

Modélisation de l'irradiance solaire longue(IR) et Effet du Forcing solaire sur le réchauffement de l'air à Bukavu, au Sud Kivu.

Alfred CHUBAKA BASHIGE¹, Albert KABASELE YENGAYENGA²,
CIMBELA KABONGO Joseph², KAZADI TSHIAMALA²

1. Département de Physique-Technologie, ISP-BUKAVU, R.D Congo
2. Département Physique Appliquée, UPN-Kinshasa, R.D Congo

Résumé :

Contexte : Le flux d'irradiation solaire courte perçu sur la surface de la terre ou irradiance incidente, une fois à la surface de la terre réfléchi une partie dans l'atmosphère sous forme d'irradiance longue ou infrarouge pendant que l'autre partie est absorbée par la terre. Cette différence d'irradiance longue et courte, dite forcing solaire selon le rapport de GIEC(2018), pourrait avoir d'effet sur l'évolution des températures de surface. D'autre part la maîtrise de la détermination de cette composante de l'irradiance en un lieu pourrait avoir d'importance capitale dans le cas de suivi des cultures, de température, qu'il est indispensable de l'évaluer et de déterminer le modèle de son estimation lorsqu'on connaît l'irradiance globale ou irradiance incidente.

Matériels et méthodes : Dans cette étude, nous nous servons des valeurs in situ des mesures de l'irradiance solaire effectuées sur base d'un pyranomètre du type LPO2 connecté à un enregistreur du type LI-19 et interfacé par un logiciel Huk seflux Thermal sensor 2.2.0.2., des irradiances courte et longue (les Infra-rouge IR), les températures sont obtenues à partir du satellite NOAA. Les données satellitaires sont calibrés aux données de terrain en vue de corriger certaines erreurs. Le traitement se fait, par la suite, sur les logiciels Excel, Matlab et SPSS pour non seulement arriver à déterminer par régressions sous ANOVA le modèle de calcul de IR mais aussi déceler l'évolution de température pour en estimer l'existence d'une éventuelle réchauffement de l'air.

Résultats : Possibilité de modéliser par la méthode polynomiale multivarié de Lagrange de l'irradiance longue(IR) par les équations (13) et (14) lorsqu'on dispose des valeurs des données in situ mesurées par un pyranomètre. Le réchauffement observé sur la surface libre du sol de Bukavu est de,0.21°C tel qu'il est déterminé par la moyenne des anomalies de températures évaluées sur les 31 ans.

Conclusion : La surface libre du sol de Bukavu se réchauffe de 0.21°C mais ce réchauffement n'est pas important face à la moyenne mondiale de 0.5°C. Il s'aperçoit que lorsqu'il y a une forte absorbance radiative solaire ou forcing solar, l'air atmosphérique se réchauffe faiblement car il y a dans ce cas une faible réflexion dans les IR, qui ont un pouvoir réchauffant. L'irradiance longue IR qui permettrait d'évaluer l'évolution de la température dans l'air de la haute atmosphère se détermine par le modèle de Lagrange à partir des irradiances mesurées in situ.

Mots clés : Irradiation solaire courte, longue, absorbance ou forcing solaire, température, réchauffement.

Date of Submission: 26-01-2022

Date of Acceptance: 07-02-2022

I. Introduction

En tant que principale source d'énergie (99.7%, le reste étant produit à l'intérieur de la terre), le rayonnement électromagnétique solaire ou irradiance solaire (de l'Ultraviolet à l'Infrarouge en passant par le Visible) est un facteur, moteur du climat dont on a intérêt à tirer parti (produire de l'énergie, faciliter la culture) mais aussi s'attendre à ses effets thermiques, dont le réchauffement. S'agissant de la dernière considération, l'on note pour illustration que les variations d'irradiance dues aux cycles de 11ans, bien que faibles ($\pm 1W/m^2$ soit environ 0.1% de l'irradiance solaire totale) sont trop rapide pour engendrer des variations de température importante à la surface de la terre(0.1°C/cycle) et de ce fait modifie le flux solaire absorbé par la surface d'environ 0.14W/m², compte tenu de son inertie thermique (DELAYGUE G., 2018).

