

ARTICLE DE RECHERCHE

Article Info.:

Reçu : le 29/11/2025

Accepté : le 01/02/2026

Publié : le 16/02/2026

CONTRASTES MARQUÉS DU CYCLE DIURNE DE L'ACTIVITÉ D'ÉCLAIRS À DEUX ECHELLES SPATIALES DIFFÉRENTES DANS LE BASSIN DU CONGO

Jean Kigotsi Kasereka ^{1,*}, Elie W'ishe Sorongane ¹, Emmanuel Ndiadia kandolo ¹, Albert Kazadi Mukenga Bantu ¹, Louis Kongoda Lisika ¹

<https://doi.org/10.70237/jafrisci.2026.v3.i2.01>

Resumé

Cette étude fournit une caractérisation multi-échelle du cycle diurne de l'activité d'éclair dans le bassin du Congo en utilisant les données du réseau WWLLN (2013–2022). À l'échelle de 5°déc, la zone d'étude apparaît formée de trois ensembles de secteurs différenciés par le maximum du taux horaire d'éclairs. Il y a des secteurs à forte activité ($\text{Max} \geq 25000$ éclairs/h), des secteurs à faible activité ($\text{Max} < 15000$ éclairs/h) et des secteurs à moyenne activité ($15000 \text{ éclairs/h} \leq \text{Max} < 25000$ éclairs/h). Mais à cette échelle, les contrastes s'expriment aussi par les différences des ratios (maximum/minimum) variant entre 3 et 42, mais aussi par les écarts des valeurs maximales variant de 7908 éclairs/h à 53744 éclairs/h, et des valeurs minimales comprises entre 434 éclairs/h et 4181 éclairs/h. À l'échelle de 0,3°déc, des cycles diurnes réguliers contrastent avec l'inexistence de cycles dans certains cas et l'existence des cycles singuliers (maximums nocturnes) ou perturbés dans d'autres cas. Les contrastes spatio-temporels marqués observés ne peuvent pas être expliqués par le cycle d'insolation seul : des facteurs locaux tels que la physiographie, ou les brises terre-lac doivent jouer un rôle.

Mots clés : Contrastes spatio-temporels, Cycle diurne, Activité d'éclairs, Bassin du Congo.

Abstract

This study provides a multi-scale characterization of the diurnal cycle of lightning activity in the Congo Basin using WWLLN data (2013–2022). At the 5°dec scale, the study area appears to be composed of three clusters of sectors differentiated by the maximum of the hourly lightning rate. There are high-activity sectors ($\text{Max} \geq 25,000$ flashes/h), low-activity sectors ($\text{Max} < 15,000$ flashes/h), and medium-activity sectors ($15,000 \text{ flashes/h} \leq \text{Max} < 25,000$ flashes/h). But at this scale, contrasts are also expressed through differences in the ratios (maximum/minimum) ranging from 3 to 42, as well as by the differences in maximum values ranging from 7,908 flashes/hour to 53,744 flashes/hour, and minimum values between 434 flashes/hour and 4,181 flashes/hour. At the 0.3°dec scale, regular diurnal cycles contrast with the absence of cycles in some cases, and the presence of atypical or disturbed cycles in other cases. The observed pronounced spatio-temporal contrasts cannot be explained by the insolation cycle alone: local factors such as physiography, or land-lake breezes must play a role.

Key words : Spatial-temporal contrasts, Diurnal cycle, Lightning activity, Congo Basin

1. Introduction

Étant donné que l'activité d'éclairs est causée par l'activité électrique des systèmes convectifs, et renseigne de ce fait sur la convection profonde, la caractérisation de son évolution diurne est d'une importance cruciale. Le cycle diurne de la convection, tout comme son cycle saisonnier, peut renseigner sur la variabilité du système climatique global [1]. De plus, le réchauffement climatique entraînera l'accroissement de la fréquence des éclairs [2].

Pour l'Afrique Equatoriale, il existe un lien entre le cycle diurne de la régénération et la propagation des systèmes

convectifs de Mésos-échelle, le cycle diurne des précipitations, le cycle diurne de la distribution des surfaces des sommets les plus froids de nuages d'orages et le cycle diurne de l'activité d'éclair [3–6]. Tous ces cycles sont sans doute connectés au cycle de l'insolation car la convection est souvent initiée par l'instabilité de la couche limite atmosphérique, provoquée par l'irradiation solaire l'après-midi [7–9].

Du reste, le cycle diurne de l'activité d'éclair observé dans le bassin du Congo est typique de l'évolution journalière caractéristique des régions continentales [5]. En effet, cette évolution, qui est expliquée par le cycle de l'insolation, a également été mise en évidence dans différentes régions de la

Correspondance : louis.kongoda@unikin.ac.cd (L. K. Lisika)

Copyright : © The Author(s) Published under a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (CC BY 4.0)

¹ Mention Physique et technologie, Faculté des Sciences et technologies, Université de Kinshasa, République Démocratique du Congo

planète [10–12], en particulier dans les régions tropicales du monde entier [13].

Néanmoins, nonobstant la similarité observée dans l'évolution diurne de l'activité d'éclair dans plusieurs régions continentales dans le monde, certains auteurs (par exemple, [14–16]) ont observé des contrastes marqués. Les irrégularités remarquées pour l'évolution journalière des taux horaires d'arcs d'éclairs autour des fortes concentrations localisées (hotspots), déterminées sur tous les continents, constituent un exemple de ces contrastes [14]. Le contraste plus prononcé entre le maximum et le minimum journaliers dans une zone du maximum principal de densité d'éclairs identifiée dans le bassin du Congo constitue un autre exemple [16]. Ces exemples montrent la pertinence de caractériser l'évolution diurne de l'activité d'éclairs à différentes échelles spatiales car ces contrastes ont été constatés à deux échelles différentes.

Dans cette étude, les contrastes spatio-temporels du cycle

diurne des activités d'éclairs sont analysés avec les données du réseau World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Deux résolutions spatiales sont utilisées sur la période 2013–2022 : $5^{\circ}\text{dec} \times 5^{\circ}\text{dec}$ et $0.3^{\circ}\text{dec} \times 0.3^{\circ}\text{dec}$. L'objectif était de mettre en évidence les disparités à ces deux échelles spatiales à l'aide des indicateurs statistiques clés.

2. Matériels et méthodes

2.1 Zone d'étude et données

Délimitée entre les latitudes 10°S et 15°N , et les longitudes 10°E et 35°E [5–6,16–17], notre zone d'étude couvre le bassin du Congo et plusieurs pays de l'Afrique équatoriale (Fig.1). Cette région mérite l'attention car elle pourrait être vulnérable au réchauffement climatique [2] étant donné qu'elle est caractérisée par la plus grande fréquence d'éclairs au monde [18–21].

