

## **Similitude des forçages radiatifs des orages quotidiens et des gaz à effet de serre dans la région de l'Equateur en République Démocratique du Congo**

MINGA MILOLO Stéphane<sup>1</sup>, KABASELE YENGA-YENGA Albert<sup>1</sup>,  
LUMBUENAMO SINZI Raymond<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de physique et des sciences appliquées, Université Pédagogique Nationale (UPN), RD. Congo

<sup>2</sup>Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Kinshasa (UNIKIN), RD. Congo

---

### **Résumé :**

**Contexte :** Le forçage radiatif, qui est un déséquilibre du bilan radiatif de la Terre (BRT), résulte de la différence entre le rayonnement solaire qui pénètre notre atmosphère et le rayonnement infrarouge (Outgoing Longwave Radiation : OLR) qui en sort (GIEC, 2008). Les forçages d'origine anthropique dominent ceux d'origine naturelle, et sont en augmentation ininterrompue du fait de l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (Poitou, J. 2013). Selon IPCC (2007), les principales composantes du forçage radiatif sont : les GES (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, halocarbures), l'ozone stratosphérique et troposphérique, la vapeur d'eau stratosphérique issue du gaz méthane, l'albédo, les aérosols, le rayonnement solaire et l'effet net des facteurs anthropiques. Ces composantes induisent un forçage radiatif soit positif, soit négatif. En particulier, les GES induisent le forçage radiatif positif moyen de 2,6 W/m<sup>2</sup> (Poitou, J. 2013), l'albédo celui négatif, - 0,5 W/m<sup>2</sup> (IPCC, 2007). Dans le premier cas, il y a augmentation de la température tandis que pour le second, elle baisse. Les orages quotidiens et la nébulosité, au-dessus de l'équateur, empêchant la chaleur de s'échapper de l'atmosphère, comme les GES (Dufresne, 2002), induisent un forçage radiatif positif qui se traduit par une augmentation de la température. Cinq variables climatiques sont ainsi choisies pour le prouver : les infrarouges diffusés : Outgoing longwave radiation (OLR), l'albédo (Alb), les précipitations (PPmm), la température maximum (T<sub>x</sub>) et la température minimum de l'air (T<sub>n</sub>).

**Matériels et méthodes :** Les données climatiques sont généralement plus accessibles dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement (Bokoye, A.I., 2009). Cinq variables climatiques et pronostiques sont retenues et suivies au pas de temps mensuel et annuel, de 1990 à 2021, soit 32 ans ou 384 mois (Directives OMM, 2017). Les stations météorologiques de la METTELSAT (Agence Nationale de Météorologie et de Télédetection par Satellite) et de la RVA (Régie des Voies Aériennes) ont fourni certaines données in situ du milieu d'étude : la zone de l'Equateur en République Démocratique du Congo. Ces données in situ ont été consolidées avec celles fournies par les capteurs laser PA-II\_SD du réseau PurpleAir, installées à Bangui, capitale de la République Centrafricaine. Les produits satellitaires utilisés dans notre étude sont les produits MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) accessibles au public depuis : le site web du Centre d'archives actives distribuées (DAAC) de la NASA Level-1-2-3 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) et les produits CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System). Le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) sur la qualité de neuf échantillons a donné un indice moyen de 0,803 (Grande validité) avec une signification p-value < 0,005. Les tendances générales des variables sont tracées par le test non paramétrique de Mann-Kendall (MK).

**Résultats :** Les profils spatio-temporels des variables d'étude ont révélé respectivement des tendances : baissière pour l'albédo et les précipitations, haussière pour les OLR et la température dans la région. La modélisation ANOVA (Analysis of Variance), de très bonne signification (p<0,005), a montré le forçage radiatif positif des orages quotidiens sur les OLR. Une deuxième modélisation ANOVA, de très bonne signification (p<0,005) aussi, a prouvé l'influence des OLR sur l'augmentation de la température. La variation d(OLR)/d(PPmm) < 0 partout dans la région, varie dans l'intervalle [-0,128 W/m ; -0,023W/m]. Depuis 2015, la température est en constante augmentation et l'albédo en constante diminution [11,65% à Bikoro et 13,75% à Businga] depuis 2006.

**Conclusion :** A l'issue de cette étude consacrée à la similitude des forçages radiatifs des orages quotidiens au-dessus de l'équateur et des GES, on vient de montrer que dans la région de l'Equateur, en République Démocratique du Congo, les orages quotidiens empêchent le rayonnement thermique (OLR), dont les valeurs extrêmes sont 210 W/m<sup>2</sup> et 230 W/m<sup>2</sup>, de s'échapper de l'atmosphère, induisant autant que les GES un forçage radiatif positif. En effet, l'albédo de la région, variant entre 11.65% et 13.75%, est en nette diminution avec des anomalies dépassant +1,0% ; on note aussi la tendance haussière de la température de la région depuis 2015,

avec des anomalies de l'ordre de  $+1,5^{\circ}\text{C}$  alors que les précipitations mensuelles sont en constante baisse, passant de 180 mm à 120 mm environ.

**Mots clés:** Forçage radiatif, Albédo, ANOVA, Indice KMO, GES, Outgoing Longwave Radiation, Orages

Date of Submission: 03-04-2023

Date of Acceptance: 16-04-2023

## I. Introduction

Dans cette étude, nous voulons bien montrer que les orages quotidiens au-dessus de l'équateur (Dufresne, 2002) induisent autant que les GES un forçage radiatif positif. A cet effet, l'on profilera spatio-temporellement l'albédo et la température de la région : la baisse de l'albédo entraîne une hausse de température. Les profils spatio-temporels du rayonnement thermique (OLR) et de précipitations (PPmm) sont juxtaposés pour en déceler la cohérence temporelle.

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables à la variabilité climatique et souffrira invariablement d'un certain nombre de stress environnementaux différents. La région de l'Equateur en République Démocratique du Congo occupe une grande partie des forêts du Bassin du Congo, l'un des poumons de l'humanité.