Il n'est plus à démontrer, d'une part que le rayonnement IR est thermique et donc influe sur la modification de la température et que d'autre part, le réchauffement climatique est une réalité non seulement globale mais aussi régionale. Déjà, la selon le rapport de la GIEC, il est probable que le réchauffement planétaire atteigne 1,5 °C entre 2030 et 2052 s'il continue d'augmenter au rythme actuel (degré de confiance élevé) (GIEC,2018).

D'autres rapports font état du fait que le phénomène de changement en Afrique est une évidence et que la RDC est l'un des pays le plus vulnérables à la variabilité et au changement climatique(BAD,2012).

Ainsi, par exemple (KABASELE Y.Y,2019) sur la modélisation du fleuve Congo et marées océaniques de Muanda par climatologie spatiale, confirme l'hypothèse d'un réchauffement du sol sur Moanda de 0,43°C/an et sur Kinshasa de +1.3°C/an contre, selon le GIEC, celui de 0.015°C/an dans l'air sur le globe terrestre.

Et, au Sud-Kivu, il ressort des résultats de la thèse de Mudekuza (2021) dans une étude de la température du sol au Sud-Kivu, territoire par territoire que, la température du sol au Sud-Kivu s'est accrue de 0,7°C, comme le prouve le graphique ci-dessous :

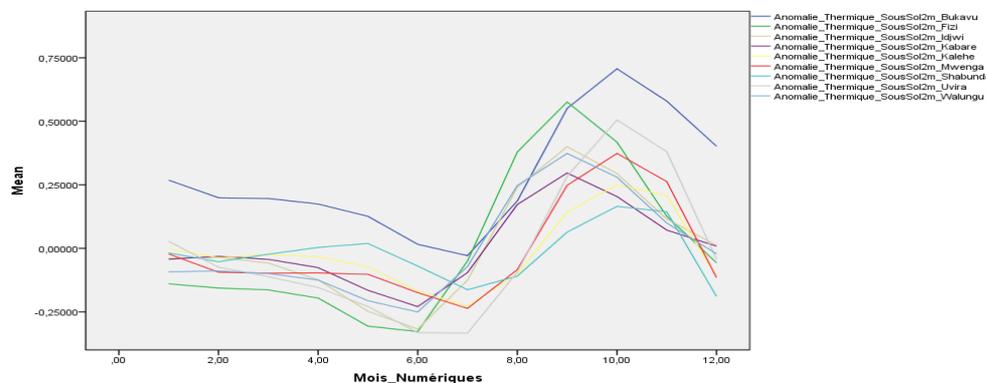


Figure 1. L'évolution des anomalies des températures par Territoire au Sud-Kivu

L'étude montre que du mois de juillet à novembre la terre du Sud-Kivu se réchauffe avec des pics hauts de température en octobre, et se refroidit de décembre à juin avec des pics bas de température en juillet. Tout compte fait, il se dégage sans aucune équivoque que l'élévation de la température est une évidence dans une région donnée de la terre, qu'il en serait le cas de l'air surfacique de Bukavu.

En effet, la position géographique de la ville de Bukavu face à l'équateur l'offre une opportunité d'exposition au flux radiatif solaire plus ou moins perpendiculaire et donc perceptible au maximum à son passage de l'atmosphère. Pour maintenir un équilibre thermique dans le système, à sa surface devra être renvoyée dans l'atmosphère, par réflexion, une partie du flux radiatif solaire IR responsable en partie de l'élévation de la température. A cet effet, faudra-t-il, que nous évaluons par rapport à l'énergie renvoyée sur le sol de Bukavu, l'effet lié à la température de sa surface.

Voilà pourquoi, il importerait d'avoir un modèle sur le calcul local d'un tel rayonnement quand on a les irradiances solaires globales du pyranomètre calibrées aux mesures satellitaires, et par voie de conséquence de déceler l'effet du forcing solaire sur le réchauffement climatique à Bukavu.