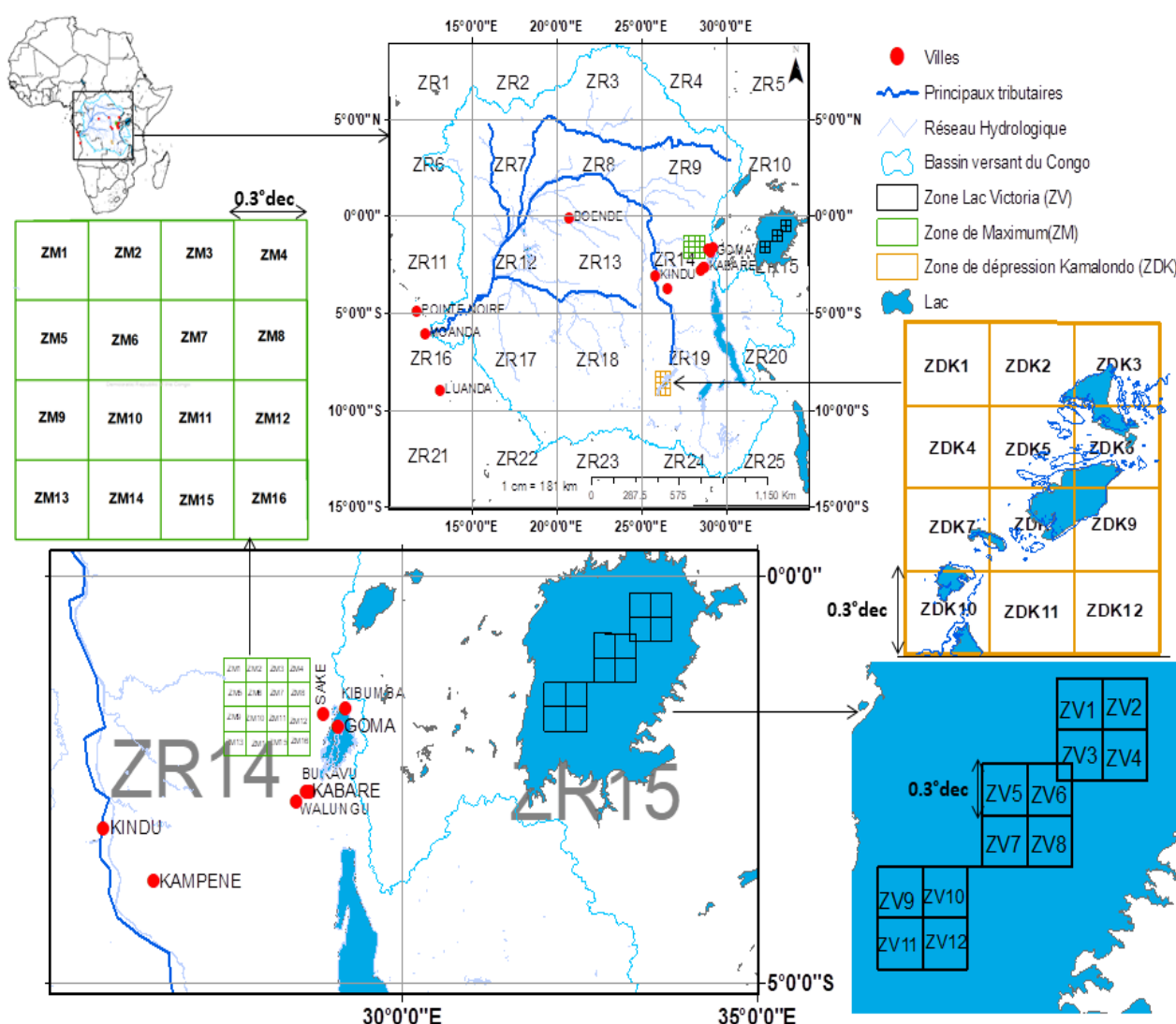


Fig.1. Localisation de la zone d'étude au centre du continent africain. La zone d'étude est subdivisée en 25 zones réduites (notées ZR1 à ZR25) de $5^{\circ}\text{dec} \times 5^{\circ}\text{dec}$. Trois zones spécifiques subdivisées en sous-zones de $0.3^{\circ}\text{dec} \times 0.3^{\circ}\text{dec}$ font l'objet d'un zoom : sur le Lac Victoria (Zone Lac Victoria (ZV)), sur la vallée de dépression de Kamalondo (Zone de dépression Kamalondo (ZDK)) et la zone du maximum principal de densité des éclairs (Zone de Maximum (ZM)) sur les hauts plateaux du Rift est-africain en République Démocratique du Congo (R.D.Congo). Ces trois zones sont complétées par d'autres mailles de $0.3^{\circ}\text{dec} \times 0.3^{\circ}\text{dec}$ pour couvrir les localités urbano-rurales signalées en rouge. L'ensemble est superposé aux couches : du réseau hydrographique, des principaux tributaires, des Lacs ainsi qu'à la délimitation du bassin versant du fleuve Congo.

Son importance est également mise en évidence à l'échelle mondiale par l'identification de six des dix hotspots détectés sur la planète [14].

La présente étude exploite des séries temporelles de 10 ans (2013–2022), avec une résolution horaire, des données d'éclairs provenant du réseau mondial WWLLN. Les capteurs de ce réseau détectent les radiations électromagnétiques de très basse fréquence (VLF), appelées sferics. Ces signaux sont émis par les arcs des éclairs [22–23]. Les sources de ces signaux sont alors localisées en utilisant la technique basée sur la différence du temps d'arrivée désignée par l'acronyme TOGA [24]. Les stations abritant ces capteurs peuvent être séparées par des milliers de kilomètres car les fréquences VLF peuvent se propager dans le guide d'ondes Terre-ionosphère avec très peu d'atténuation [22–23].

Deux niveaux d'analyse spatiale des données WWLLN ont été définis :

- Une grille de $5^{\circ}\text{dec} \times 5^{\circ}\text{dec}$ permettant une vision régionale étendue, subdivisant la zone d'étude en 25 zones rectangulaires (ZR1 à ZR25), comme illustré sur la Fig.1;
- Une grille fine de $0,3^{\circ}\text{dec} \times 0,3^{\circ}\text{dec}$ utilisée pour les localités spécifiques à forte densité d'éclairs ou à comportement atypique, telles que les sous-zones définies sur le lac Victoria, dans la vallée de la dépression de Kamalondo, ou dans la zone de maximum de densité d'éclairs mais aussi pour couvrir quelques zones urbano–rurales (Fig.1).

Les données WWLLN ont été utilisées dans la climatologie des éclairs [5, 16, 23, 25], pour étudier l'activité orageuse dans le bassin du Congo [6], pour caractériser l'activité d'éclair [17, 26–27], pour décrire les processus physiques liés aux activités convectives dans les cyclones tropicaux [28–30]. Chaque fichier présentant les données WWLLN couvrant une année entière est assimilable à une gigantesque matrice constituée de plusieurs millions de lignes et de huit colonnes correspondant à huit paramètres notamment l'année, le mois, le jour, l'heure, la minute, la seconde, la latitude et la longitude. Des programmes ont été conçus pour exploiter ces matrices colossales.

2.2 Efficacité de détection du réseau WWLLN

Le réseau WWLLN fournit une couverture quasi-globale depuis 2004, avec une amélioration continue de son efficacité de détection (DE) sur toute la planète, et particulièrement en Afrique centrale [31]. Ce réseau est l'un des outils de suivi les plus efficaces de l'activité d'éclairs pour le bassin du Congo. Il compense le manque d'instruments au sol dans cette zone.

Toutefois, son DE dépend directement de l'intensité du courant de décharge. Le réseau capte la quasi-totalité des éclairs dépassant 100 kA [31]. À l'inverse, cette performance chute fortement pour les éclairs de faible intensité. Bien que les puissants éclairs générés par les orages à forte extension verticale favorisent la DE d'éclairs nuage–sol au détriment des décharges intra–nuageuses, la densité globale d'éclairs nuage–sol reste faible, se situant entre 10 % et 20 % [32].

Néanmoins, l'ajout de nouvelles stations en Afrique a permis de réduire les erreurs de localisation géographique de DE. Notons que la DE du réseau WWLLN pour la région d'étude a été examinée en détail dans la littérature ([5], [16], [32]).

2.3 Choix des sous–zones à $0,3^{\circ}\text{dec}$ de résolution

Il a été démontré que le cycle diurne est fortement influencé par les phénomènes de brises terre–lac et montagne–vallée qui induisent la convection profonde la nuit. Ce sont les différences de températures, sur deux surfaces qui ne se refroidissent pas à la même vitesse, qui engendrent un gradient de pression et un gradient de température déclenchant l'advection de l'air. En se produisant autour du lac, ce phénomène de brise engendre la convergence de masses d'air au-dessus du lac, ce qui peut favoriser les ascendances de masses d'air humides et provoquer la convection pour aboutir à la formation d'orages pendant la nuit [3–4, 33–35]. Par conséquent, nous avons sélectionné deux zones d'étude pour mettre en évidence ces phénomènes. Elles couvrent respectivement le lac Victoria (ZV) et un complexe marécageux incluant les lacs Upemba et Kisale (ZDK). Leurs emplacements géographiques ainsi que leurs subdivisions sont présentés à la Fig.1. Une troisième zone, notée ZM, a été sélectionnée en raison des points chauds (hotspots) identifiés [14, 21] ; elle est également mise en évidence à la Fig.1.

D'autre part, pour analyser les contrastes de l'activité diurne des éclairs dans les localités urbano–rurales, nous avons sélectionné des grilles de $0,3^{\circ}\text{dec} \times 0,3^{\circ}\text{dec}$ du réseau WWLLN couvrant ces localités en utilisant deux approches.

Premièrement, une sélection basée sur la configuration spatiale :

- Localités à latitudes et à longitudes proches ;
- Localités à latitudes proches mais longitudes différentes ;
- Localités à longitudes proches mais latitudes différentes.

Deuxièmement, nous avons ciblé des sites spécifiques pour isoler l'influence des phénomènes de brise. Ce choix porte sur les hauts plateaux du Rift (rives du lac Kivu et pied des volcans), ainsi que sur les localités côtières de Pointe–Noire, Moanda et Luanda. Enfin, la localité de Boende a été retenue pour sa position équatoriale, tandis que deux localités riveraines du Lualaba ont été choisies pour illustrer l'effet des brises fluviales. La Fig.1 permet de localiser l'ensemble de ces points d'intérêt.

2.4 Indicateurs statistiques

L'analyse de l'évolution diurne, qui a été effectuée, repose sur l'agrégation des éclairs par pas de temps horaire, exprimés en Temps Universel (TU). Pour chaque zone ou pixel analysé, les indicateurs suivants sont calculés :

- Heure du pic d'activité (Hmax);
- Heure du minimum d'activité (Hmin);
- Maximum d'éclairs (Max);
- Minimums d'éclairs (Min);
- Moyenne horaire;
- Ratio (Max/Min), mesurant le contraste relatif d'activité sur 24h.

De par sa construction mathématique, le ratio manifeste une

forte sensibilité aux faibles valeurs du minimum. Toutefois, lorsque Min converge vers Max, le ratio tend vers l'unité.

Dans cette étude, nous définissons l'amplitude comme le nombre Max enregistré par heure (éclairs/h) lors de l'évolution diurne dans une grille de 5°dec. Cela nous conduit à une classification pour éclairer l'ampleur de détection d'éclairs dans les zones réduites ZR comme suit :

- Grande amplitude:
Max $\geq$ 25000 éclairs/h;
- Moyenne amplitude:
 $15000 \text{ éclairs/h} \leq \text{Max} < 25000 \text{ éclairs/h}$;
- Faible amplitude:
Max $< 15000 \text{ éclairs/h}$.

3. Résultats

3.1 Classification des éclairs dans la zone d'étude

3.1.1. Indicateurs de l'ampleur de densité d'éclairs

La Fig.2 met en lumière les fréquences d'occurrence horaires des éclairs dans le bassin du Congo, réparties entre zones de fortes, moyennes et faibles amplitudes. Cette dynamique d'occurrence spatio-temporelle est complétée par les Fig 3–4: elles présentent respectivement les cycles diurnes moyennes de l'activité d'éclairs par classe d'amplitude et les cycles diurnes de six zones ZR comprenant les aires à 0,3°dec dans le bassin du Congo. Ces graphiques permettent d'observer comment l'activité orageuse s'articule dans le temps et l'espace dans le bassin du Congo.

