année ce qui entraîne une fluctuation de +/- 4% de cette constante autour de sa valeur moyenne. C'est le flux de rayonnement qu'on appelle « constante solaire 1360 W/m². [1] Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère, il subit une extinction due à l'absorption et à la diffusion par les constituants atmosphériques :

- Une fraction du rayonnement solaire est transmise directement au sol, en conservant sa direction après absorption partielle : C'est le rayonnement direct = I (l'intensité du rayonnement direct est mesuré par un Pyréliomètre muni d'un dispositif charge de l'orienter en permanence vers le soleil). [2]
- L'autre fraction est absorbée et diffusée dans toutes les directions. Une partie de l'énergie diffusée est renvoyée dans l'espace (rayonnement réfléchi). L'autre partie, celle qui arrive au sol, est connue sous le terme de rayonnement diffus = D, qu'on mesure à l'aide d'un Pyranomètre, muni d'un disque écran mobile de 6 à 8 cm de diamètre, porte par un bras de 80cm et déplacé à l'aide d'un système rotatif piloté informatiquement et maintient à l'ombre la partie sensible du Pyranomètre. La somme des rayonnements diffus et direct s'appelle le rayonnement Global $G = D + I \sin H$ (H est la hauteur du soleil au-dessous de l'horizon ; il est aisément obtenu à partir de la latitude du lieu, de la déclinaison et de l'angle horaire du soleil).

2. Matériel et méthodes

La région de Tamanrasset est concernée par deux programmes mondiaux : la veille de l'atmosphère Globale (VAG) le Réseau de Base du Rayonnement de Surface (BSRN)

2.1 Centre de la veille de l'atmosphère globale (V.A.G)

Les mesures du rayonnement solaire et atmosphérique à Tamanrasset sont effectuées depuis septembre 1994 dans le cadre d'un programme mondial de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) intitulé Veille de l'Atmosphère Globale (VAG). Le site de Tamanrasset a été sélectionné par une mission d'expert en 1991 pour mener ce programme. Le centre de la VAG est mené dans les deux sites : Tamanrasset et Assekrem depuis 1994 en collaboration avec l'OMM.

2.1.1 Site de Tamanrasset « ville »

Tamanrasset est situé dans le Sahara central. La ligne du tropique du cancer passe à 100km au nord de Tamanrasset. La station de Tamanrasset est placée au centre vaste plateau couvert de montagne sauf au sud-sud-ouest (SSW). De part sa position géographique, Tamanrasset se situe dans la zone de transition entre le monde de la météorologie tropicale et celui de la météorologie tempérée, malgré la prédominance des phénomènes liés de l'un ou l'autre type pendant certaine partie de l'année. Il n'en reste pas moins que les situations synoptiques rencontrées à Tamanrasset résultent d'une interaction ou encore d'un équilibre entre les phénomènes liés à la météorologie tropical et ceux qui sont liés à la météorologie tempérée. Cette station représente le climat aride et qui est influencé par les flux de mousson en été. La station de Tamanrasset se trouve à une latitude de 22° 47' N, une longitude de 05° 31' E et une altitude de 1377 m. Les mesures effectuées dans ce site sont :

- le trouble atmosphérique : mesuré à l'aide du photomètre solaire 3 fois/jour pour déduire le coefficient d'extinction du rayonnement solaire par les aérosols à la longueur d'onde 0.5 um
- l'ozone total : mesuré à l'aide du spectromètre DOBSON 3 fois/jour pour calculer l'épaisseur de la couche d'ozone.
- le rayonnement solaire et atmosphérique : on y mesure le rayonnement direct, global, diffus, infrarouge en courtes longueurs d'onde et atmosphérique en grande longueur d'onde (GLO) avec une intégration d'une minute et une acquisition continue sur P.C
- l'épaisseur optique AOD : elle est mesurée de manière continue à l'aide du photomètre CIMEL sur 07 longueurs d'onde. Cette mesure entre dans le cadre du réseau AERONET, en collaboration avec l'INM (Météo Espagnole).