II. MÉTHODOLOGIE

2.1 Matériels et zone d'étude

a. Localisation de la ville de Bukavu

La ville de Bukavu se localise au Sud-ouest du Lac Kivu. Elle a une superficie de 62,88km² et se situe à une faible latitude par rapport à l'équateur, soit 2° 30' de latitude Sud et à 28° 50' de longitude Est, à une altitude moyenne de 1600m. Elle est limitée au Nord par le Lac Kivu, à l'Est par la rivière Ruzizi qui la sépare de la province de Cyangugu au Rwanda, au Sud et à l'ouest par le territoire de Kabare. Bukavu est la ville la plus élevée de la RDC, situé dans le bassin d'effondrement Est africain appelé *Eastern valley* du graben africain qui explique ainsi son relief accidenté où l'on observe des plateaux fortement disséqués marqués par le relief en forme demi ovale plaçant la ville à 1750 m d'altitude à Cimpunda à Kadutu et 2147.6 m sur le mont NTANDWE à CIKONYI, un des points le plus élevés de la ville

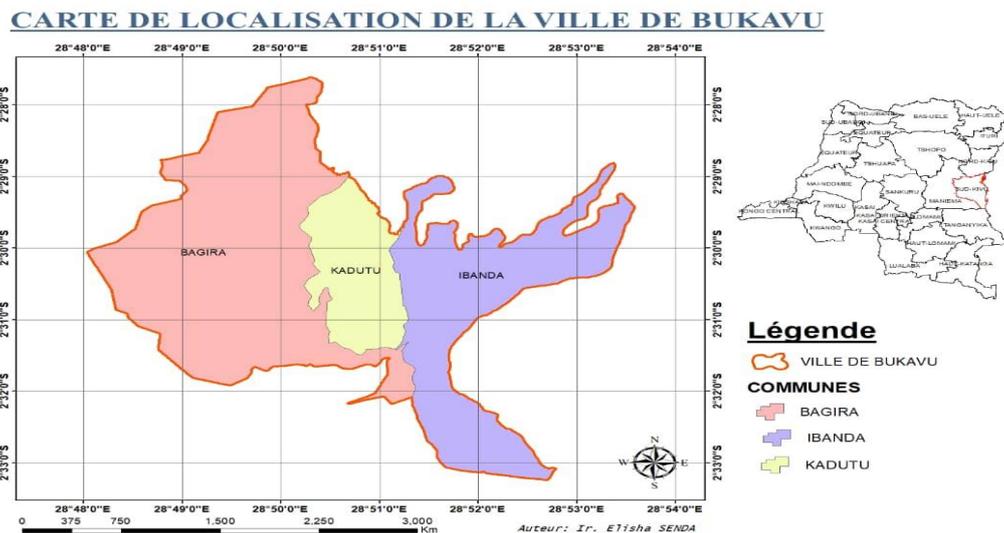


Figure 2. La carte de localisation de la ville de Bukavu

La ville de Bukavu connaît un climat pluvieux. Située dans la région inter lacustre, la ville de Bukavu a un climat tropical humide tempéré par son altitude. Il s'agit selon CHAMAA, d'un climat tropical pluvieux subéquatorial ou tropical d'Altitude [Chamaa, 1981]. Le climat de Bukavu comporte deux saisons ; la saison sèche et la saison de pluie. La saison sèche (trois mois) est courte, elle va du mois de juin à mi-septembre, tandis que la saison de pluie (neuf mois) s'échelonne sur le reste de l'année.

b. Matériels utilisés

1. Le pyranomètre



Fig.3.a. Enregistreur Fig.3.b. Capteur du type LP02

Les données d'irradiance n'ont couvert qu'une période allant d'août 2019 en août 2020. Il conviendra toute fois, sous la régression par ANOVA, de les étendre sur une période de 31ans en établissant une corrélation entre elles et les données satellitaires qui s'étalent de 1990 à 2020.

C'est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres selon le filtre utilisé. Il est couplé d'un détecteur (fig.3.b) et d'un enregistreur (fig.3.a) pouvant stocker les données pendant 58 heures 37 minutes pour un intervalle d'une minute deux enregistrements consécutifs.

2. Satellite

Le satellite NOAA de la NASA nous a permis à travers son routeur GIOVANNI de la plateforme Merra 2 et GLDAS sur le site [http //giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/](http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/) dans le web-based NASA Giovanni de trouver les données d'irradiance journalière courte et longue diurne ainsi que les températures sur une période de trente et un ans soit environ trois cycles solaires.