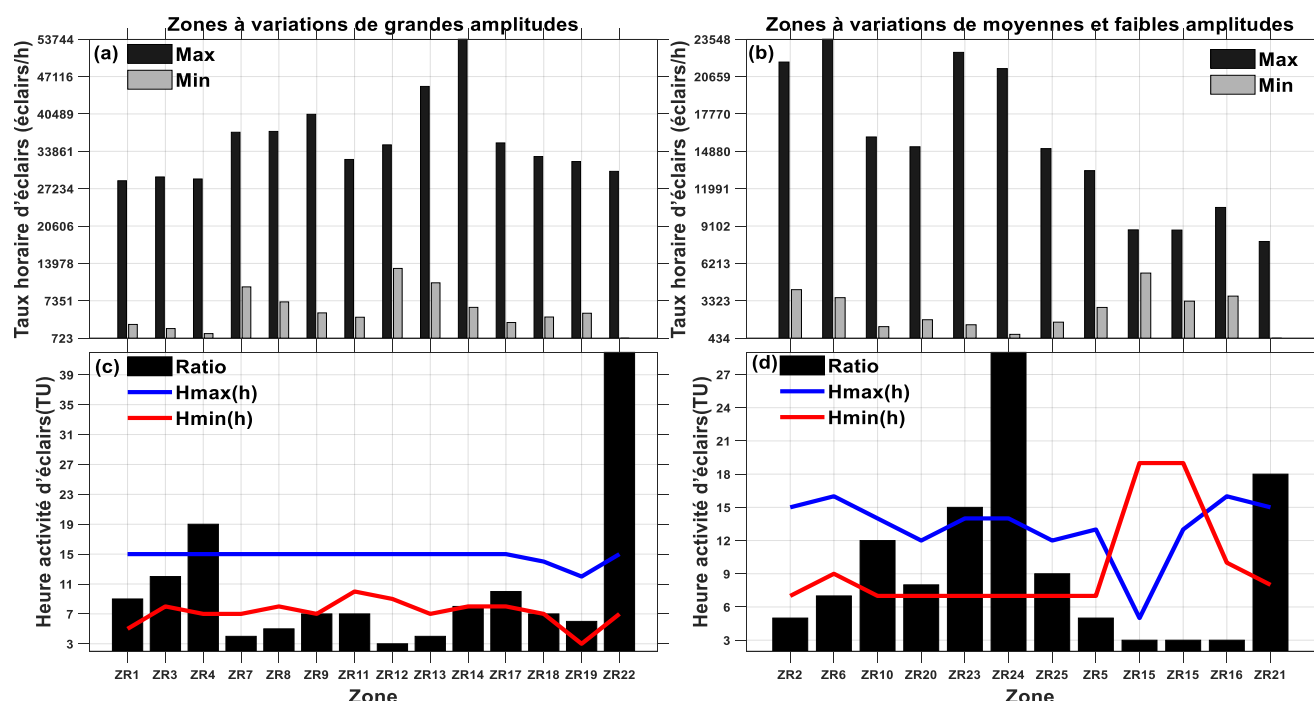


Fig.2. Indicateurs spatio-temporels de l'activité d'éclairs dans le bassin du Congo : (a-b) maximum du taux horaire d'éclairs (Max) et minimum du taux horaire d'éclairs (Min) respectivement dans les zones à variations de grandes amplitudes, moyennes et faibles amplitudes ; (c-d) heures du pic d'activité d'éclairs (Hmax) et heures du minimum d'activité d'éclairs (Hmin). Le ratio (Max/Min) calculé permet de distinguer les zones à phase critique unique de celles présentant deux phases de risque distinctes. Les zones sont réparties en trois classes d'amplitudes : faible (ZR5, ZR15, ZR16, ZR21), moyenne (ZR2, ZR6, ZR10, ZR20, ZR23, ZR24, ZR25) et forte (ZR1, ZR3, ZR4, ZR7 à ZR9, ZR11 à ZR14, ZR17 à ZR19, ZR22). (d) La double occurrence de ZR15 sur l'axe des abscisses souligne la nature bimodale du cycle diurne propre à cette zone, nécessitant deux entrées distinctes. Dans les zones à forte activité d'éclairs, Hmax est stable (15 heures). Cette tendance s'inverse dans les zones de faibles et moyennes activités, où Hmin devient le paramètre le plus constant (7 heures). Ces stabilités sont néanmoins perturbées dans les secteurs ZR19 et ZR15. On note que malgré une variabilité (écart-type) plus marquée de Hmin dans les zones de forte amplitude, celle-ci reste centrée sur une moyenne de 7 heures (écart-type, 2 heures). À l'opposé, pour les zones à faible et à moyenne amplitude, c'est Hmax qui se stabilise autour de 13 heures avec un écart-type de 3 heures.

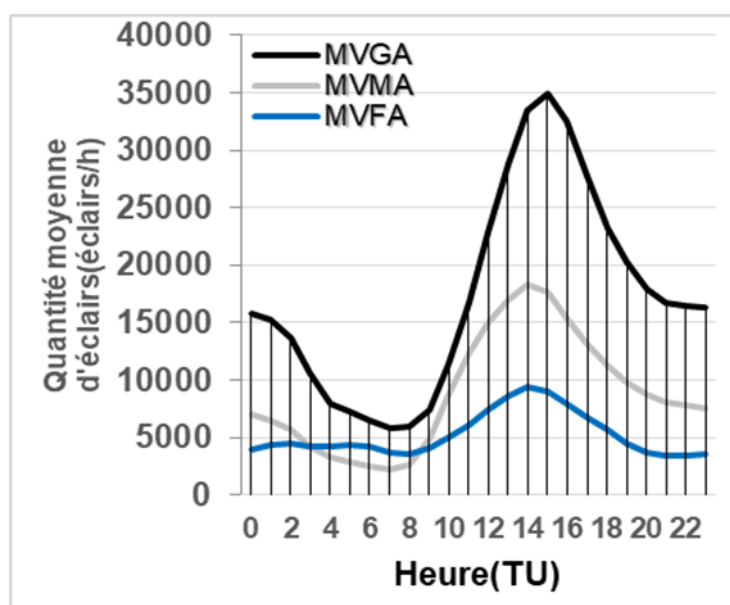


Fig.3. Cycles diurnes moyennes à : grandes amplitudes (MVGA) dans 14 ZR (ZR1,ZR3, ZR4, ZR7, ZR8, ZR9, ZR11, ZR12, ZR13, ZR14, ZR17, ZR18, ZR19, ZR22), à moyennes amplitudes (MVMA) dans 7 ZR (ZR2, ZR6, ZR10, ZR20, ZR23, ZR24, ZR25) et à faibles amplitudes (MVFA) dans 4 ZR (ZR5, ZR15, ZR16, ZR21). Ces cycles diurnes illustrent les tendances générales observées dans l'ensemble des ZR du bassin du Congo. Ces résultats consolident le rôle prépondérant de l'ensoleillement dans la dynamique des orages au sein du bassin du Congo, notamment lorsqu'on observe les données à l'échelle spatiale de 5°déc.

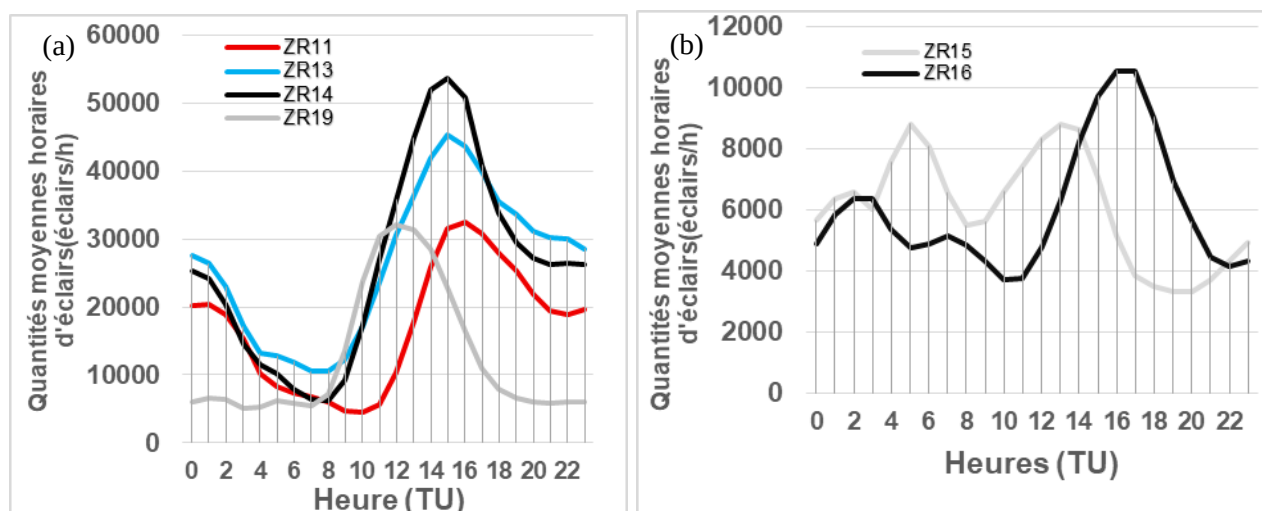


Fig.4. Évolution diurne de l'activité d'éclair pour six zones réduites (ZR) incluant les sites d'intérêt : (a) ZR11, ZR13, ZR14, ZR19 et (b) ZR15, ZR16. Ces ZR font partie des 25 subdivisions de 5°déc x 5°déc couvrant le bassin du Congo entre les latitudes 10°S et 15°N, et les longitudes 10°E et 35°E. Les courbes mettent en évidence les dynamiques propres aux aires de résolution plus fine de 0,3°déc x 0, 3°déc contenues dans ces zones. Bien que la signature du cycle diurne soit capturée dans les zones ZR11, ZR13 et ZR14, les autres secteurs s'en écartent : ZR19 présente un pic à midi et des creux matinaux (4h et 7h), ZR15 suit un régime bimodal, et la ZR16 alterne deux phases actives (nuit (2–3 heures) et fin d'après-midi (16–17 heures)) séparées par un minimum à 10h. Ces résultats mettent en évidence une sensibilité accrue du cycle diurne à la résolution spatiale ; les contrastes locaux s'accroissent nettement lorsque l'on passe d'une échelle de 5° à 0,3° dans le bassin du Congo.