2.1.2 Site de l'Assekrem

Le site de l'Assekrem est situé à environ 50 km au nord de Tamanrasset à une altitude très élevée de 2710 m. La station VAG de l'Assekrem a été construite par l'ONM en 1996 spécialement pour ce programme. Elle est en service depuis mars 1997. Les mesures effectuées actuellement sont :

- Ozone de surface : mesuré à l'aide du TECO49 avec une intégration de 1 mn.
- Monoxyde de carbone CO : mesuré à l'aide de l'équipement HORIBA avec une intégration de 1 mn.
- Échantillonnage des gaz à effet de serre (GES) : toutes les semaines un échantillonnage d'air atmosphérique est effectué sur site. Un colis contenant 02 échantillons est expédié au laboratoire de la NOAA pour analyse chimique.

2.2 Réseau de Base du Rayonnement de Surface (BSRN)

Le réseau BSRN a été conçu à la fin des années 1980 par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) avec la collection des données à utiliser dans les applications climatologiques, en particuliers : La validation des produits satellitaires, la comparaison des modèles climatiques et l'établissement d'une climatologie radiométrique régionale. Au milieu des années 1990, le réseau BSRN est inclus dans l'expérience Globale sur l'Energie et l'Eau (GEWEX). A la fin des années 1990, il est désigné comme réseau contributeur dans le programme de Veille Atmosphérique Globale (VAG) de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et en 2014 comme réseau de référence pour le Système Mondiale d'Observation du Climat (SMOC). [3]

- La station de rayonnement de Tamanrasset est intégrée dans le réseau BSRN depuis mars 2000.

2.3 Traitement et calibrage des données de rayonnement:

Un attachement très sérieux est accordé à la qualité des données de rayonnement :

- Une première mesure consiste à l'étalonnage des équipements de mesures. Cette opération est effectuée chaque année par des journées de ciel clair, de très bonnes visibilités et de vent calme à faible à l'aide d'un étalon secondaire (figure 4). L'OMM organise tous les cinq ans une campagne d'étalonnage des étalons secondaires au centre de rayonnement de DAVOS(Suisse). Un exemple des coefficients d'étalonnage est représenté dans le tableau 2.