2.2 Méthodes

2.2.1 Collectes des données d'irradiance

a. Par expérimentation sur un Pyranomètre

L'irradiance solaire globale est captée par un capteur de flux thermique (fig 3.b), type LP02, utilisé pour la mesure de la puissance du rayonnement solaire global reçue par unité de surface, en watts par mètre carré. Un enregistreur/afficheur (fig.3.a) du type LI-19 est interfacé à l'aide d'un logiciel « Hukseflux Thermal sensors », version 2.2.0.2.

En plus de ces données du pyranomètre nous nous sommes inspiré des données satellitaires donnant l'irradiance courte ou incidente et l'irradiance longue ou IR, réfléchie ainsi que les températures de l'air de surface.

L'irradiance courte sera par la suite calibrée à l'irradiance journalière globale du pyranomètre et l'étendre sur une période de 31 ans.

L'acquisition de ces données satellitaires, relève de la procédure ci-après :

- Choisir la variable en cochant la discipline correspondante, ensuite écrire le nom de la variable dans la zone de recherche et lancer la recherche pour enfin cocher la variable.
- Choisir la zone d'étude à partir de l'onglet « select region bounding box or shape ». Il suffit de sélectionner la région correspondante à l'étude, mais établie sur un grand champ qui l'inclue, ici, la République Démocratique du Congo Kinshasa ; ou alors on fait un clic sur « drag to draw region of interest », en sélectionnant sa zone d'étude qui s'enregistre automatiquement dans le mémoire.
- Choisir la date en complétant dans « select date ranger », la date de début et celle de la fin suivant la résolution temporaire adoptée ;
- Lancer la recherche de l'image en cliquant sur « plot data » et attendre que l'image de toute la zone se remplisse.
- Enregistrer par un clic sur download en choisissant comme format geoTIFF et l'image est enregistrée.
- Reprendre la même procédure pour passer à la date suivante en cliquant sur « back to data selection ».
- Lorsque toutes les images sont téléchargées, on passe à l'extraction des données numériques sur ArcGis.

b. Par calcul

Nous complétons les données en nous inspirant du fait que l'irradiance incidente soit la somme des irradiances absorbées et réfléchies pour déduire la partie absorbée (pouvant servir l'évaluation du forcing solaire sur les trois cycles).

2.2.2 Méthode de traitement

2.2.2.1. Les régressions

Nous tenterons par régression sous ANOVA ou sous la méthode polynomiale multivariée de Lagrange, de trouver un modèle de détermination de l'irradiance longue, Irr_IR en fonction des irradiances courtes satellitaire calibrée à l'irradiance du pyranomètre.

En effet, la méthode de Lagrange consiste à calculer les coefficients a, b, et c du plan d'ajustement (de régression), plan donné mutandis par les expressions des irradiation solaire globale in situ Irr_g_moy, Irr_g_min, Irr_g_max (respectivement l'irradiation globale moyenne, minimale et maximale) et satellitaire longue ou infrarouge I_{r_IR} difficile à Corréler automatiquement à partir du logiciel SPSS Pro21;

Ajurons le Plan des nuages des points sur MATLAB par la Méthode de LAGRANGE telle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{r_IR} = a * I_{rr_g_moy} + b * I_{rr_g_min} + c ; \text{ ou} \\ I_{r_IR} = a * I_{rr_g_moy} + b * I_{rr_g_max} + c; \text{ ou} \\ I_{r_IR} = a * I_{rr_g_max} + b * I_{rr_g_min} + c \end{array} \right. \quad (1)$$

En effet, si $A_i(I_{r_IR}^i, I_{rr_g_moy}^i, I_{rr_g_min}^i)$ est un point de ce plan d'ajustement, alors l'écart-type par la fonction différentielle est :

$$I_{r_IRi} = -I_{r_IR}^i + (a * I_{rr_g_moy}^i + b * I_{rr_g_min}^i + c) \quad (2)$$

Définissons la fonction variance par $F = \sum_{i=1}^N I_{r_IRi}^2 = \sum_{i=1}^N [-I_{r_IR}^i + (a * I_{rr_g_moy}^i + b * I_{rr_g_min}^i + c)]^2$

Or F ($I_{r_IR}^i, I_{rr_g_moy}^i, I_{rr_g_min}^i$) sera minimal quand les dérivées par rapport à a, b et c seront nulles.