Les zones de fortes amplitudes d'éclairs présentent une fréquence d'occurrence régulière, culminant généralement à 15h, exception faite de la zone ZR19 (Fig.2c). En revanche, les secteurs de moyennes et faibles amplitudes affichent une activité prédominante vers 7h, bien que des décalages de 2 à 3 heures soient observés pour ZR6, ZR16 et ZR25. Le cas de la zone ZR15 (Fig.2d) constitue une exception notable à cette tendance. Malgré ces régularités, les horaires Hmin et Hmax ne sont pas fixes dans les différentes classes d'amplitude (Fig.2c–d). L'activité électrique manifeste ainsi une bande de

variation fluctuant autour d'une valeur moyenne, soulignant une certaine variabilité temporelle au sein du bassin du Congo (Fig.2).

3.1.2. Cycles diurnes dans les zones réduites ZR

L'amplitude de l'activité diurne des éclairs (section 2.5) pour chacune des ZR a permis la classification de ces dernières en trois catégories distinctes (Fig.2). Sur un total de 25 ZR

(Fig.1), 14 ont été associées à de grandes amplitudes (MVGA), 7 à des moyennes amplitudes (MVMA) et 4 à de faibles amplitudes, notées par MVFA (Fig.3). Bien que Hmax et Hmin varient d'une catégorie à l'autre, toutes les courbes suivent un profil diurne commun, représentatif de la dynamique générale des ZR (Fig.3). La Fig.3 corrobore l'identification préalable (Fig.2) des tendances de Hmax et Hmin, soulignant la robustesse de ces observations. La particularité de la ZR15 (Fig.2d) est corroborée par la Fig.4b, qui révèle un cycle bimodal marqué par deux pics (05h00 et 13h00) et deux creux (08h00–09h00 et 19h00–20h00).

En outre, le contraste entre les occurrences de Hmax au sein des zones ZR14 et ZR19 est particulièrement marqué. Bien que situées sur les mêmes longitudes et à des latitudes adjacentes, Hmax surviennent entre 11h00 et 13h00 dans ZR19, tandis qu'ils se situent entre 14h00 et 16h00 dans ZR14 (Fig.4a). La présence des lacs et des hauts plateaux de la vallée du Rift (Est de la R.D.C.) pourrait expliquer une telle disparité.

3.2 Variabilité diurne à résolution spatiale de 0,3° déc

Bien que les contrastes inter-classes (Fig.3) et inter-zones (Fig.4) soient mis en évidence, l'analyse nécessite une descente d'échelle. Cette section est consacrée à l'étude des contrastes spatio-temporels au sein des subdivisions de 0,3°dec localisées dans certaines ZR. Les illustrations détaillant ces hétérogénéités locales sont regroupées en annexe.

3.2.1. Cycles réguliers dans les sous-zones ZM

L'existence de foyers d'activité électrique intense (hotspots) est bien documentée. Dans le bassin du Congo, la Fig.A1 présente les cycles diurnes au sein de 16 sous-zones de densité maximale d'éclairs (ZM). Les cas spécifiques des zones ZM2, ZM4, ZM7 et ZM16 corroborent le profil moyen des variations diurnes (MZM) établi pour l'ensemble de la région ZM.

Toutes les valeurs Min sont inférieures à 10 éclairs/h (Fig.A1 et Fig.A4.a–b). Par conséquent, les valeurs de Ratio sont très énormes, en générale : par exemple, dans ZM3, le ratio est supérieur à 300 (Fig. A4.a-b).

Les heures des Hmax sont fréquemment situées dans l'intervalle 13h00–16h00, et celles des Hmin dans l'intervalle 04h00–09h00 (Fig. A4.a–b). Les contrastes marquant les différents cycles associés aux ZM sont traduits par les écarts des Max et par la différence des heures de leurs occurrences. Toutefois, la dynamique temporelle des cycles diurnes des sous-zones ZM (Fig.A1) s'aligne parfaitement sur le profil diurne régulier de ZR14 (Fig.4a), soulignant une cohérence régionale.

3.2.2. Cycles perturbés dans les sous-zones ZDK

La zone ZR19 s'écarte des tendances générales des zones réduites (ZR) à grandes amplitudes d'éclairs avec un ratio faible (Fig.2c). Ce dernier suggère que les fortes activités d'éclairs se concentrent particulièrement sur une seule phase horaire. La Fig.A2, qui représente les cycles diurnes dans

l'ensemble des 12 sous-zones de la dépression de Kamalondo (ZDK), détaille ces écarts par rapport à la tendance générale des zones à grande amplitude d'éclairs. Elle met clairement en évidence des périodes à faible activité le matin avant 08h00 et l'après-midi après 17h00. Cependant, ces cycles apparaissent perturbés, à tel point que les Hmin ne sont pas clairement identifiables.

Bien que perturbés dans les sous-zones ZDK (Fig.A2), ces cycles valident la signature temporelle de ZR19 (Fig. 4a) et révèlent des hétérogénéités marquées au sein de cette zone. Toutefois, entre 08h00 et 17h00, les variations deviennent plus régulières, laissant apparaître des phases cycliques où les contrastes résident essentiellement dans les heures des pics Hmax (12h00–14h00).

3.2.3. Cycles diurnes singuliers dans les sous-zones ZV

Il a été démontré que les phénomènes de brises terre–lac et montagnes–vallée perturbent le cycle diurne habituel induit par l'insolation. Ces effets sont visibles sur la Fig.A3, qui montre l'évolution de l'activité des éclairs dans quatre sous-zones (ZV1, ZV4, ZV9 et ZV12) parmi les douze définies sur lac Victoria (Fig.1). L'évolution diurne moyenne de l'ensemble de ces zones (MVZV) est également représentée sur la Fig.A3. Les quatre cycles diurnes partagent une singularité commune: des Max nocturnes ou matinaux couplés à une phase Min prolongée, s'étendant de la fin de la matinée au début de la soirée (Fig.A3). Ce comportement diverge du cycle diurne conventionnel (Fig.A1), mettant en évidence une perturbation de ce dernier. Par ailleurs, le contraste marqué entre le cycle bimodal de ZR15 (Fig.4b) et celui des zones ZV (Fig.A3) révèle une disparité lors du passage d'une résolution de 5°dec à 0,3°dec.

Les contrastes de ces cycles singuliers s'expriment en termes de différences des valeurs Max et de leurs heures d'occurrences. Les statistiques associées à ces cycles singuliers pour toutes les sous-zones sont présentées à la Fig.A4.a–b. Par exemple, les valeurs Max sont comprises entre 90 éclairs/h (ZV4) et 309 éclairs/h (ZV9). Toutes les valeurs Min sont inférieures à 5 éclairs/h. A cause de ces faibles valeurs des Min, les ratios sont dans certains cas supérieurs à 100, atteignant même 250 dans ZV11 (Fig. A4.c). Les pics d'activité (Max) se situent fréquemment dans les intervalles 01h00–02h00 et 05h00–06h00, tandis que les Hmin sont observés entre 10h00 et 20h00 (Fig.A4.a–b).

3.3 Cycles diurnes des localités urbano–rurales

3.3.1. Localités le long du Rift est–africain en R.D.Congo

La Fig.5 présente les cycles diurnes des sous-zones de 0,3°dec x 0,3°dec couvrant les localités urbano–rurales à l'est de la R.D.Congo dans les hauts plateaux de la vallée du Rift (Voir ZR14 sur Fig.1). Un phénomène assez suprenant est illustré par cette Fig.5. Premièrement, les localités de Bukavu, Kabare et Walungu ont des longitudes et des latitudes très proches mais les courbes d'évolutions correspondantes sont similaires pour les deux premières localités seulement (Fig.5a).