Le forçage radiatif, appelé aussi déséquilibre du bilan radiatif de la Terre (BRT), résulte de la différence entre le rayonnement solaire qui pénètre notre atmosphère et le rayonnement infrarouge (OLR) qui en sort (GIEC, 2008). L'IPCC (2007) définit le forçage radiatif comme un changement du bilan radiatif évalué au sommet de la troposphère. Les forçages d'origine anthropique dominent ceux d'origine naturelle, et sont en augmentation ininterrompue du fait de l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (Poitou, J. 2013). Cet équilibre radiatif contrôle la température à la surface de la planète. Selon IPCC (2007), les principales composantes du forçage radiatif sont : les GES ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , halocarbures), l'ozone stratosphérique et troposphérique, la vapeur d'eau stratosphérique issue du gaz méthane, l'albédo, les aérosols, le rayonnement solaire et l'effet net des facteurs anthropiques.

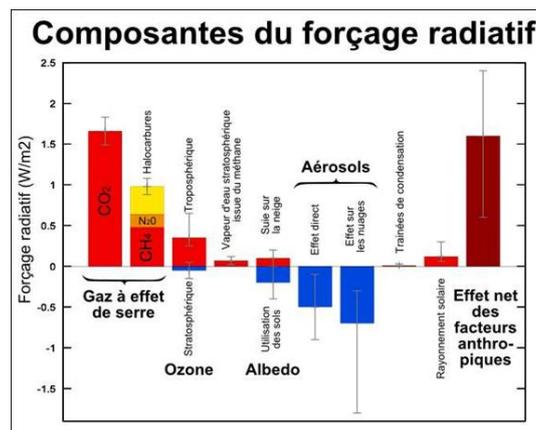


Figure 1. Composantes du forçage radiatif (Tirée de IPCC, 2007)

Les aérosols, l'ozone stratosphérique et l'albédo de l'utilisation des sols induisent un forçage radiatif négatif de 0 à  $-0.75 \text{ W/m}^2$  tandis que les gaz à effet de serre, l'ozone troposphérique, la vapeur d'eau stratosphérique, l'albédo de suie sur la neige et le rayonnement solaire induisent un forçage radiatif positif de valeur comprise entre 0 et  $1.6 \text{ W/m}^2$ . Un forçage radiatif positif entraîne une augmentation de température. Les orages quotidiens et la nébulosité dans la région de l'Equateur empêchent généralement la chaleur (OLR) de s'échapper librement (Dufresne, 2002), ce qui entraîne une augmentation de température de la terre. Les orages quotidiens produisent alors un forçage radiatif positif.

Dans cette étude sur la similitude des forçages radiatifs des GES et des orages, nous analysons les profils spatio-temporels de l'albédo (Alb), des précipitations (PPmm), des OLR et des températures maximum ( $T_x$ ) et minimum ( $T_n$ ). En effet, l'albédo devra être en nette décroissance et la température en constante augmentation pour justifier le réchauffement climatique. La régression des OLR sur les précipitations (Tang, C. et al 2023) prouvera que les orages quotidiens dans la région empêchent les OLR de s'échapper de l'atmosphère, ce qui induit un forçage radiatif positif, similaire à celui des GES.

## II. Matériels et Méthode

### 2.1. Zone de l'étude

Notre étude porte sur la « Similitude des forçages radiatifs d'orages quotidiens et de gaz à effet de serre dans la région de l'Equateur en République Démocratique du Congo ». Cette région, parmi les plus vastes du pays, comprend cinq Provinces administratives : l'Equateur, la Tshuapa, la Mongala, le Nord et le Sud Ubangi. Comprise entre les latitudes 5°N – 2°S et les longitudes 16°E – 25°E, la région de l'étude s'étend sur environ 1.000 km d'ouest en est et sur plus de 770 km du nord au sud en plein Bassin du Congo (Fig 1). Elle connaît deux types de climat : le climat équatorial qui couvre une grande partie et le climat tropical humide au nord (Fig 2).

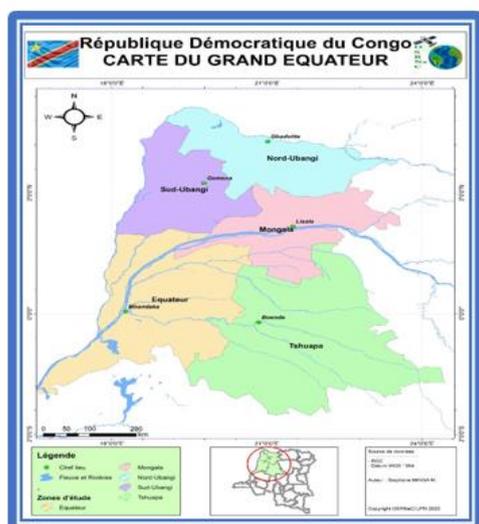


Figure 1. Milieu d'étude

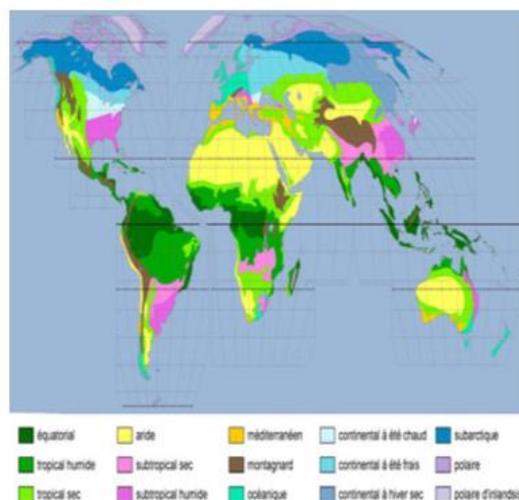


Figure 2. Climat mondial (FAO, 2013)

### 2.2. Matériels et Données

On a utilisé dans cette étude, les Capteurs PurpleAir PA-II installés à Bangui et les stations météorologiques de la METTELSAT et de la RVA installées dans le milieu d'étude, pour consolider les données sur la température et les précipitations.

Deux sources de données sont utilisées dans cette étude : l'objectif ici, a été de croiser des données climatiques des stations météorologiques précitées (in situ) avec des données issues de la télédétection spatiale.

#### a. Données météorologiques

Les stations météorologiques de la METTELSAT et de la RVA ont fourni certaines données in situ du milieu d'étude : la zone de l'Equateur en République Démocratique du Congo.

Les données in situ ont été consolidées avec celles fournies par les capteurs laser PA-II\_SD du réseau PurpleAir, installées à Bangui, capitale de la République Centrafricaine.