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial b} = 0; \quad \text{et} \quad \frac{\partial F}{\partial c} = 0$$

C'est-à-dire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial a} = 2a \sum I_{rr_g_moy}^i (-I_{r_IR}^i + (a * I_{rr_g_moy}^i + b * I_{rr_g_min}^i + c)) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 2b \sum I_{rr_g_min}^i (-I_{r_IR}^i + (a * I_{rr_g_moy}^i + b * I_{rr_g_min}^i + c)) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial c} = 2 \sum (-I_{r_IR}^i + (a * I_{rr_g_moy}^i + b * I_{rr_g_min}^i + c)) = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Soit

$$\left\{ \begin{array}{l} a \sum I_{rr_g_moy}^i{}^2 + b \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i + c \sum I_{rr_g_moy}^i = \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_moy}^i \\ a \sum I_{rr_g_min}^i + b \sum I_{rr_g_min}^i{}^2 + c \sum I_{rr_g_min}^i = \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_min}^i \\ a \sum I_{rr_g_moy}^i + b \sum I_{rr_g_min}^i + N = \sum I_{r_IR}^i \end{array} \right. \quad (4)$$

Sous forme matricielle, il se dégage le multiplicateur de Lagrange ci-après

$$\begin{bmatrix} \sum(I_{rr_g_moy}^i)^2 & \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_min}^i * I_{rr_g_moy}^i & \sum(I_{rr_g_min}^i)^2 & \sum I_{rr_g_min}^i \\ \sum I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{rr_g_min}^i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_min}^i * I_{r_IR}^i \\ \sum I_{r_IR}^i \end{bmatrix} \quad (5)$$

A partir duquel nous dégageons :

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum(I_{rr_g_moy}^i)^2 & \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_min}^i * I_{rr_g_moy}^i & \sum(I_{rr_g_min}^i)^2 & \sum I_{rr_g_min}^i \\ \sum I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{rr_g_min}^i & N \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum(I_{rr_g_min}^i)^2 & \sum I_{rr_g_min}^i \\ \sum I_{r_IR}^i & \sum I_{rr_g_min}^i & N \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} \sum(I_{rr_g_moy}^i)^2 & \sum I_{bh}^i * I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_min}^i * I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{bh}^i I_{rr_g_min}^i & \sum I_{rr_g_min}^i \\ \sum I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{r_IR}^i & N \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} \sum(I_{rr_g_moy}^i)^2 & \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_min}^i * I_{rr_g_moy}^i & \sum(I_{rr_g_min}^i)^2 & \sum I_{rr_g_min}^i * I_{r_IR}^i \\ \sum I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{rr_g_min}^i & \sum I_{r_IR}^i \end{vmatrix} \quad (9)$$

Avec $a = \frac{\Delta_a}{\Delta}$ $b = \frac{\Delta_b}{\Delta}$ $c = \frac{\Delta_c}{\Delta}$

Ainsi pour déterminer l'irradiation solaire longue partir des irradiances solaires globales moyennes, minimales et maximales in situ lues sur un capteur, on reproduit les mêmes opérations comme celles effectuées pour $I_{r_IR}^i = f(I_{rr_g_max}^i, I_{rr_g_min}^i)$ puis on utilise successivement les équations modélisées suivantes :

$$\begin{aligned} I_{r_IR} &= \frac{\Delta_a}{\Delta} * Irr_g_moy + \frac{\Delta_b}{\Delta} * Irr_g_min + \frac{\Delta_c}{\Delta} \quad \text{ou ;} \\ I_{r_IR} &= \frac{\Delta_a}{\Delta} * Irr_g_moy + \frac{\Delta_b}{\Delta} * Irr_g_max + \frac{\Delta_c}{\Delta} \quad \text{ou ;} \\ I_{r_IR} &= \frac{\Delta_a}{\Delta} * Irr_g_max + \frac{\Delta_b}{\Delta} * Irr_g_min + \frac{\Delta_c}{\Delta} ; \end{aligned} \quad (10)$$