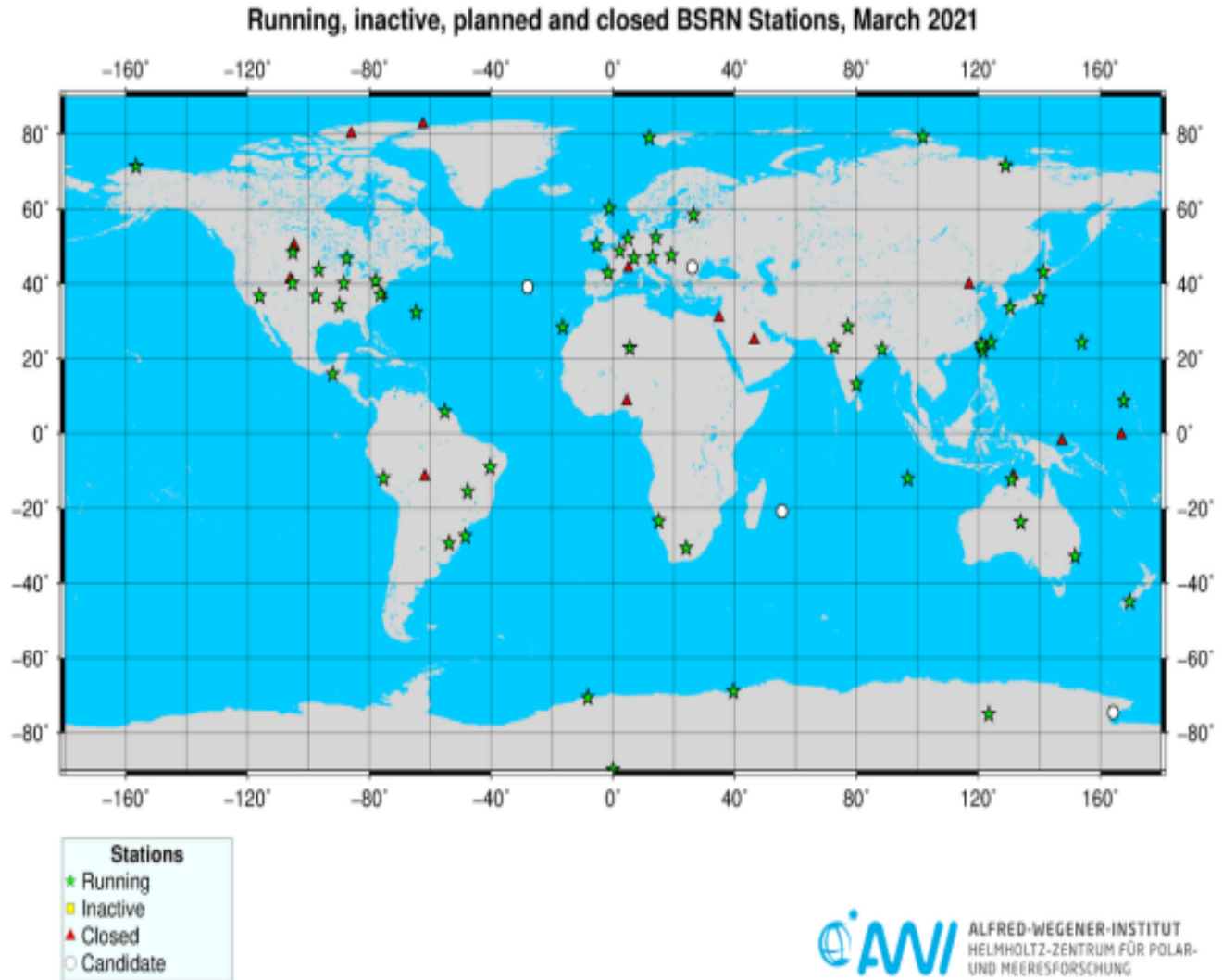


Figure 1. Réseau de stations BSRN (mars 2021) [4]

Table 1. Types de rayonnement mesurés à Tamanrasset

Mesure	Instrument	spectre	Début	Fréquence	Unité
Rayonnement direct	Pyrhéliometre	0.28 μm – 4 μm	Sept 1994	3 fois/J	W/m ²
Rayonnement direct	Pyrhéliometre	0.28 μm – 4 μm	Oct 1994	Minute	W/m ²
Rayonnement Diffus	Pyrhéliometre	0.28 μm – 4 μm	Oct 1994	Minute	W/m ²
Rayonnement global	Pyrhéliometre	0.28 μm – 4 μm	Oct 1994	Minute	W/m ²
Rayonnement infrarouge	Pyrhéliometre	0.69 μm – 4 μm	Oct 1994	Minute	W/m ²
Rayonnement (GLO)	Pyrhéliometre	4 μm – 100 μm	mar 2000	Minute	W/m ²
Rayonnement réfléchi	Pyrhéliometre	0.28 μm – 4 μm	Oct 1994	Minute	W/m ²

- La deuxième mesure s'assure du contrôle de la qualité des données. Cette opération s'effectue d'abord à l'échelle minute, avant que les données ne soient agrégées à l'échelle horaire et quotidienne sur lesquelles d'autres procédures de contrôle sont appliquées. Ces procédures se résument à des tests de vraisemblance, de fourchettes et de cohérence interne.

2.4 Analyse de la tendance des séries annuelles:

À l'échelle minute, les données de rayonnement sont agrégées à l'échelle annuelle après avoir été validées par les contrôles de qualité. Dans cette analyse, on se propose d'étudier la tendance des séries annuelles du rayonnement direct,

Table 2. Coefficients d'étalonnage . Exemple : Si le global vaut 6.5mV et son coefficient de calibration K=6.96 $\mu V/W.m^{-2}$, en énergie il vaut $6.5 * 103/6.96 = 933.9 w/m^2$.