Enfin, toutes les données météorologiques des stations au sol ont été testées pour en vérifier la cohérence temporelle et spatiale.

#### b. Données satellitaires

Les produits satellitaires offrent aujourd'hui de nouveaux outils pour étudier l'évolution spatiale et temporelle des variables de l'étude. Ils assurent une vision horizontale en 2D et verticale en 3D des aérosols et des nuages, et offrent une couverture spatiale maximale. Dans cette étude, les produits satellitaires MODIS et CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) suivants sont utilisés :

L'instrument CERES à bord de nombreux satellites en orbite autour de la Terre enregistre le flux de rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement à ondes longues utilisé dans le bilan radiatif de la Terre. Les données MODIS, fournies deux fois par jour, sont accessibles au public depuis :

✓ le site web du Centre d'archives actives distribuées (DAAC) de la NASA Level-1-2-3 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) ;

✓ les sites de la NASA : <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, ou [modis.gsfc.gov/data/](https://modis.gsfc.gov/data/) et disponibles en trois niveaux : L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> et L<sub>4</sub>.

Elles sont distribuées sous forme de fichiers correspondant à 5 minutes d'enregistrement (Kacenenbogen, M. 2004).

▪ Les données de l'albédo sont tirées du produit : MCD43C3\_M\_BSA (MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L3 Global 0,05 Deg CMG) ;

- Celles de température du produit :MOD11\_L2 (MODIS/Terra Température de surface/Emissivité 5-Min L2 Bande 1 km) ;
- Celles des OLR sont tirées des sites : [http://ingrid.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Precipitation/Monthly OLR.html](http://ingrid.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Precipitation/Monthly%20OLR.html) et <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NCEP/CPC/GLOBAL/monthly/olr/>;
- Les données des précipitations proviennent de la mission **Global Precipitation Measurement (GPM)** de la NASA, qui offre une couverture quasi mondiale des précipitations et est mise à jour toutes les demi-heures. Produit : TRMM\_3B43

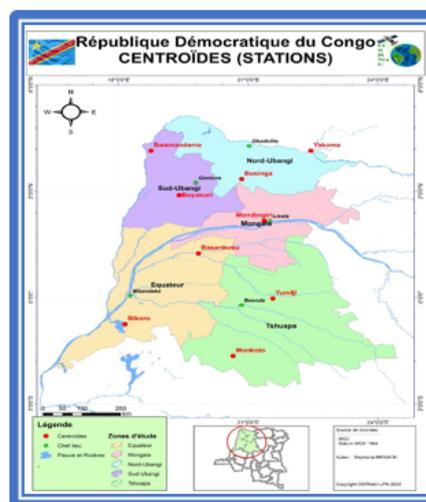
**c. Création des centroïdes**

Les observations faites dans cette étude portent sur la zone de l'Equateur dont neuf centroïdes ont été créés et associés aux localités respectives (Tableau 1) ; ils deviendront dans la suite des stations virtuelles d'observation (Christine, 2012).

**Tableau 1.** Centroïdes créés

N°	Latitude	Longitude	Nom des centroïdes	Sigle
1	1,2499	19,8499	Basankusu	Bsu
2	-0,75	18,15	Bikoro	Bro
3	2,8965	19,4005	Boyakori	Bri
4	3,3499	20,8499	Businga	Bga
5	4,1499	18,75	Bwamandema	Bma
6	2,1671	21,3723	Mondingiri	Mri
7	-1,65	20,65	Monkoto	Mto
8	4,1499	22,4499	Yakoma	Yma
9	-0,02432	21,5716	Yundji	Yji

Les neuf centroïdes repris dans le tableau 1 ci-dessus, sont de part et d'autre de la latitude nulle : six sont situées aux latitudes nord et trois aux latitudes sud, comme indiqué sur la carte de la figure 3.



**Figure 3.** Centroïdes créés

**d. Variables de l'étude**

Afin de mener à bien notre étude, cinq variables climatiques et prognostiques sont retenues et suivies au pas de temps mensuel et annuel, de 1990 à 2021, soit 32 ans ou 384 mois (Directives OMM, 2017) : l'albédo de simple diffusion (Alb), les précipitations (PPmm), les Outgoing Longwave Radiation (OLR), la température minimum de l'air (T<sub>n</sub>), la température maximum de l'air (T<sub>x</sub>).

**e. Statistiques descriptives des variables**

**Tableau 2.** Statistiques descriptives des variables

Statistiques descriptives des variables						
Variables	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Variance
1. OLR_W/ m <sup>2</sup>	3454	139,790	276,970	218,14222	15,151957	229,582
2. Albédo_ %	3456	10,611	15,301	12,98027	1,064451	1,133
3. PP_mm_ mois	3456	,000	440,600	141,35506	70,595436	4983,716
4. Tx_°C	3456	27,510	39,600	30,63050	1,382912	1,912
5. Tn_°C	3456	16,430	24,070	20,16730	,883128	,780
N valide (liste)	3456					

Sur une période de 32 ans, soit de 1990 à 2021, par variables, 3456 observations en moyenne, sont effectuées. Les valeurs extrêmes, la moyenne, l'écart type et la variance de chaque variable sont indiqués (Tableau 2). En effet, dans la région :

- La puissance moyenne des OLR est de (218.142±15.152) W.m<sup>-2</sup>, oscillant entre les valeurs de 139.790 et 276.970 W.m<sup>-2</sup> ;
- L'albédo varie entre 10.611% et 15.301%, avec une moyenne de (12.980±1.064) % ;
- Les précipitations mensuelles moyennées à (141.355±70.595) mm ;

- La température maximum moyenne est  $(30.631 \pm 1.383) ^\circ\text{C}$  ;
- La température minimum moyenne est  $(20.167 \pm 0.883) ^\circ\text{C}$ .