La Procédure par MATLAB nous permet de Créer trois Matrices dont le multiplicateur de Lagrange pour la

fonction $F(I_{bh}, I_{rr_g_max}^i, I_{rr_g_min}^i)$ est tel que : $Lx \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = Y$

$$\begin{bmatrix} \sum(I_{rr_g_moy}^i)^2 & \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_moy}^i * I_{rr_g_min}^i & \sum(I_{rr_g_min}^i)^2 & \sum I_{rr_g_min}^i \\ \sum I_{rr_g_moy}^i & \sum I_{rr_g_min}^i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum I_{r_IR}^i * I_{rr_g_moy}^i \\ \sum I_{rr_g_min}^i * I_{r_IR}^i \\ \sum I_{r_IR}^i \end{bmatrix} \quad (11)$$

Soit pour obtenir les coefficients a, b et c des équations (12), résoudre sous Matlab :

$$\text{Coefficients} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \text{Matrice Inverse } L \times \text{Matrice Colone } Y \quad (12)$$

2.2.2.2. Le graphisme des variables

Une étude graphique sera effectuée sous Matlab 17.0 et SPSS 20.0 dans le but d'analyser l'évolution des températures et des irradiances sur les 31 années et d'en dégager les conséquences par rapport au réchauffement dû au forcing solaire.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Etude descriptive des irradiances perçues sur Bukavu

Cette étude est effectuée sur base des données aussi bien satellitaire, anémométrique que pyranométrique comme il est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau1. Statistique descriptive des données

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance
Irr_g NOAH BKV en W/m ²	11323	200,0160	549,8040	287,814456	48,0529583	2309,087
Ano_Irr_g_NOAH en W/m ²	20322	-91,8408	261,9895	-1,112638	47,2884923	2236,202
Irr_IR_NOAH en W/m ²	11323	,0000	139,4310	60,737867	21,2026169	449,551
Ano_Irr_IR_NOAH en W/m ²	11323	-60,7379	78,6931	,000000	21,2026169	449,551
Irr_in_Situ_Pyrano en W/m ²	11323	-1,5655	867,0000	465,850277	34,1466047	1165,991
Ano_Irr_in_Situ_Pyrano en W/m ²	11323	-467,4158	401,1497	,000000	34,1466047	1165,991
Irr_Absorb_BKV en W/m ²	11323	-59,9797	807,5681	405,261033	32,7596315	1073,193
Ano_Irr_Absorb_BKV en W/m ²	11323	-465,2407	402,3070	,000000	32,7596315	1073,193
Irr_IR_Pyrano_BKV_W/m ²	11323	48,6064	73,0402	60,589245	2,6733124	7,147
Ano_Irr_IR_Pyrano_BKV_W/m ²	11323	-11,9828	12,4510	,000045	2,6733124	7,147
Tmax air NOAH BKV en °C	20322	21,0000	33,0000	26,373229	3,8678450	14,960
Ano_T_max air NOAH_BKV en °C	20322	-5,4384	6,5616	-,065167	3,8678450	14,960
T_moy_in_situ_BKV en °C	11323	14,9528	24,3200	17,518703	,9547825	,912
T_max_in_situ_Bkv en °C	11323	-98,4422	33,5876	21,394987	2,1329028	4,549
Ano_Tmax_in_situ_BKV en °C	11323	-119,7820	12,2374	,210265	2,1218291	4,502
Valid N (listwise)	11323					

Faisant l'analyse de ces données radiométriques et climatologiques établies journalièrement sur 31 ans , il s'aperçoit d'une part que la température à la surface libre du sol de Bukavu est en moyenne d'environ 18°C(17,51±0,95°C) face à une température maximale d'environ 23°C (21.39±2.13)°C et d'autre part que l'irradiance moyenne perçue au sol est en moyenne de (465.85±34,14)W/m², ceci par rapport à une absorbance en irradiance ou forcing radiatif de (405,26±37,75)W/m² tel que déduit des mesures sur le sol de l'irradiance par le pyranomètre.

La variation de la température sur la surface libre du sol connaît, cependant une variation moyenne de 0.21°C tel que représenté par les anomalies de température. Il est donc clair que face à ce forcing radiatif après ces trois cycles solaires, à Bukavu, l'on peut noter à la surface libre du sol un réchauffement climatique de 0.21°C. Ce réchauffement n'est pas trop inquiétant à l'instant relativement au constat mondial d'un réchauffement estimé actuellement à 0.5°C par le GIEC(2019) et entre 2030 et 2050 à 1.5°C. Toute fois au fil des années, après plusieurs cycles solaires, ce réchauffement risque de croître si jamais les conditions environnementales ne sont respectées.