Rayonnement	Ancien coefficient K année 2017 ($\mu V/W.m^{-2}$)	Nouveau coefficient K année 2018 ($\mu V/W.m^{-2}$)
Direct	7.79	7.76
Diffus	6.78	6.84
Global	6.96	6.96



Figure 2. dispositif de mesure du rayonnement à Tamanrasset



Figure 4. Dispositif d'étalonnage à Tamanrasset

diffus et global sur la période 1994 à 2017. Le test de Mann-Kendall (Kendall, 1975 ; Mann, 1945 ; Sneyers, 1990) est utilisé pour l'étude de cette tendance. Ce test est dédié à la détection des tendances monotones. C'est un test non paramétrique et réputé robuste car il s'appuie sur les rangs des observations. Par contre, en présence de l'auto-corrélation entre les observations, ce test est perturbé (von Storch et Navarra, 1999 ; Yue et Wang, 2004). Une auto-corrélation positive conduit à rejeter plus souvent l'hypothèse nulle H_0 (absence d'une tendance) au profit de l'hypothèse alternative H_1 (présence d'une tendance). Dans le cas où la présence de l'auto-corrélation ne peut être écartée, divers auteurs ont proposé des solutions pour y remédier à ce problème. Nous citerons deux approches :

- La transformation PW (pre-whitening) : Elle consiste à transformer la série d'observations en une série qui représente un bruit blanc (von Storch et Navarra, 1999).
- La modification du test de Mann-Kendall : Cette approche consiste à modifier le test appliqué aux données que les données elles-mêmes (Hamed et Rao, 1998 ; Yue et Wang, 2004). Ces auteurs ont proposé de corriger la statistique S du test de Mann-Kendall pour prendre en compte les effets de l'auto-corrélation. Le principe est d'introduire un terme correctif à la variance de cette statistique S.



Figure 3. station météorologique de la ville de Tamanrasset

En résumé, notre démarche pour étudier la tendance, consiste à vérifier si les séries annuelles de rayonnement présentent une auto-corrélation avec le corrélogramme graphique

de la fonction d'auto-corrélation empirique (ACF) et un test statistique de Wald-Wolfowitz (Sneyers, 1990). Deux cas peuvent se présenter : dans le cas de l'absence de l'auto-corrélation, on utilisera le test de Mann-Kendall classique. Par contre, dans le cas inverse, on utilisera le test de von Storch (von Storch, 1995) pour la méthode PW et le test (Hammed et Rao, 1998) pour l'approche modification du test de Mann-Kendall.

Si la tendance est confirmée, nous utiliserons la méthode de la pente de Sen (Sen, 1968) pour estimer l'ampleur de celle-ci. Cette méthode, non paramétrique, consiste à calculer les pentes de toutes les données de la série. Ensuite, à estimer la pente de Sen par la pente médiane.

3. Résultats et discussion

3.1 Variation de rayonnement journalière et mensuelle

Si les valeurs annuelles des différentes composantes du rayonnement varient très peu dans le temps (fig. 7), les valeurs journalières et mensuelles montrent un effet saisonnier important (figures 5 et 6). Les valeurs minimales du rayonnement global et diffus sont observées en période d'hiver lorsque le soleil est très bas. Par contre les valeurs maximales sont observées en période estivale, qui s'étend de mai à septembre, où Tamanrasset est influencée par les flux de mousson avec un ciel couvert fréquent et de la brume. Le rôle des nuages sur les échanges de chaleur dans le système climatique est fondamental, via les flux radiatifs, dans les longueurs d'onde visibles et infra-rouge, mais aussi les flux de chaleur latente. La modulation solaire du flux de particules énergétiques a un impact climatique direct très faible, mais une amplification très forte pourrait exister via ce contrôle sur les nuages. Les différentes corrélations proposées entre les flux de particules énergétiques et la couverture nuageuse restent toutefois très débattues [6]

3.2 Analyse de Tendance Annuelle

L'examen visuel de la figure 8 qui montre l'évolution temporelle des séries annuelles des 3 composantes du rayonnement solaire à Tamanrasset, nous suggère de vérifier statistiquement leur tendance dans le temps.

3.2.1 Étude de l'auto-corrélation :

3.2.1.1 Test graphique :

L'examen visuel des corrélogrammes (figure 8) montre que la série du rayonnement direct ne présente pas d'auto-corrélation.