### 2.3. Méthode

La méthodologie adoptée s'articule autour de cinq étapes essentielles suivantes :

- Générer et créer les centroïdes d'observations avec QGIS3.22.2. Extraire des images satellitaires MODIS et Sentinel-2, les données relatives aux variables choisies et à la zone de l'étude. Faire le monitoring de cinq variables ainsi que de leurs anomalies standardisées (Scheuerer and Büermann, 2014) par la formule  $(x - \bar{x})/\sigma_x$ , aux pas mensuel et annuel.
- Tester la mesure de la qualité des échantillons obtenus par le calcul de l'indice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) : les résultats du test, pour p-value < 0,005, sont repris par (Minga, M. et al 2023).
- Profiler spatio-temporellement les cinq variables de l'étude : l'albédo, les précipitations mensuelles, les OLR, la température maximum et la température minimum de l'air, déceler les singularités dans leurs évolutions.
- Dégager les tendances générales des variables par le test non paramétrique de Mann-Kendall (MK).
- Enfin, procéder à la régression ANOVA des OLR sur les précipitations et des OLR sur la température.

## III. Résultats

Les graphiques qui suivent sont exécutés par le logiciel IBM SPSS Statistics 26.0.0 sous Windows.

### 1. Profil spatio-temporel de la température maximum

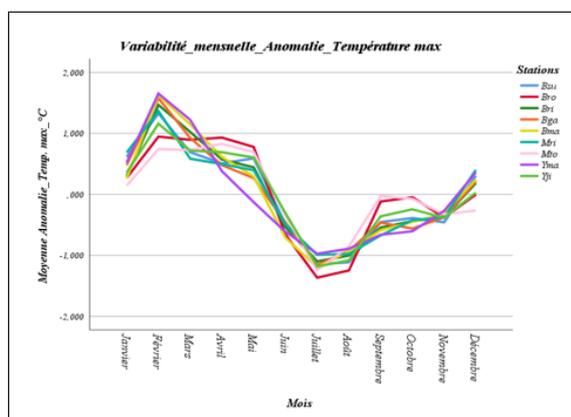


Figure 4. Variabilité mensuelle de T<sub>x</sub>

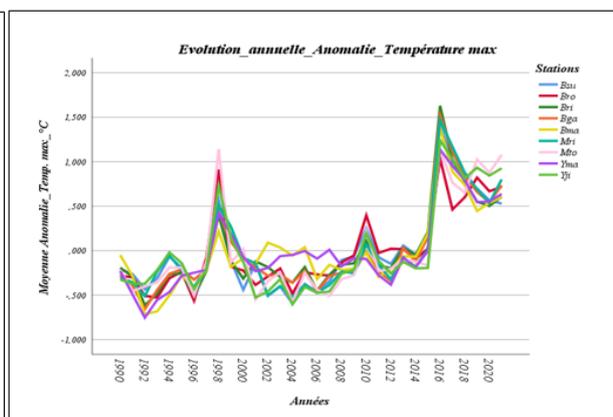


Figure 5. Variabilité interannuelle de T<sub>x</sub>

En anomalies (Fig 4), le profil mensuel de la variabilité de la température maximum est caractérisé par trois périodes : **février**, **juillet-août** et **octobre-novembre**. La première est celle de fortes chaleurs (saison humide), des anomalies avoisinant le  $1,5^\circ\text{C}$ , la deuxième (saison sèche) est celle de faibles températures avec des anomalies moyennes de  $-1,0^\circ\text{C}$ . Enfin, la dernière et l'intermédiaire affiche des anomalies négatives croissantes, environ  $-0,5^\circ\text{C}$ . Le profil annuel (Fig 5) indique une augmentation croissante de la température maximum dans la région depuis 2015, avec des anomalies dépassant  $+1,5^\circ\text{C}$  en 2017. La période 2015-2022 correspond aux huit années les plus chaudes jamais enregistrée (OMM,2022), marquant une accélération du réchauffement de la planète. Le réchauffement climatique s'accélère.



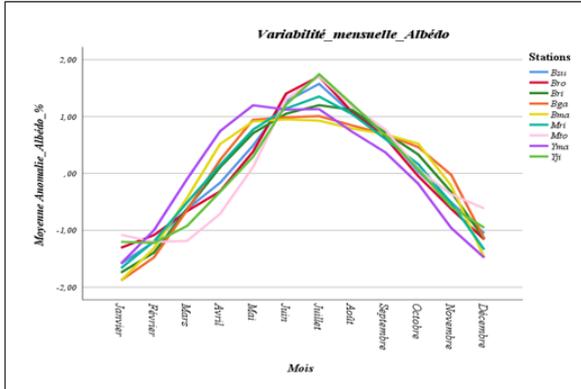


Figure 8. Variabilité mensuelle d'albédo

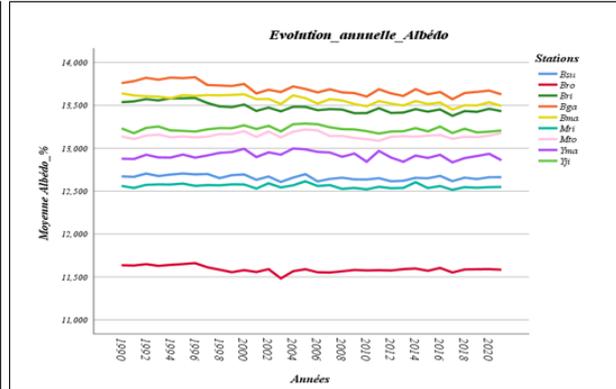


Figure 9. Variabilité interannuelle d'albédo

En profil mensuel (Fig 8), l'albédo de cette région forestière atteint le **maximum** et affiche des anomalies > 1.0% en **mai** (pour de grandes latitudes) et en **juillet** (pour de petites latitudes), périodes de forte combustion due à l'incinération des champs : la température atteint le **minimum** (Fig 4). En variabilité interannuelle, l'albédo de la région varie entre 11,65% à Bikoro et 13,75% à Businga ; la tendance générale est **baissière** depuis 2006 (Fig 10) : une indication sur le réchauffement climatique. L'albédo varie en fonction de la latitude et de la saison (notamment en raison du développement de la végétation) : grand à Businga (grande latitude) et petit à Bikoro (faible latitude).