Par ailleurs, l'air atmosphérique se refroidit de 0.065°C. Ceci s'explique par l'anomalie négative obtenue sur le calcul de l'irradiance courte et celle négligeable obtenue sur l'irradiance longue(IR) dont la moyenne est de (60.5±2.7)W/m² tel que donné par NOAH. Il conviendra de retenir que les causes seraient dues à la composition atmosphérique à laquelle nous ne faisons pas allusion dans le cadre de cette étude.

3.2 Résultats sur le modèle de simulation de l'IR

La résolution du système matricielle (11) sous Matlab, nous conduit successivement à écrire le modèle multi-varié de Lagrange en fonction des données obtenues localement, comme suit :

$$I_{r_IR} = 0.000918531207814 * Irr_g_moy + 0.001391307279526 * Irr_g_min + 59.606468521 \quad (13)$$

Et

$$I_{r_IR} = -0.11656685173511 * Irr_g_max + 0.460635185241699 * Irr_g_min - 59.04411697387 \quad (14)$$

Pendant que la première équation exprime une variation croissante de l'irradiance courte I_{r_IR} avec les irradiances $I_{r_g_moy}$ et $I_{r_g_min}$, elle décroît avec $I_{r_g_max}$.

3.3 Evolution des irradiances et des températures suivant l'échelle du temps

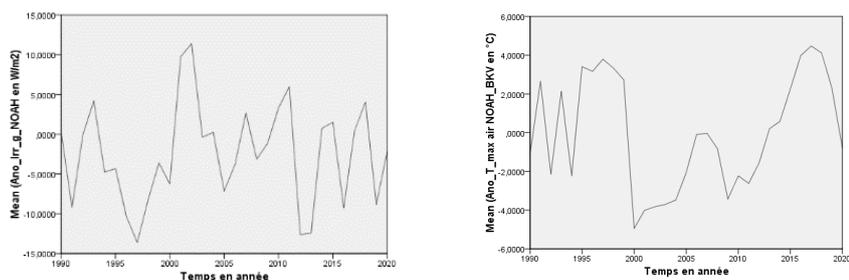


Fig.4. Graphique des anomalies de l'irradiance courte et de la température de l'air atmosphérique

Ces deux graphiques des anomalies indiquent qu'au passage dans l'air atmosphérique, à quelque différence près observée entre 1990 et 1993, la variation (respectivement la croissance et la décroissance) de l'irradiance perçue à Bukavu implique la variation de la température de l'air.

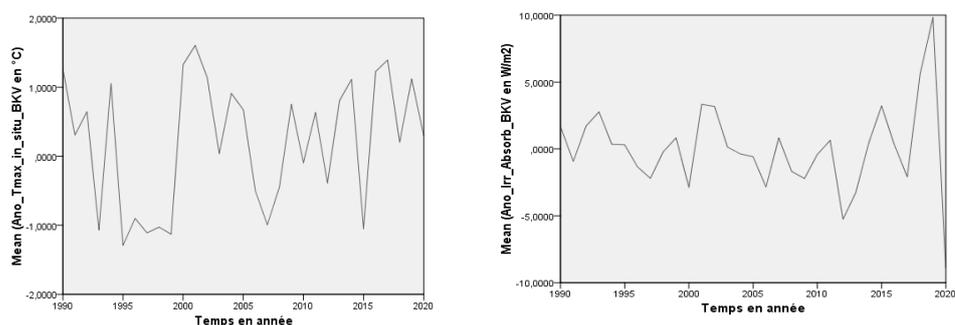


Fig.5. Graphique des anomalies de l'absorbance solaire et de la température à la surface du sol de Bukavu

Les deux graphiques indiquent comment la température et l'absorbance varient à Bukavu au fil des années. Il s'aperçoit que lorsqu'il y a une forte absorbance radiative solaire, l'air atmosphérique se réchauffe faiblement car il y a dans ce cas une faible réflexion dans les IR, qui ont un pouvoir réchauffant.