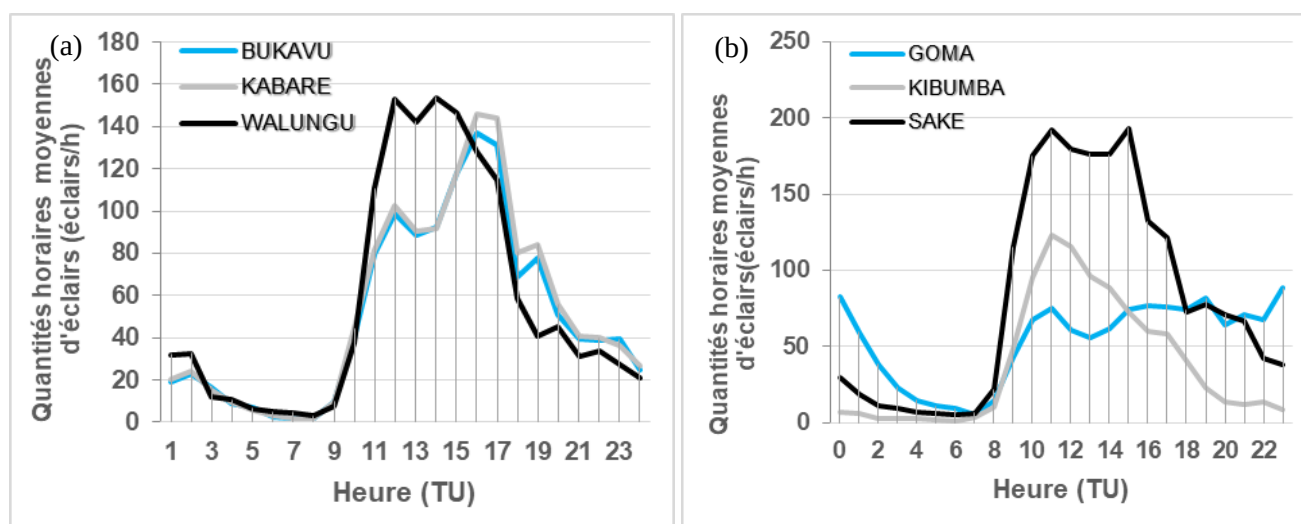


Fig.5. Cycle diurne de l'activité d'éclairs sur les hauts plateaux du Rift est-africain en République Démocratique du Congo, dans les localités de : (a) Bukavu, Kabare, Walungu et (b) Goma, Kibumba, Sake. Les courbes révèlent une perturbation du cycle diurne standard, suggérant que les effets de brise (terre-lac et montagne-vallée) à travers la physiographie locale influencent la dynamique des éclairs.

Deuxièmement, les localités de Goma, Kibumba et Sake sont aussi très voisines mais toutes les trois courbes d'évolutions correspondantes sont très différentes (Fig.5b). Par contre, les courbes d'évolutions sont similaires pour les localités de Walungu et Sake malgré la distance qui les séparent (Fig.5a-b). Ces disparités démontrent que le cycle d'insolation n'explique qu'en partie la dynamique diurne des éclairs dans ces six localités. Elles mettent en évidence l'influence potentielle des caractéristiques de surface locales. En outre, à Bukavu et Goma, l'activité orageuse pourrait être influencée par les brises lacustres, un phénomène local déjà décrit dans la littérature pour des contextes similaires. Sans perdre de vue que Goma est aussi au pied des montagnes

volcaniques et pourrait connaître l'influence du phénomène de brise de montagne-vallée. Ces six localités présentent des cycles diurnes contrastés, s'écartant des régimes habituels de type régulier, bimodal ou perturbé.

3.3.2. Localités riveraines et côtières

La Fig. 6 présente l'évolution diurne de l'activité d'éclairs des localités riveraines et côtières, ainsi que celle de Boende, localisée sur la ligne équatoriale géographique. De multiples irrégularités marquent l'évolution diurne de l'activité des éclairs de ces localités, couvertes par des mailles de 0,3° de résolution spatiale des données du réseau WWLLN.

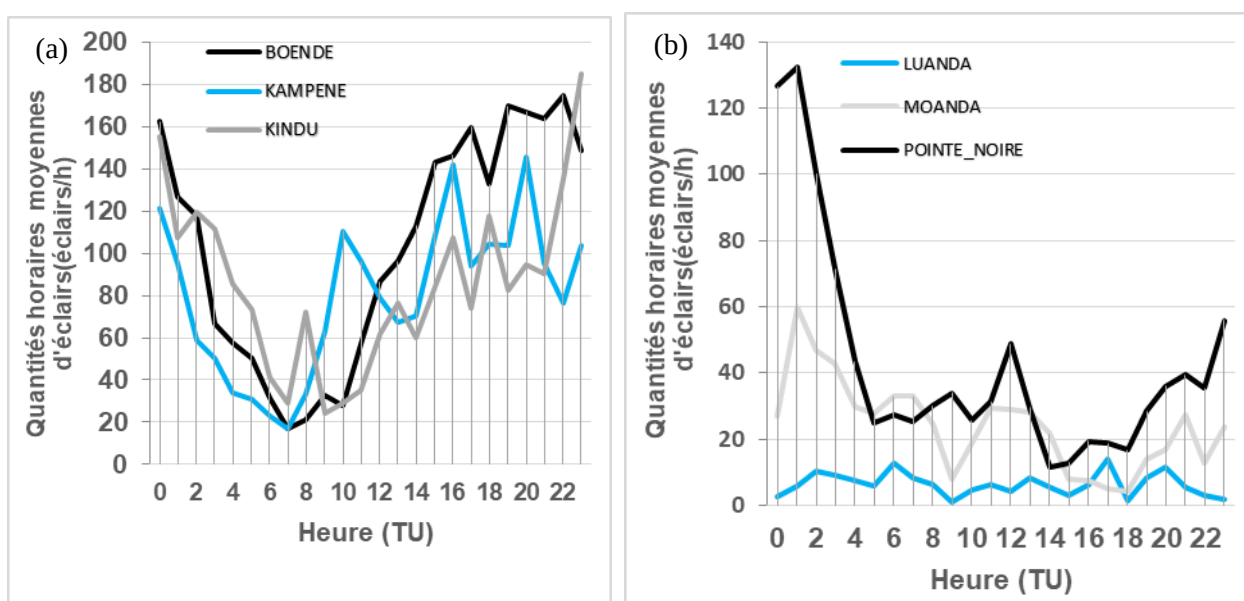


Fig.6. Evolution diurne : (a) sur la ligne équatoriale géographique (localité de Boende), sur les rives de la rivière Lualaba (localités : Kampene et Kindu) et (b) sur le littoral atlantique (Luanda, Moanda, Pointe Noire). La variabilité des courbes ne capture pas la signature standard du cycle diurne, suggérant l'influence de brises (fluviales et maritimes). Étonnamment, la localité de Boende s'écarte également du cycle standard. Cette anomalie pourrait s'expliquer par l'influence combinée de la forêt, de la pédologie locale et de l'urbanisation sur la dynamique convective.

Malgré ces multiples irrégularités y affectant l'évolution

diurne, la période de faible activité est perceptible ; elle se

située entre 06h00 et 08h00 pour Kampene, et entre 06h00 et 10h00, mais avec une perturbation à 07h00, pour la localité de Kindu (Fig.6a).

Les localités de Moanda et Pointe-Noire connaissent aussi une activité diurne marquée par des multiples irrégularités, par contre l'activité diurne dans la localité de Luanda est marquée par la quasi constance et la très faible quantité horaire moyenne d'éclairs (Fig.6b). Il y a lieu de penser que l'impact du cycle d'insolation est largement dominé par l'influence des caractéristiques locales de surface dans toutes les localités susmentionnées.

De toute évidence, les irrégularités observées pour Moanda et Pointe-Noire contrastent avec les cycles réguliers caractérisant respectivement ZR13, ZR16 et ZR11 (Fig.4a–b). Naturellement, la quasi constance de l'évolution diurne à Luanda n'est pas compatible avec la régularité du cycle caractérisant ZR16, zone incluant cette localité (Fig.6b et Fig.4b).

Malgré la position de Boende sur la ligne équatoriale, son cycle diurne d'éclairs contraste avec le cycle régulier habituel.

4. Discussion

La description détaillée de l'évolution diurne de l'activité d'éclairs dans les 25 zones ZR du bassin du Congo révèle une complexité spatio-temporelle significative, bien au-delà du simple cycle jour-nuit classique. Bien que l'ensemble de la région présente un Max compris entre 13h00 et 16h00 TU et un Min entre 05h00 et 08h00 TU, comme l'avaient déjà montré les travaux de Soula et al.[5], notre analyse descriptive montre que ces plages horaires masquent une grande diversité de comportements à l'échelle locale.

4.1 Hosposts d'activités d'éclairs

Les Max observés dans les ZR varient largement, allant des valeurs inférieures à 15 000 éclairs/h (Fig.2b,d) à des pics supérieurs à 25 000 éclairs/h (Fig.2a,c), traduisant des faibles et très fortes amplitudes diurnes. Les plus grandes valeurs des Max sont identifiées dans ZR14 (53744 éclairs/h) et dans ZR13 (45372 éclairs/h). Ces valeurs sont comparables à celles trouvées par Kigotsi et al.[16] dans les zones du maximum principal (Area_max) et du maximum secondaire de densité d'éclairs (Area_sec). Dans ces deux zones de mêmes dimensions que les zones ZR, la première partageant avec ZR14 trois quart de territoire, et la deuxième avec ZR13 plus ou moins deux tiers de territoire, les auteurs ont trouvé respectivement ± 60.000 éclairs/h et ± 40.000 éclairs/h pour l'année 2012, et ± 80.000 éclairs/h et ± 48.000 éclairs/h pour l'année 2013 [16].

Dans cette étude, les valeurs de Max enregistrées sur les 16 sous-zones ZM, de dimensions $0,3^\circ\text{dec} \times 0,3^\circ\text{dec}$, soit, 1109 Km^2 , définies sur la zone du maximum principal de densité d'éclairs, évoqué ci-avant, sont comprises entre 389 éclairs/h (ZM16) et 925 éclairs/h (ZM2). Ces valeurs corroborent les densités des taux d'éclairs trouvées par Albretch et al.[14] autour des hotspots identifiés sur tous les continents. Considérant des surfaces de dimensions $0,1^\circ\text{dec} \times 0,1^\circ\text{dec}$

équivalentes à $123,21 \text{ km}^2$, ces auteurs ont trouvé des valeurs de densité supérieures à $5 \text{ flh}^{-1} (0,1^\circ \times 0,1^\circ)^{-1}$ pour les quatre hosposts classés au sommet de l'échelle, à savoir le Lac Maracaibo au Venezuela, et les sites de Kabare, Kampene et Sake en R.D. Congo [14]. De toute évidence, on déduit que les quantités horaires sont supérieures à 615 éclairs/h pour les surfaces de $0,1^\circ\text{dec} \times 0,1^\circ\text{dec}$ définies autour de chacun des quatre hotspots, qui du reste sont 9 fois plus petites que celles des sous-zone de dimensions $0,3^\circ\text{dec} \times 0,3^\circ\text{dec}$.