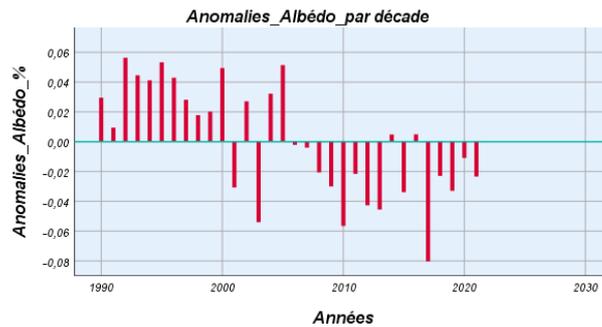


Figure 10. Tendence interannuelle d'albédo

#### 4. Profil spatio-temporel de précipitations

Les orages quotidiens au-dessus de l'équateur, aussi bien les gaz à effet de serre, empêchent les OLR (chaleur) de s'échapper de l'atmosphère (Dufresne, J.L, 2002). Il est important de dresser ici les profils spatio-temporels des précipitations (Sumit, S. et al. 2023).

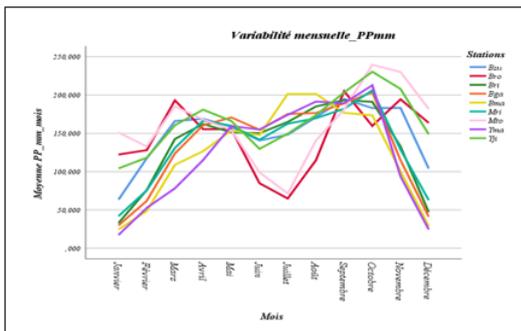


Figure 11. Variabilité mensuelle des précipitations PP

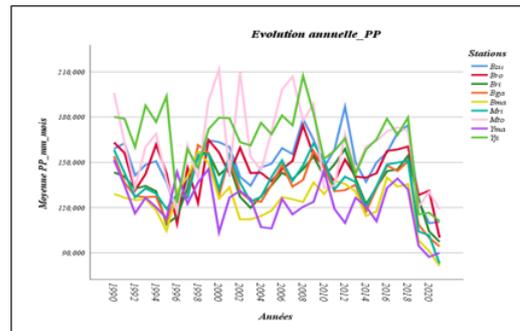


Figure 12. Variabilité interannuelle des précipitations PP

L'évolution mensuelle des précipitations (Fig 11) à l'allure de la lettre **M**, est marquée par trois périodes caractéristiques : **mars-avril**, **juin-juillet** et **septembre-octobre**. La première et la dernière caractérisent respectivement la petite et la grande saison humide, les précipitations mensuelles dépassent les 150 mm. La seconde caractérise la saison sèche avec un léger faiblissement des précipitations en dessous de 150 mm mensuel, à Bikoro et Monkoto (avec 60 mm mensuel). La distribution latitudinale est remarquable.

Le profil annuel (Fig 12) des précipitations indique une baisse remarquable de précipitations, d'environ 60 mm, depuis 2010 environ, passant de 165 mm en 2010 à 105 mm en 2021 environ, dans toute la région.

### 5. Profil spatio-temporel des OLR

L'évolution spatio-temporelle des outgoing longwave radiation (OLR) : le rayonnement sortant à grande longueur d'onde, rayonnement électromagnétique de basse énergie émis de la Terre (rayonnement thermique), des océans et de l'atmosphère vers l'espace dans le domaine infrarouge, est un élément critique du bilan radiatif terrestre (Schifano, L. et al. 2021). Les OLR sont en hausse depuis 1985 et correspondent bien à la hausse de la température mondiale (Dewitte, S. and Clerbaux, N. 2018) (Fig 14). Aux grandes latitudes (Fig 13 et 14), ils sont faibles : la distribution latitudinale est respectée (Tang, C. et al 2023).

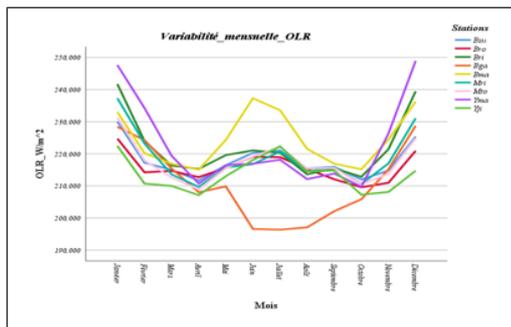


Figure 13. Variabilité mensuelle des OLR

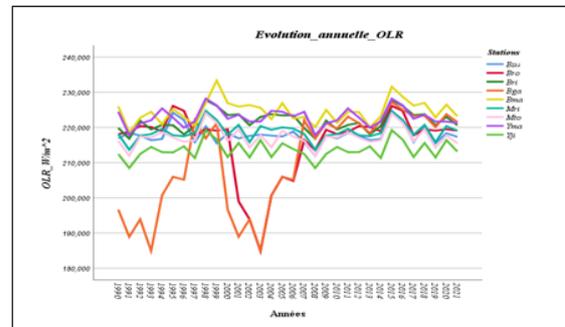


Figure 14. Variabilité interannuelle des OLR

Le profil mensuel de la variabilité des infrarouges (Fig 13), en forme de la lettre **w**, présente quatre périodes correspondant respectivement aux pics up en **décembre-janvier** (222 à 248 W.m<sup>2</sup>), **juin -juillet** (220 W.m<sup>2</sup> environ) et aux pics down en **avril et octobre** (210 W.m<sup>2</sup> environ). Les écarts en allure observés aux stations de Bwamandema et Businga entre avril et octobre (Fig 13 et 14) sont dus probablement au défaut d'observation. Le profil mensuel est marqué enfin par la saisonnalité : **avril et octobre**.

### 6. Modélisation de l'interaction OLR – Précipitations

Après avoir tiré des renseignements sur les profils temporels des cinq variables de l'étude, aux pas mensuels et annuels, nous procédons à la régression ANOVA des OLR sur les précipitations (Amit, K. et al 2021), (Amit, K. 2022) pour confirmer le blocage des OLR par les orages quotidiens.

Le modèle indiqué est décrit dans les tableaux 4 et 5 ci-dessous. En effet, il est de très bonne signification ( $p < 0,005$ ) et le poids négatif des précipitations ( $\beta < 0$ ) illustre bien la réduction des OLR.