Par contre les 2 séries restantes du rayonnement diffus et global montrent des coefficients d'auto-corrélation significatifs dès le premier décalage (lag 1). La série du rayonnement diffus montre une auto-corrélation plus forte que le rayonnement global.

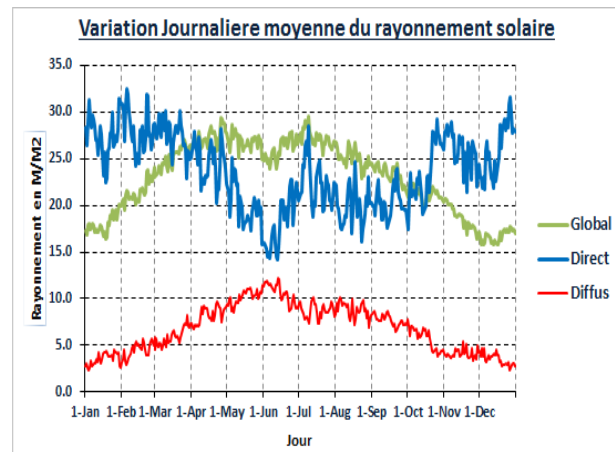


Figure 5. Variation Journalière Moyenne du rayonnement : Global, Direct et Diffus [5]

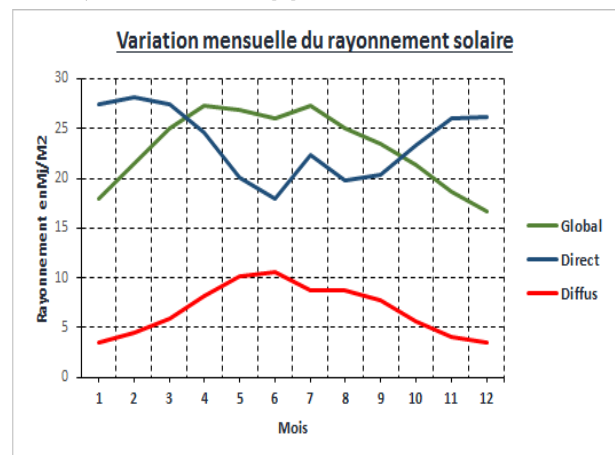


Figure 6. Variation Mensuelle Moyenne du rayonnement : Global, Direct et Diffus [5]

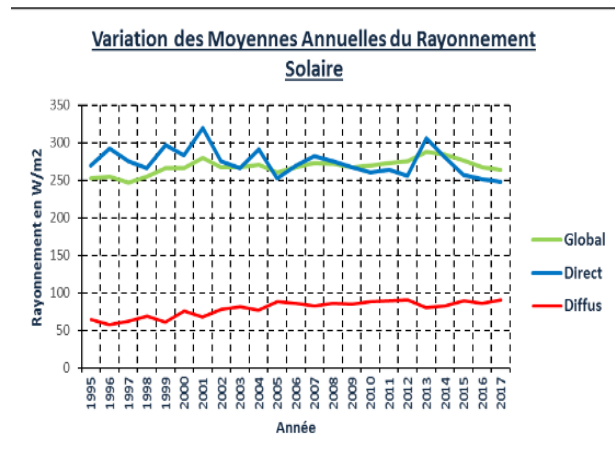
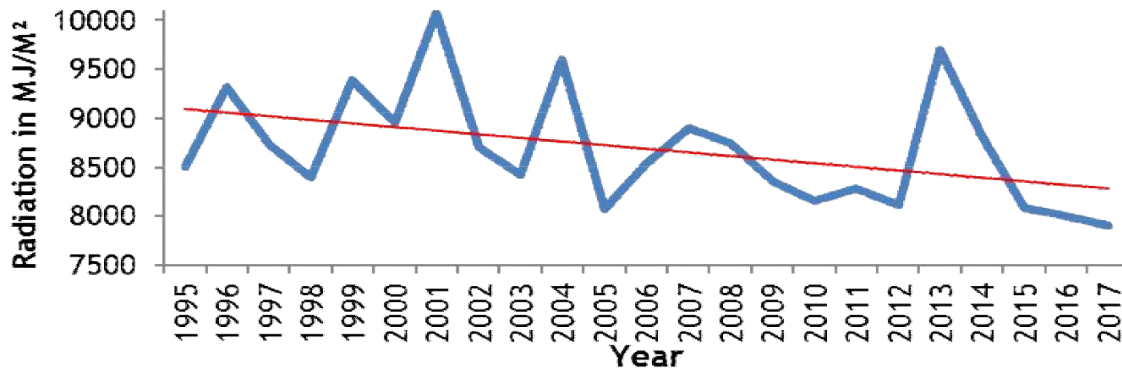