4.2 Physiographie et phénomène de brise terre–Lac

Les résultats spécifiques aux sous-zones ZDK et du lac Victoria (ZV) montrent que certaines aires (ZKD3, ZKD6, ZKD8, ZV1 à ZV12) dominées par des masses d'eau (Fig.1) présentent, soit des cycles inversés (maximum à l'aube ou en pleine nuit), comme le montre la Fig.A3 et la Fig.A4.c–d, soit, une quasi-absence de structure diurne nette, liés aux effets des brises ou à l'humidité résiduelle (Fig.A2). Cela renforce l'idée selon laquelle la physiographie locale perturbe ou module l'impact du cycle d'insolation [1, 3–4, 36–38].

Singulièrement, l'ensemble des sous-zones définies sur le lac Victoria révèle une activité précoce et nocturne, avec des Max enregistrés entre 01h00 et 06h00, et des Min presque constants entre 11h00 et 20h00 (Fig.A3 et Fig.A4.c–d). Virts and Goodman [33] corroborent ces résultats. Ils montrent que 85% des orages sur le lac Victoria se forment sur place entre 22h00 et 04h00 heures locales (19h00–01h00 TU), ou entre 05h00 et 08h00 heures locales (02h00–05h00 TU), selon les saisons.

Naturellement, ces résultats peuvent être associés à une convection déclenchée par des forçages thermiques nocturnes (brises terre–lac), semblables aux situations rapportées pour les lacs Maracaibo, au Venezuela et pour le détroit de Malacca, en Asie équatoriale plutôt que par l'insolation évoquée dans l'interprétation classique des cycles diurnes [34]. Le type de convection déclenchée par la convergence nocturne ou matinale des vents sur le lac Victoria, contrastant fortement avec les régimes de convection liés à l'insolation maximale de l'après-midi, a été documenté par plusieurs travaux (Par exemple : [3–4, 33–35]) montrant que la convection profonde sur les grands lacs tropicaux, et en particulier sur le lac Victoria, culmine souvent en fin de nuit à cause des effets de convergence induits par les effets de brises terres-lacs.

4.3 Bassin du Lac Victoria

Dans le bassin du lac Victoria, la chaleur solaire associée avec les brises de Montagne–vallées et de lac–terre, et terre–lac engendrent un maximum de convection profonde l'après-midi sur la partie terrestre du bassin avec un pic d'activité d'éclair entre 13h00 et 16h00 heures locales, c'est à dire entre 10h00 et 13h00 TU, d'une part, et un maximum de densité d'éclairs au-dessus des eaux du lac après le lever du soleil, entre 07h00 et 08h00 locales, soit 04h00–05h00 TU [33–35]. Le cycle bimodal trouvé, avec les données WWLLN, dans la zone ZR15, constituant une grande partie du bassin du lac Victoria, corroborent ces résultats antérieurs

obtenus avec des données d'autres sources [3–4, 33–35, 38] car il présente les plus grandes valeurs de taux horaires d'éclairs entre 04h00 et 06h00 TU, le matin, et entre 12h00 et 14h00 TU, l'après-midi (Fig.4b).

4.4 Modulation relative de l'activité d'éclairs

La Fig.2 montre que le ratio (Max/Min) constitue une variable de contrôle essentielle. Celui-ci assure la segmentation du territoire en deux catégories : les zones à risques multiples (deux phases critiques) et les zones à risque unique (phase isolée). Les secteurs identifiés par un ratio faible (ZR12, ZR13, ZR15, ZR16) requièrent une vigilance accrue en raison d'une double fenêtre d'activité d'éclairs. À l'inverse, un ratio élevé (ZR22, ZR24, ZR21) limite le danger à une séquence temporelle unique. Il est impératif de noter que l'exposition au risque double est à son comble lorsque le ratio est unitaire, particulièrement lors d'épisodes orageux sévères.

Cette variable de contrôle révèle également que des zones présentant des Max comparables peuvent néanmoins manifester des intensités de cycle différentes. Par exemple, avec un Max de 21 783 éclairs/h et un Min de 4 181 éclairs/h, la zone ZR2 présente un ratio de 5, tandis qu'avec un Max de 21 277 éclairs/h et un Min de 726 éclairs/h, la zone ZR24 présente un ratio de 29, indiquant une bien plus grande variabilité intra-journalière (Fig.2). En introduisant le ratio, l'étude permet une lecture plus fine du caractère « dynamique » des cycles selon les zones. Certaines zones comme ZR4, ZR22 ou ZR24 présentent des ratios très élevés (jusqu'à 42), indiquant des contrastes nets entre les heures calmes et les pics d'activité, alors que d'autres, comme ZR12, ZR15 ou ZR16, affichent des ratios faibles (ratio ≤ 3), traduisant une activité plus constante ou diffuse (Fig. 2). Les valeurs énormes des ratios trouvés dans les sous-zones ZM et ZV indiquent que le cycle diurne est très prononcé dans les zones du maximum de densité d'éclair et du lac Victoria.

4.5 Facteurs de contrôle et d'influence du cycle diurne de l'activité d'éclairs

Sur le plan spatial, des regroupements structurés des zones émergent. Deux grands secteurs rectangulaires (ZR6 à ZR9 dans la bande équatoriale du nord, et ZR11 à ZR14 dans la bande équatoriale sud, voir Fig.1) concentrent ensemble près de 84 % des Max saisonniers observés entre 2005 et 2022 [17]. Cependant, leurs cycles diurnes sont modérément marqués, avec des ratios oscillants entre 3 et 8 (Fig.2). Cela suggère que la forte activité saisonnière n'implique pas nécessairement un fort contraste diurne. Inversement, le secteur constitué des zones ZR21 à ZR24, dépourvu de Max saisonniers [17], présente des ratios très élevés (jusqu'à 42 dans ZR22), soulignant une dynamique diurne particulièrement active, indépendante de la saisonnalité.

Ces observations appellent à différencier les facteurs contrôlant le cycle diurne de l'activité d'éclairs de ceux influençant l'activité saisonnière (circulation climatique régionale et à grande échelle). Alors que cette dernière est souvent déterminée par les migrations de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et les forçages de grande échelle associées aux ondes africaines de l'Est (African

Easterly Wave : AEW), au jet AEJ-S (jet africain de l'Est de l'hémisphère Sud), ou aux ondes équatoriales de Kelvin [3, 38–39], le cycle diurne semble, lui, fortement modulé par des facteurs locaux : topographie, couverture végétale, gradient thermique jour-nuit, et surtout la présence de masses d'eau [3–4,15,34,39–40].

L'étude fine de la cuvette marécageuse de Kamalondo le confirme : dans les sous-zones dominées par des étendues lacustres (ZKD3, ZKD6, ZKD8), comme le montrent la Fig.A2, le cycle diurne est désorganisé, probablement perturbé par des brises terre-lac [3–4,33–35].

En outre, l'analyse des zones localités urbano-rurales (Fig.5–6) révèle une grande hétérogénéité. Des localités proches comme Bukavu et Kabare présentent des cycles similaires alors que Walungu pourtant géographiquement voisine, diffère notablement (Fig.5a). C'est aussi le cas des localités de Goma, Kibumba et Sake qui sont très voisines mais avec des variations diurnes différentes (Fig.5b). A Goma, les effets de brise de montagnes-vallées, induits par la multitude des montagnes volcaniques, en interaction avec le lac Kivu, complexifient sans doute le comportement de l'évolution diurne. Ces différences inter-localités soulignent que les propriétés de surface (rugosité, humidité, type de sol, urbanisation) influencent profondément la structure du cycle diurne de l'activité d'éclairs. Les variations désorganisées trouvées pour les localités de Boende, Kampene et Kindu (Fig.6a), ainsi que Luanda, Moanda et Pointe-Noire (Fig.6b) corroborent cette conjecture.

4.6 Implications

Les résultats mis en évidence dans cette étude soulignent implicitement l'urgence de renforcer les réseaux d'observation en Afrique centrale. Ce renforcement permettrait de mettre en place des réseaux de détection complémentaires, intégrant les stations météorologiques classiques, les capteurs de l'activité d'éclairs et les radars météorologiques. Une telle couverture aiderait à caractériser la complexité des régimes diurnes observés dans le bassin du Congo, elle permettrait aussi de valider, de densifier et croiser les données issues de la télédétection spatiale, et d'affiner la représentation des processus convectifs dans la région. De plus, les résultats obtenus sur le phasage et la structure fine des cycles diurnes doivent être intégrés dans les schémas de convection des modèles numériques régionaux. Cette intégration améliorerait la prévision de la convection profonde tropicale, la calibration des modèles, et la représentation du forçage radiatif des orages dans les simulations climatiques.

tion des processus convectifs dans la région. De plus, les résultats obtenus sur le phasage et la structure fine des cycles diurnes doivent être intégrés dans les schémas de convection des modèles numériques régionaux. Cette intégration améliorerait la prévision de la convection profonde tropicale, la calibration des modèles, et la représentation du forçage radiatif des orages dans les simulations climatiques.