Tableau 4. Modélisation (ANOVA) de l'interaction PPmm – OLR à Basankusu

Coefficients <sup>a,b</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	226,331	1,148		197,099	,000
	PP_mm_mois	-,056	,007	-,376	-7,929	,000
a. Variable dépendante : OLR_W/m^2						
b. Sélection exclusive des observations pour lesquelles Stations = Bsu						

$$OLR = 226,331 - 0,056 PP = \epsilon - 0,056 PP \tag{3}$$

Tableau 5. Modélisation (ANOVA) de l'interaction PPmm – OLR à Bikoro

Coefficients <sup>a,b</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	221,854	2,096		105,839	,000
	PP_mm_mois	-,042	,013	-,160	-3,164	,002
a. Variable dépendante : OLR_W/m^2						
b. Sélection exclusive des observations pour lesquelles Stations = Bro						

$$OLR = 221,854 - 0,042 PP = \epsilon - 0,042 PP \tag{4}$$

Pour le reste de stations, la modélisation ANOVA donne :

- A Boyakori : OLR = 235,598 – 0,102 PP =  $\epsilon$  – 0,102 PP
- A Businga : OLR = 226,898 – 0,122 PP =  $\epsilon$  – 0,122 PP
- A Bwamandema : OLR = 227,798 – 0,026 PP =  $\epsilon$  – 0,026 PP
- A Mondingiri : OLR = 229,651 – 0,080 PP =  $\epsilon$  – 0,080 PP
- A Monkoto : OLR = 221,020 – 0,023 PP =  $\epsilon$  – 0,023 PP

- A Yakoma : OLR = 238,463 – 0,128 PP = ε – 0,128 PP
- A Yundji : OLR = 218,900 – 0,032 PP = ε – 0,032 PP

de sorte que la variation des OLR avec les orages  $d(OLR)/d(PPmm) < 0$  dans toute la région. Les orages quotidiens empêchent les OLR (rayonnement thermique) de s'échapper de l'atmosphère, d'où l'augmentation de la température.

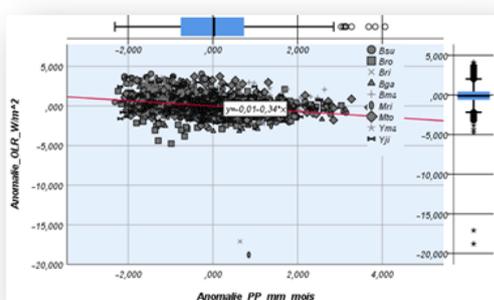


Figure 15. Régression de Précipitations sur les OLR

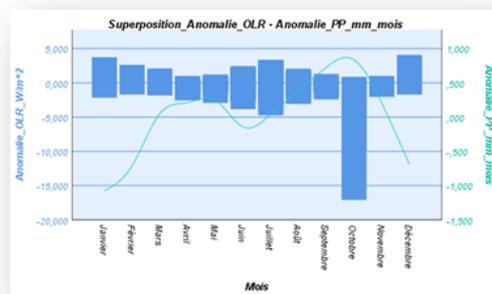


Figure 16. Superposition anomalies OLR-PPmm

La superposition mensuelle avec abscisses catégorielles ci-dessus (Fig 16) illustre la réduction de la chaleur par les précipitations. En octobre, période de fortes précipitations, les anomalies OLR atteignent exceptionnellement – 17 W/m<sup>2</sup>.

Tableau 6. Corrélation de Pearson OLR-PPmm

Corrélations			
		OLR_W/m^2	PP_mm_mois
OLR_W/m^2	Corrélation de Pearson	1	-,343**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	3454	3454
PP_mm_mois	Corrélation de Pearson	-,343**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	3454	3456

\*\* : La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

La corrélation de Pearson entre les OLR et les précipitations est significative au niveau 0,01 (bilatéral), soit - 0,343, confirmant ainsi le forçage radiatif positif des orages quotidiens.

En profil mensuel croisé (Fig 17), les orages quotidiens dans la région empêchent généralement la chaleur (OLR) de s'échapper librement : les courbes s'entremêlent (Dufresne, 2002).

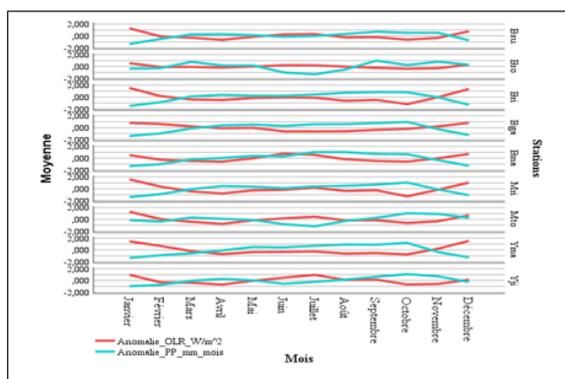


Figure 17. Profil mensuel croisé de l'interaction OLR – Précipitations

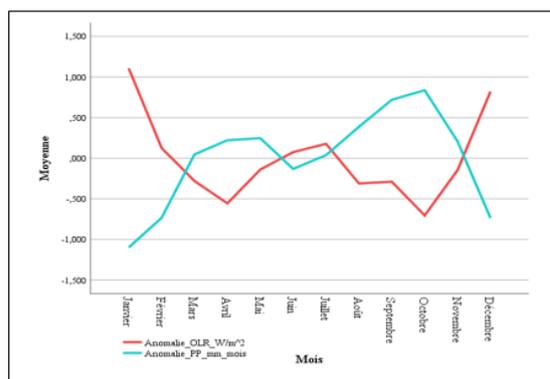


Figure 18. Profil mensuel global croisé OLR – Précipitations

En mars-avril et en septembre-octobre, périodes de fortes précipitations, les anomalies des OLR atteignent leurs valeurs minima : - 0.5 W/m<sup>2</sup> et - 0.7 W/m<sup>2</sup>(Fig 18) : réduction des OLR par les précipitations.

**7. Modélisation ANOVA de l'effet des OLR sur la température**

La modélisation ANOVA de l'effet des OLR sur la température a pour but de montrer l'augmentation de celle-ci avec les OLR bloqués par les orages, et on aura démontré que les orages quotidiens induisent un forçage radiatif positif comme celui des GES.