Figure 7. Variation Annuelle Moyenne du rayonnement : Global, Direct et Diffus [5]

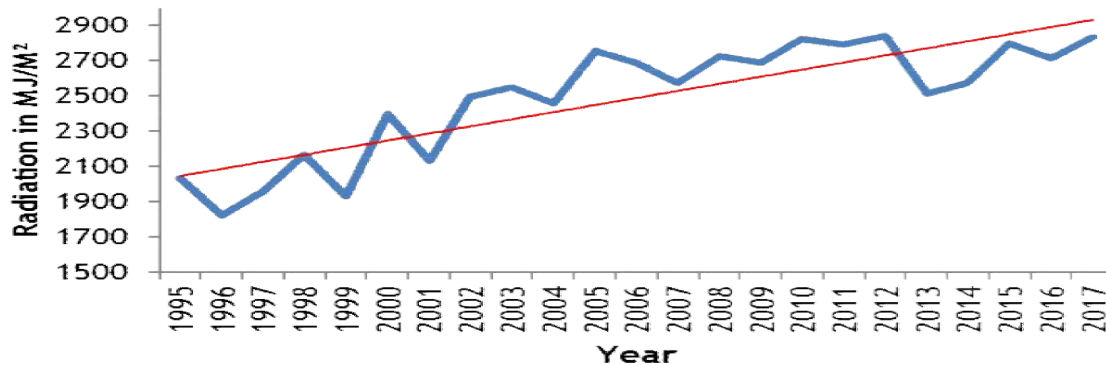
3.2.1.2 Test statistique de Wald-Wolfowitz

Le tableau 3, montre que le test de la corrélation sérial de Wald-Wolfowitz est très significatif pour les deux séries annuelles du rayonnement diffus et global. Par contre, la série du rayonnement annuelle direct ne présente pas de cor-

THE ANNUAL TOTAL OF DIRECT



THE ANNUAL TOTAL OF DIFFUSE



THE ANNUAL TOTAL OF GLOBAL

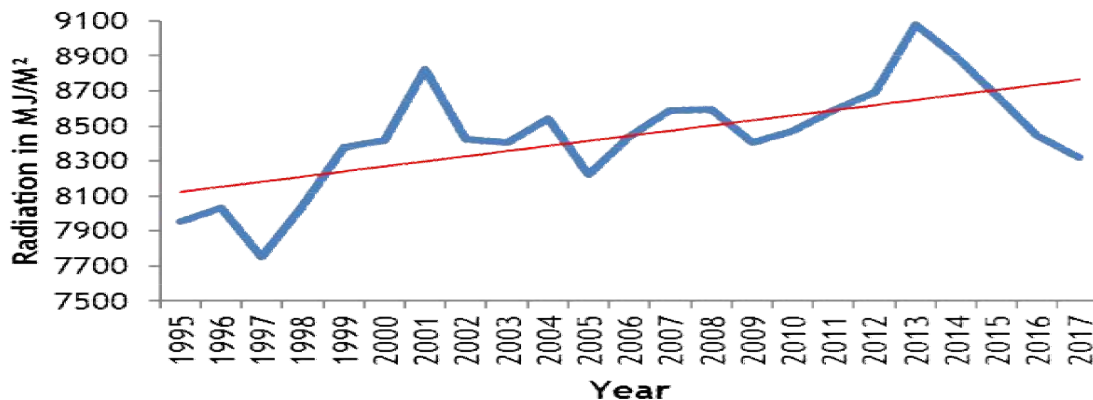


Table 3. Variation annuelle du rayonnement solaire direct, diffus et global à Tamanrasset (1995-2017)

Table 4. Tableau 3 : Résultats du test de Wald-Wolfowitz

Série	Direct	Diffus	Global
Pvaleur	0.1676	0.001034	0.0009463

relation sérial significative. Ces résultats confirment les résultats obtenus par la méthode graphique de l'ACE.