5. Conclusion et perspective

5.1 Régimes convectifs et implications pour la modélisation régionale

Cette étude montre que la convection dans le bassin du Congo ne dépend pas exclusivement de l'insolation et des forçages atmosphériques à grande échelle, mais résulte d'une complexité d'interactions thermodynamiques et des caractéristiques physiographiques locales.

Le recours à des d'indicateurs statistiques, tels que Max, Min

et le ratio (Max/Min), a permis de classer les différentes zones selon l'intensité de leur activité diurne. L'étude a notamment identifié des zones à forte variabilité (ratio>10) et des comportements singuliers : des régimes lacustres spécifiques sur le Lac Victoria, des cycles perturbés dans la cuvette marécageuse de Kamalondo, et une absence du signal diurne marqué dans certaines zones anthropisées (localités urbano-rurales).

Ces observations, confrontées à la littérature, confirment que la région d'étude constitue l'un des hotspots mondiaux de l'activité électrique dont la structure fine de la convection reste encore largement méconnue.

À ce titre, les données générées constituent un matériau précieux pour affiner la paramétrisation de la convection dans les modèles de climat régionaux et pour optimiser les stratégies de prévention des risques liés aux systèmes orageux extrêmes.

5.2 Limites de robustesse et perspectives de régionalisation intégrée

Malgré ces avancées, la portée de ces conclusions doit être nuancée par l'absence de tests de significativité statistique approfondis et d'une quantification explicite des incertitudes. Une étude de validation s'avère donc nécessaire pour consolider la robustesse de nos résultats.

Par ailleurs, l'influence suggérée de la physiographie sur la modulation de la convection ouvre de nouvelles perspectives de recherche. Les travaux futurs devront s'orienter vers :

(1) la quantification de la modulation physiographique, afin d'isoler par exemple, l'impact ou le rôle du relief, de l'occupation du sol et des surfaces d'eau libre sur le déclenchement orageux;

(2) Une régionalisation du cycle diurne, fondée sur une approche intégrée des interactions entre les forçages synoptiques et les facteurs de modulation locaux.

Annexe

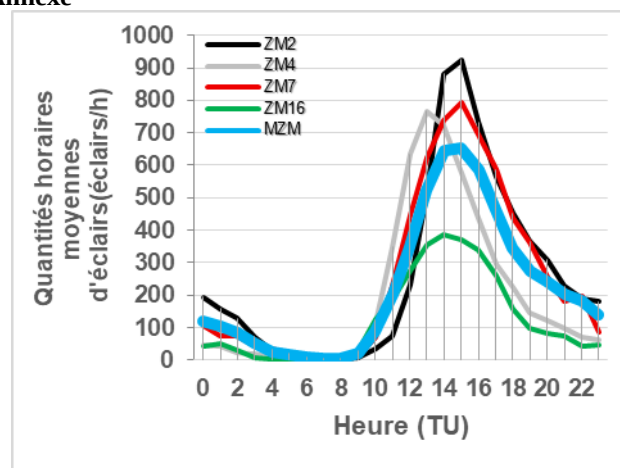


Fig. A1. Cycles diurnes observés dans les sous-zones ZM2, ZM4, ZM7 et ZM16 au sein de la zone de maximum de densité d'éclairs (ZM), et moyenne des variations (MZM) calculée sur l'ensemble des 16 sous-zones. La zone ZM se situe sur les hauts plateaux du Rift est-africain. La forme de ces courbes suit fidèlement le cycle diurne standard, confirmant que l'insolation est le principal moteur de l'activité d'éclairs locale.

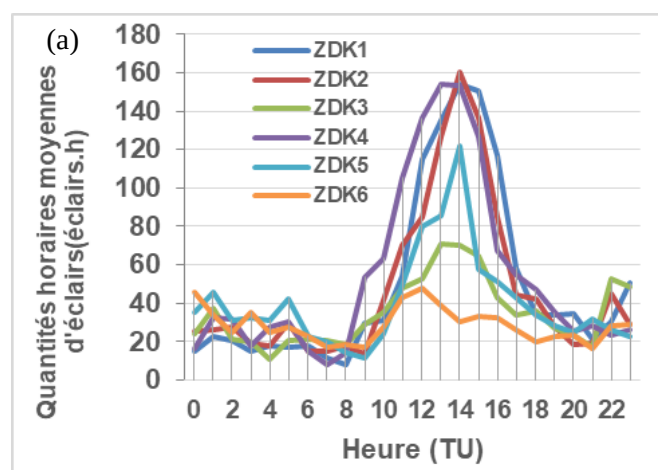
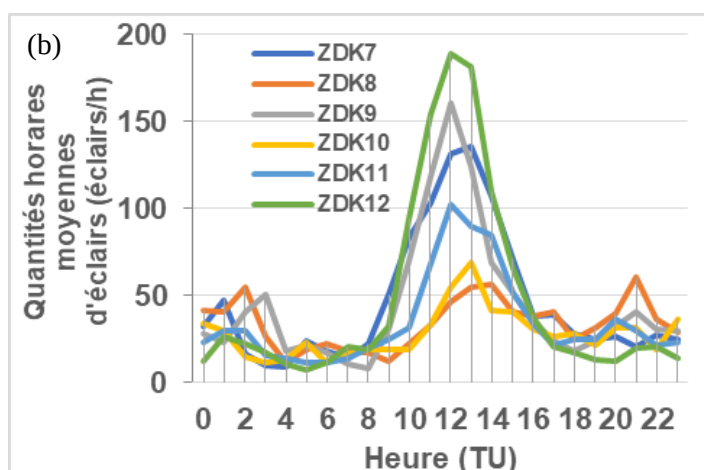


Fig. A2. Cycles diurnes dans les 12 sous-zones de la dépression de Kamalondo (ZDK) (a) ZDK1 à ZDK6 et (b) ZDK7 à ZDK12. La zone ZDK couvre les lacs Upemba et Kisale qui, avec plusieurs autres plans d'eau, forment un vaste complexe marécageux. Cette configuration hydrologique pourrait expliquer les perturbations observées sur les courbes diurnes, rendant difficile l'identification précise des créneaux horaires des minimums d'activité d'éclairs.

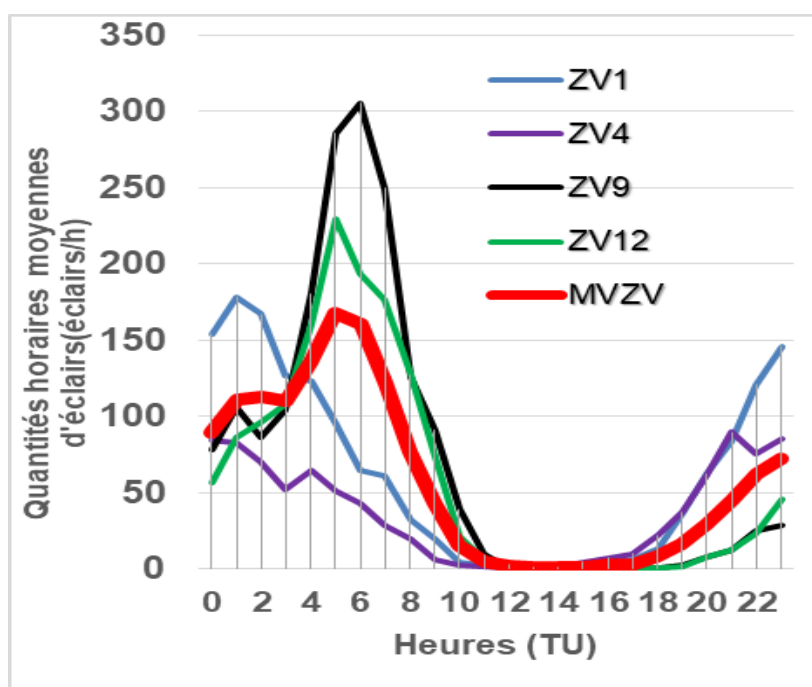


Fig. A3. Cycles diurnes observés dans les sous-zones ZV1, ZV4, ZV9 et ZV12 du lac Victoria, et moyenne des variations diurnes (MVZV) pour l'ensemble des douze sous-zones. Les courbes révèlent un cycle singulier, marqué par des maximums d'éclairs nocturnes ou matinaux et une phase d'accalmie prolongée s'étendant de la fin de la matinée au début de la soirée. Ce profil illustre une inversion du cycle diurne standard, suggérant l'influence prédominante des brises lacustres. Toutefois, cette inversion n'est pas cohérente avec la tendance observée à la résolution spatiale de 5°dec, soulignant ainsi une disparité liée aux échelles spatiales.