**Tableau 7.** Modélisation OLR-Température maximum

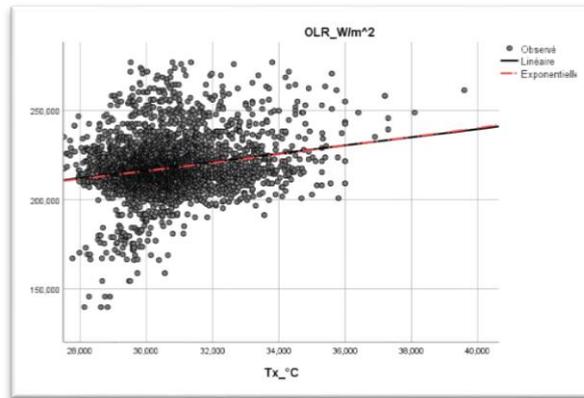
Coefficients					
	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
	B	Erreur standard	Bêta		
T <sub>x</sub> °C	,011	,001	,209	12,545	,000
(Constante)	157,570	4,059		38,818	,000

La variable dépendante est ln (OLR\_ W/m^2)

$$\ln(OLR) = 0,011T_x + 157,570 \tag{6}$$

Le modèle du tableau 7, de très bonne signification (p<0,005), montre la dépendance des OLR sur la température T<sub>x</sub> (β>0). Le rayonnement thermique augmente avec la température selon la régression (6) illustrée sur la courbe d'ajustement des OLR par la température (Fig18) (Tang, C. et al 2023).

$$OLR(W/m^2) = e^{0,011T_x+157,570} = e^{BT_x+Cte} \tag{7}$$



**Figure 18.** Courbe d'ajustement des OLR par la température

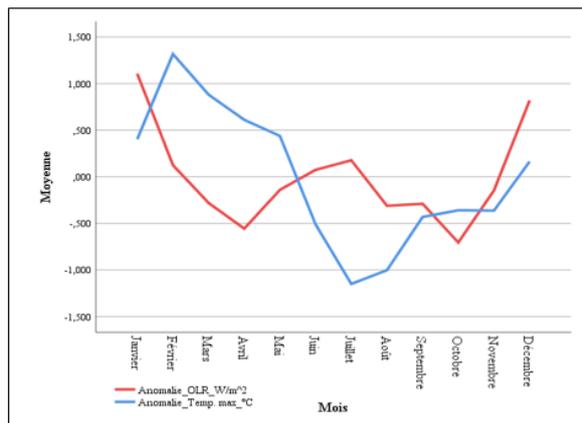
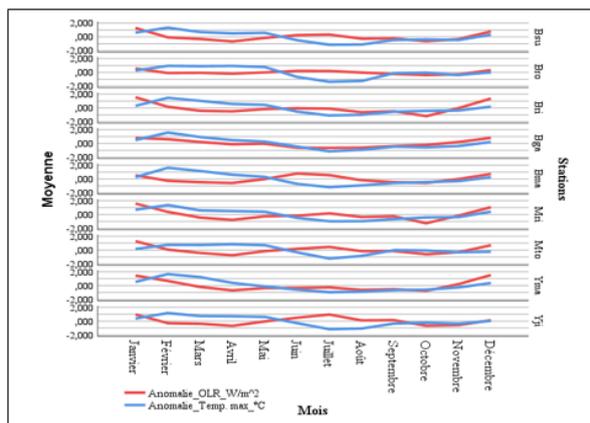
Il ne reste qu'à déterminer le degré de corrélation entre 3454 observations des OLR et 3454 observations de la température maximum dans la région, avec une très bonne signification bilatérale, p-value <0,000.

**Tableau 8.** Corrélation de Pearson OLR-Tx

Corrélations			
		OLR_ W/m^2	T <sub>x</sub> °C
OLR_ W/m^2	Corrélation de Pearson	1	,209**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	3454	3454
T <sub>x</sub> °C	Corrélation de Pearson	,209**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	3454	3456

\*\*. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

La corrélation de Pearson entre les OLR et la température maximum est significative au niveau 0,000 (bilatéral), soit 0,209, confirmant ainsi l'action positive des OLR sur la température et par conséquent le forçage radiatif positif des orages quotidiens.



**Figure 19.** Profil mensuel croisé de l'interaction OLR – Tx **Figure 20.** Profil mensuel global croisé OLR – Tx

La tendance générale de la température (Fig 19 et 20) est à la hausse lors du blocage des OLR par les orages en avril et en octobre, dans la région de l'Equateur.

#### IV. Discussion

La modélisation ANOVA OLR-Précipitation, avec une très bonne signification ( $p\text{-value} < 0,005$ ) et le poids négatif des précipitations ( $\beta < 0$ ) illustre bien la réduction des OLR (chaleur) par les précipitations. La modélisation ANOVA OLR-Température, de très bonne signification ( $p\text{-value} < 0,005$ ), avec le poids positif ( $\beta > 0$ ) de température illustre le forçage radiatif positif dû aux orages quotidiens. En octobre, période de fortes précipitations, les anomalies OLR atteignent exceptionnellement  $-17 \text{ W/m}^2$ . La variation des OLR s'oppose à celle des précipitations dans toute la région,  $d(OLR)/d(PPmm) < 0$ , plus petite à Yakoma ( $-0,128 \text{ W/m}$ ) et plus grande à Monkoto ( $-0,023 \text{ W/m}$ ).

#### V. Conclusion

A l'issue de cette étude consacrée à la similitude des forçages radiatifs des orages quotidiens au-dessus de l'équateur et des GES, on vient de montrer que dans la région de l'Equateur, en République Démocratique du Congo, les orages quotidiens empêchent le rayonnement thermique (OLR), dont les valeurs extrêmes sont  $210 \text{ W/m}^2$  et  $230 \text{ W/m}^2$ , de s'échapper de l'atmosphère, induisant autant que les GES, un forçage radiatif positif. En effet, l'albédo de la région, variant entre 11.65% et 13.75% est en nette diminution avec des anomalies dépassant +1,0% ; on note aussi la tendance haussière de la température de la région depuis 2015, avec des anomalies de l'ordre de  $+1,5^\circ\text{C}$  alors que les précipitations mensuelles sont en constante baisse, passant de 180 mm à 120 mm environ.