3.2.2 Analyse de la tendance :

Suite aux résultats obtenus de l'étude de l'autocorrélation, nous appliquerons le test de Mann-Kendall classique à la série du rayonnement direct, par contre, pour les séries du rayonnement diffus et global, nous confronterons les résultats de deux versions du test de Mann-Kendall. L'une proposée par (Hammed et Rao, 1998) avec correction de la variance et l'autre proposée par (von Storch, 1995) avec la transformation PW. Pour le rayonnement direct le tableau 4

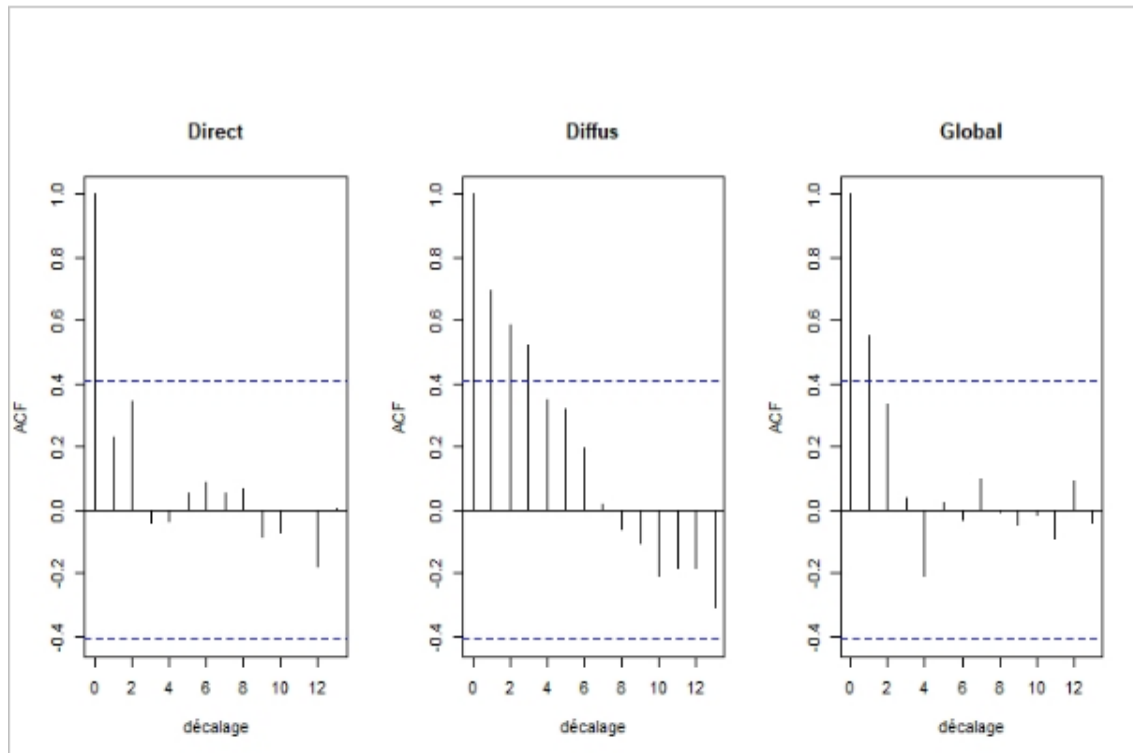


Figure 8. Corrélogramme des 3 séries annuelles : direct, diffus et global

confirme une tendance très significative puisque la p.valeur du test de Mann-Kendall classique, de l'ordre de 0.007 est très inférieure au seuil $\alpha = 0.05$. En outre, la pente de Sen confirme une tendance à la baisse de l'ordre de $-41 \text{ MJ} / \text{M}^2 / \text{an}$ de rayonnement par an.