IV. Conclusion

L'irradiation solaire perçue dans une région étant à intérêt diversifié soit pour un suivi de température, énergétique ou de l'évolution végétale, il nous a plus de modélisé l'irradiance réfléchie quand on connaît sur place à travers un pyranomètre les irradiances maximales, moyenne et minimale.

A cet effet, l'étude a chuté aux résultats exprimant l'irradiance longue(IR) par la méthode polynomiale multivarié de Lagrange tels que :

$$I_{r_IR} = 0.000918531207814 * Irr_g_moy + 0.001391307279526 * Irr_g_min + 59.606468521469196$$

$$I_{r_IR} = -0.116566851735115 * Irr_g_max + 0.460635185241699 * Irr_g_min - 59.044116973876953$$

Par ailleurs, il s'aperçoit sur le 31ans, à la surface libre du sol un réchauffement d'environ 0.21°C et une absorbance moyenne ou forcing solaire de (405,26±37,75)W/m2 devant une irradiance courte de (465.85±34.14)W/m2, soit une irradiance réfléchie (IR) moyenne de (60,58±2,67)W/m2. Cependant, lorsqu'il y a une forte absorbance radiative solaire, l'air atmosphérique se réchauffe faiblement car il se remarquera dans ce cas une faible réflexion dans les IR, qui ont un pouvoir réchauffant.

Ce moindre réchauffement face à la moyenne mondiale pourrait se justifier par les conditions environnementales n'ayant pas encore subit des grandes implications anthropiques(industrialisation), qu'il est important pour des études ultérieures, d'en évaluer la teneur des causes.

Bibliographie

- [1]. DELAYGUE Gilles (2018), Variabilité de l'activité solaire et impacts climatiques : le cas des derniers siècles, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 255-0950]. <https://www.encyclopédie de l'environnement.org>. p.1748
- [2]. G.Ameli L., Alfred BASHIGE et ali (2017) « mesure locale de l'irradiance solaire pour l'évaluation de la performance de l'unité photovoltaïque installée à l'ISP/ Bukavu, RDC, Afrique Science, 13(6)(2017) 338-348.
- [3]. Alain Ricaud Jan (2011), Gisement solaire et transferts énergétiques, Cours au Master en Energies Renouvelables, Inédit, Université de CERGY-PONTOISE, p79.
- [4]. Benbouza Naima (2008) , Etude du rayonnement dans la région de Batna, Inédit, Mémoire de Magistère
- [5]. www.univ-grenoble-aples.fr
- [6]. Barriopedro D., Garcia-Herrera R.and Huth R.(2008). Solar modulation of northern Hemisphere winter blocking. *Journal of Geophysical Research*, 113(D14),D14118. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD009789>
- [7]. Vincent Daniel(2003), le rayonnement thermique et la loi du corps noir, inédit, Lyon. www.planet-terre.ens-lyon.fr
- [8]. KABASELE Y. (2019), la modélisation du fleuve Congo et marées océaniques de Muanda par climatologie spatiale, édité par la revue des Géosciences et innovation spatiale de IGC, Kinshasa.
- [9]. J.M.CIBWANA (2021) Modélisation du champ magnéto-gravifique de la terre au Sud-Kivu : contribution de la télédétection spatiale à la théorie de perturbation des constantes du globe, Thèse de Doctorat défendu et soutenu à l'UPN Kinshasa.
- [10]. M.S. CHAMAA, J.E. BIDON, P.Y. BOUREAU (1981), Atlas de la ville de Bukavu, CERUKI-ISP/Bukavu
- [11]. Jean-Pierre KASHANGABUYE et ali(2019), « changement climatique et production agricole dans la région du Sud-Kivu montagneux à l'Est de la RD Congo, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324 Vo.26 N° 2 mai 2019, pp 526-544.
- [12]. BAD (2012), les solutions pour le changement climatique, la réponse de la BAD aux impacts en Afrique, <https://www.afdb.org>
- [13]. GIEC, (2018) (2019) Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté

Alfred CHUBAKA BASHIGE, et. al. "Modélisation de l'irradiance solaire longue(IR) et Effet du Forcing solaire sur le réchauffement de l'air à Bukavu, au Sud Kivu." *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*, 10(1), (2022): pp 29-36.