#### Références

- [1]. Amit Kumar, P. Parth Sarthi And Amita Kumari. Observed rainfall events and outgoing longwave radiation over contrasting river basins in Bihar, India. MAUSAM, 73, 2 (April 2022), 273-282 DOI : <https://doi.org/10.54302/mausam.v73i2.5478>
- [2]. Amit Kumar, P. Parth Sarthi, Amita Kumari, Ashutosh K Sinha. Observed Characteristics of Rainfall Indices and Outgoing Longwave Radiation over the Gangetic Plain of India. Pure and Applied Geophysics volume 178, pages 619–631 (2021)
- [3]. A. T. Sandjon, A. Nzeukou, C. Tchawoua. Intraseasonal atmospheric variability and its interannual modulation in Central Africa. Meteorol Atmos Phys (2012) 117 :167–179 DOI 10.1007/s00703-012-0196-6
- [4]. Cattiaux, J. 2014. Utilisation des statistiques en climat : un panorama. GAME | CNRS/Météo-France Toulouse
- [5]. Christine Thomas-Agnan 2012. Analyse statistique des données spatiales I. Toulouse School of Economics
- [6]. Chubaka, B.A., Kabasele, Y. Y.A., Mugumaoderha, C.M., Kamgang, S.B., Estimation et Modélisation de l'irradiation solaire globale journalière perçue sur un plan horizontal à Bukavu. Doi : 10.9790/4861-1401021324. www.iosrjournals.org
- [7]. Dewitte, S., Clerbaux, N. Decadal Changes of Earth's Outgoing Longwave Radiation. Remote sensing. 2018, 10, 1539 ; doi : 10.3390/rs10101539
- [8]. Doucouré, B.F. 2021. Analyse des séries temporelles : Etudier la dynamique d'une variable. Université Cheik Anta Diop de Dakar. Sénégal
- [9]. Dufresne J.L. (2000) La Physique du climat. Editions Le Pommier, Paris
- [10]. Dufresne J.L. (2002) La Physique de l'atmosphère. Editions Le Pommier, Paris
- [11]. Dufresne, J.L. 2007. Bilan énergétique de la Terre et rôle de l'effet de serre. CNRS/Université Pierre Marie Curie
- [12]. Fouquart, Y. 2003. Le climat de la Terre. Presses universitaires du Septentrion
- [13]. GIEC : Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse, 2008
- [14]. GIEC : Synthèse du rapport AR6, 2022
- [15]. IPCC. The Physical Science Basis ; Cambridge University Press : Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013.

- [16]. J M Rajab, I S Abdulfattah, H A Mossa and S Y Sleeman. Spatial and Temporal Distributions of Outgoing Longwave Radiation over Iraq : 2007 – 2016. IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering **454** (2018) 012030 doi :10.1088/1757-899X/454/1/012030
- [17]. Jacquemoud S., (2006), Physique de l’atmosphère, Télédétection et Géophysique spatiale, L3 Géosciences fondamentales, Université Paris 7- Denis Diderot
- [18]. Lumbuenamo, S.R., Eric Lutete, L.E., Nkambu, M. G., Nsimba, N. E. Bathymétrie, évaluation de la sédimentation et du recul des berges dus à l’érosion sur l’Île de Mateba au Kongo central en République Démocratique du Congo. Revue Africaine d’Environnement et d’Agriculture 2021 ; 4(4), 2-15 <http://www.rafea-congo.com>
- [19]. Ménégos, M. 2009. Modélisation globale des interactions atmosphère-aérosols (Thèse de doctorat). Université de Toulouse
- [20]. Minga, M.S. et al. 2023. Analyse en composantes principales des interactions entre le rayonnement, les aérosols, les nuages et le couvert végétal dans la région de l’Equateur, en République Démocratique du Congo, Doi :10.9790/4861-1401021324. [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org)
- [21]. Nabat, P. 2016. Interactions aérosols-rayonnement-nuages et variabilité climatique en Méditerranée (Thèse de doctorat). Université de Toulouse
- [22]. Nsimba Ngembo, E., Lumbuenamo Nsinsi, R., Ndembo Longo, J. 2022. Anthropisation et changement d’occupation du sol. Editions Universitaires Européennes
- [23]. OMM (N° 1090). 2012. Guide d’utilisation de l’indice de précipitations normalisé
- [24]. Poitou, J. 2013. Composition atmosphérique et bilan radiatif. Reflets de la Physique n° 33, 28-33. <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/201333028>
- [25]. Scheuerer, M. et Büermann, L. 2014. Spatially Adaptive Post-Processing of Ensemble Forecasts for Temperature. *Journal of the Royal Statistical Society Series C Applied Statistics* 63(3)DOI: 10.1111/rssc.12040
- [26]. Schifano, L., Smeesters, L. ; Berghmans, F. ; Dewitte, S. Wide-Field-of-View Longwave Camera for the Characterization of the Earth’s Outgoing Longwave Radiation. *Sensors* **2021**, 21, 4444. <https://doi.org/10.3390/s21134444>.
- [27]. Stafford, J. et Bodson, P. 2006. L’analyse multivariée avec SPSS. Presses de l’Université du Québec
- [28]. Sumit, S., Srivastava, A., Er. Avneet Kaur. Prediction Rainfall with Regression Analysis International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) ISSN : 2321-9653 ; IC Value: 45.98; SJ Impact Factor: 7.538 Volume 11 Issue III Mar 2023
- [29]. Tang, C. ; Liu, D.; Tian, X.; Zhao, F.; Dai, C. The Variations of Outgoing Longwave Radiation in East Asia and Its Influencing Factors. *Atmosphere* **2023**, 14, 576. <https://doi.org/10.3390/atmos14030576>
- [30]. Thibault, V. - G., Chepfer, H., Noel, V., Guzman, R., Dubuisson, P. David M. Winker, D.M., Kato, S. The link between outgoing longwave radiation and the altitude at which a spaceborne lidar beam is fully attenuated. *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 4659–4685, 2017. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4659-2017>
- [31]. V. O. John, S. A. Buehler, A. von Engeln, P. Eriksson, T. Kuhn, E. Brocard and G. Koenig-Langlo. Understanding the variability of clear-sky outgoing long-wave radiation based on ship-based temperature and water vapour measurements *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2006), **132**, pp. 1–17 doi : 10.1256/qj.05.70

MINGA MILOLO Stéphane, et. al. “Similitude des forçages radiatifs des orages quotidiens et des gaz à effet de serre dans la région de l’Equateur en République Démocratique du Congo.” *IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, 15(2), 2023, pp. 55-66.