Table 5. résultats du test de Mann-Kendall classique

Série	Direct	Diffus	Global
Pvaleur	7.062844e-03	/	/
Pente de Sen	-4.158000e+01	/	/

Par contre, les résultats sont contradictoires pour les séries du rayonnement diffus et global. La version du test de Von Storch (tableau) suggère l'acceptation de H_0 , donc absence d'une tendance significative, et la version du test de Hammed et Rao (tableau) suggère le contraire avec une tendance positive pour les 2 séries. A ce stade, il nous semble prudent de ne pas accepter une tendance significative pour les séries de rayonnement diffus et global. Test PW von

Table 6. résultats du test MK avec correction de la variance (approche Hammed et Rao 1998)

Série	Direct	Diffus	Global
Pvaleur	/	9.123965e-06	5.118049e-03
Pente de Sen	/	3.737778e+01	2.304000e+01

Storch (1995) Approach :

Table 7. résultats du test de tendance par l'approche PW proposée par von Storch (1995)

Série	Direct	Diffus	Global
Pvaleur	/	6.273523e-02	9.101957e-01
Pente de Sen	/	1.328750e+01	9.103742e-01

4. Conclusion

Les données collectées des irradiations solaires sur le site de Tamanrasset durant une période de 23 ans nous ont révélé la fréquence des mesures pour les rayonnements solaires reçus.

- Le rayonnement diffus est généralement élevé à partir du mois d'Avril et prend une valeur maximale durant le mois de juin ($10.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$) en raison de la présence des nuages et des nébulosités. Par contre les faibles valeurs sont observées au moins de décembre ($3.5 \text{ MJ}/\text{m}^2$) en présence des bonnes conditions météorologiques.
- Pour le rayonnement global, il varie entre $30.8 \text{ MJ}/\text{m}^2$ en mai 2015 et $14.4 \text{ MJ}/\text{m}^2$ en décembre 1998. Les fortes valeurs de mai sont dues à la forte hauteur du soleil.
- Les valeurs du rayonnement direct sont très élevées en période d'hiver de novembre à mars par absence des nuages et varient au cours de l'année entre $18 \text{ MJ}/\text{m}^2$ et $28 \text{ MJ}/\text{m}^2$.

Le site de Tamanrasset dispose d'un gisement solaire important.

La durée d'insolation dépasse 3300 heures annuellement, en comparaison aux sites d'Alger (2800 heures) et de Batna (2900 heures [5])

L'analyse de la tendance des séries annuelles du rayonnement solaire montre que seul que le rayonnement annuel direct connaît une tendance à la baisse de $-41 \text{ MJ} / \text{M}^2 / \text{an}$.

Pour les séries du rayonnement annuel diffus et global, qui présentent une auto-corrélation rendant ainsi l'analyse de la tendance délicate, les résultats entre deux versions du test de Mann-Kendall sont contradictoires. Ce qui nous incite à être prudent quant à l'existence d'une tendance significative, d'autant plus que la taille de l'échantillon est faible. A titre de recommandations, nous conseillons vivement la pérennité et le renforcement des mesures dans cette région qui contribue à la surveillance du climat local et mondial. En outre, la poursuite de l'analyse des séries de rayonnement doit être poursuivie

et affinée avec l'extension avec le temps de la taille des échantillons.

References

- [1] HP Grog. Ja duffie and wa beckman," solar engineering of thermal process, 1991.
- [2] MS Windows NT kernel description. <https://www.intervent.fr/index.php>. Accessed:.
- [3] MS Windows NT kernel description. <http://www.soda-pro.com/help/validation/helioclim-3-current-day-bsrn>. Accessed: June 2018.
- [4] MS Windows NT kernel description. <https://bsrn.awi.de/nc/stations/maps/>. Accessed: 2021.
- [5] S.BAIKA. Solar radiation measurement in the sahara. *The 15th BSRN Scientific Review and Workshop at Colorado U.S.A*, July 16-20, 2018.
- [6] J Calogovic, C Albert, F Arnold, J Beer, L Desorgher, and EO Flueckiger. Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover. *Geophysical Research Letters*, 37(3), 2010.