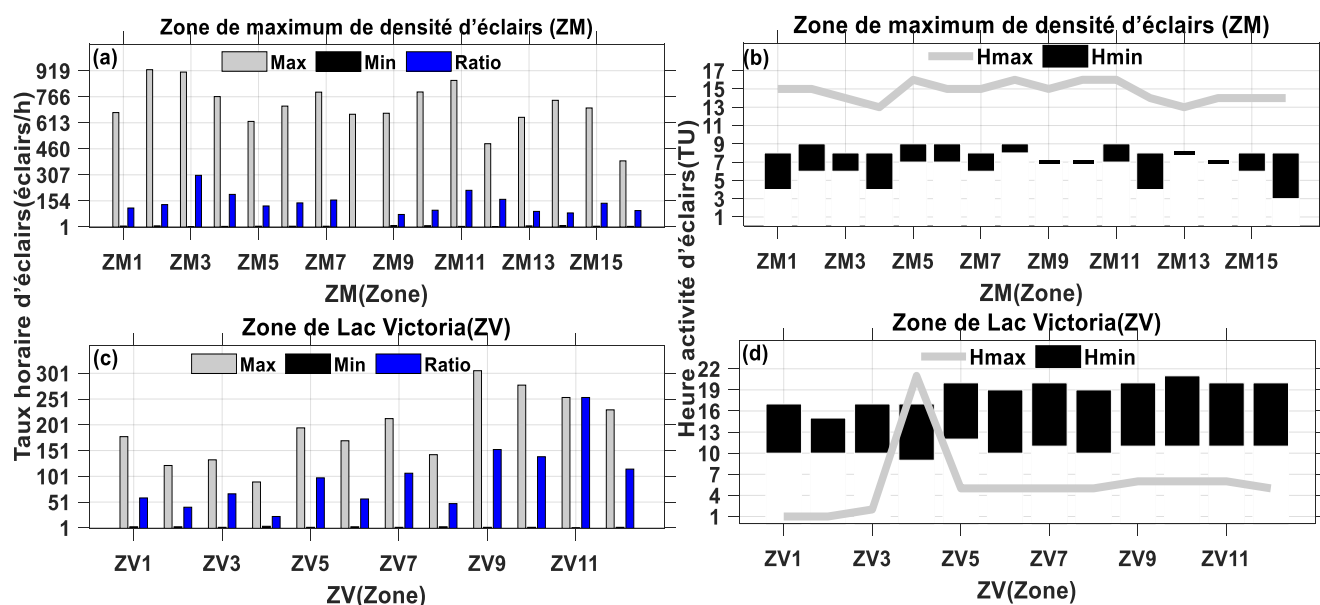


Fig. A4. Indicateurs spatio-temporels de l'activité d'éclairs dans le bassin du Congo (Max, Min, Hmax, Hmin et Ratio): (a-b) au sein des 16 sous-zones de maximum d'éclairs (ZM1-ZM16) localisées sur les hauts plateaux du Rift est-africain et (c-d) dans les 12 sous-zones du bassin du lac Victoria (ZV1-ZV12). Les valeurs maximales du taux horaire d'éclairs (Max) sont toutes ≤ 925 éclairs/h, tandis que les valeurs minimales du taux horaire d'éclairs (Min) ne dépassent jamais 10 éclairs/h. Les valeurs des heures du pic d'activité d'éclairs (Hmax) sont relativement homogènes (15 ± 2 heures pour ZM et 4 ± 3 heures pour ZV), à l'exception notable de ZV4. À l'inverse, une forte variabilité des heures du minimum d'activité d'éclairs (Hmin) est observée, particulièrement accentuée dans la zone du lac Victoria. Le ratio (Ratio) indique une phase unique d'activité orageuse

Remerciements

Notre gratitude s'adresse à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Kinshasa, et plus particulièrement à son Département de Physique et Technologie, pour avoir fourni un cadre et un environnement

propices à la réalisation de ce travail de recherche.

Conflit d'intérêt

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêt.

Disponibilité des données

Toutes les données utilisées dans cet article peuvent être demandées à **Jean Kigotsi Kasereka** à l'adresse suivante : jean.kigotsi@unikin.ac.cd, jeankigosti@gmail.fr.

Déclaration de contribution aux auteurs (CRediT)

Jean Kigotsi Kasereka: Conceptualisation, Méthologie, Logiciel, Validation, Analyse formelle, Enquête, Ressources, Conservation des données, Rédaction–Brouillon original, Rédaction–Révision et correction, Visualisation, Surveillance, Gestion de projet, Acquisition de fonds. **Elie W'ishe Sorongane:** Logiciel, Analyse formelle, Enquête, Rédaction–Révision et correction, Visualisation. **Emmanuel Ndiadia kandolo:** Rédaction–Révision et correction. **Albert Kazadi Mukenga Bantu:** Rédaction–Révision et correction. **Louis Kongoda Lisika:** Logiciel, Validation, Analyse formelle, Enquête, Ressources, Rédaction–Révision et correction, Visualisation.

Références

- [1] Yang Gui-Ying and Julia Slingo, "The Diurnal Cycle in the Tropics", *Monthly Weather Review*, 129, 2001, 784-801.
- [2] Romps David M, Jacob T Seeley, David Vollaro and John Molinari, "Projected Increase in Lightning Strikes in the United States Due to Global Warming", *Science*, 346, 2014, 851-54.
- [3] Jackson Brian, Sharon E Nicholson and Douglas Klotter, "Mesoscale Convective Systems over Western Equatorial Africa and Their Relationship to Large-Scale Circulation", *Monthly Weather Review*, 137, 2009, 1272-94.
- [4] Laing Arlene G, Richard E Carbone and Vincenzo Levizzani, "Cycles and Propagation of Deep Convection over Equatorial Africa", *Monthly Weather Review*, 139, 2011, 2832-53.
- [5] Soula Serge, J Kigotsi Kasereka, JF Georgis and Christelle Barthe. "Lightning Climatology in the Congo Basin", *Atmospheric Research*, 178, 2016, 304-19.
- [6] Kigotsi Jean Kasereka, Serge Soula, Albert Bantu Mukenga Kazadi and André Ndotoni Zana. "Contribution to the Study of Thunderstorms in the Congo Basin: Analysis of Periods with Intense Activity", *Atmospheric Research*, 269, 2022, 106013.
- [7] Wallace John M, "Diurnal Variations in Precipitation and Thunderstorm Frequency over the Conterminous United States", *Monthly Weather Review*, 103, 1975, 406-19.
- [8] Dai Aiguo, Filippo Giorgi and Kevin E Trenberth, "Observed and Model-Simulated Diurnal Cycles of Precipitation over the Contiguous United States", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104, 1999, 6377-402.
- [9] Dai Aiguo, "Global Precipitation and Thunderstorm Frequencies. Part II: Diurnal Variations", *Journal of Climate*, 14, 2001, 1112-28.
- [10] Soriano Luis Rivas, Fernando De Pablo and Clemente Tomas, "Ten-Year Study of Cloud-to-Ground Lightning Activity in the Iberian Peninsula", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 2005, 1632-39.
- [11] Collier AB, Arthur Robert W Hughes, J Lichtenberger and P Steinbach, "Seasonal and Diurnal Variation of Lightning Activity over Southern Africa and Correlation with European Whistler Observations", *Annales Geophysicae*, 24, 2006, 529-42.
- [12] Proestakis E, S Kazadzis, K Lagouvardos, V Kotroni and A Kazantzidis, "Lightning Activity and Aerosols in the Mediterranean Region", *Atmospheric Research*, 170, 2016, 66-75.
- [13] Liu Chuntao and Edward J Zipser, "Diurnal Cycles of Precipitation, Clouds and Lightning in the Tropics from 9 Years of Trmm Observations", *Geophysical Research Letters*, 35, 2008.
- [14] Albrecht Rachel I, Steven J Goodman, Dennis E Buechler, Richard J Blakeslee and Hugh J Christian, "Where Are the Lightning Hotspots on Earth?", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 2016, 2051-68.
- [15] Venugopal V, K Virts, J Sukhatme, JM Wallace and B Chattopadhyay, "A Comparison of the Fine-Scale Structure of the Diurnal Cycle of Tropical Rain and Lightning", *Atmospheric Research*, 169, 2016, 515-22.
- [16] Kigotsi Jean K, Serge Soula, and Jean-François Georgis, "Comparison of Lightning Activity in the Two Most Active Areas of the Congo Basin", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2018, 479-89.
- [17] Kigotsi Jean Kasereka, Serge Soula, Gilles Athier, Louis Kongoda Lisika and Keun-Ok Lee, "Analysis of the Lightning Activity During 18 Years in the Congo Basin", *Atmospheric Research*, 309, 2024, 107577.
- [18] Williams Earle and Sharon Stanfill, "The Physical Origin of the Land–Ocean Contrast in Lightning Activity", *Comptes Rendus Physique*, 3, 2002, 1277-92.
- [19] Christian Hugh J, Richard J Blakeslee, Dennis J Boccippio, William L Boeck, Dennis E Buechler, Kevin T Driscoll, Steven J Goodman, John M Hall, William J Koshak and Douglas M Mach, "Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, 2003, ACL 4-1-ACL 4-15.
- [20] Cecil Daniel J, Dennis E Buechler and Richard J Blakeslee, "Gridded Lightning Climatology from Trmm-Lis and Otd: Dataset Description", *Atmospheric Research* 135, 2014, 404-14.
- [21] Soula Serge, Kigotsi K.J, Jean-François Georgis J.F and Barthe C, "Record mondial d'éclairs dans le bassin du Congo", *La Météorologie* 104, 2019, 35-44.
- [22] Rodger CJ, JB Brundell, RL Dowden and NR Thomson, "Location Accuracy of Long Distance Vlf Lightning Locationnetwork", *Annales Geophysicae*, 22, 2004, 747-58.
- [23] Bovalo Christophe, Christelle Barthe and Nelson Bègue, "A Lightning Climatology of the South-West

- Indian Ocean", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2012, 2659-70.
- [24] Dowden Richard L, James B Brundell and Craig J Rodger, "Vlf Lightning Location by Time of Group Arrival (Toga) at Multiple Sites", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 2002, 817-30.
- [25] Kaplan Jed O and Katie Hong-Kiu Lau, "The Wgic Global Gridded Lightning Climatology and Time Series", *Earth System Science Data*, 13, 2021, 3219-37.
- [26] Qie Kai, Wenshou Tian, Wuke Wang, Xueke Wu, Tie Yuan, Hongying Tian, Jiali Luo, Ruhua Zhang and Tao Wang, "Regional Trends of Lightning Activity in the Tropics and Subtropics", *Atmospheric Research*, 242, 2020, 104960.
- [27] Qie Kai, Xiushu Qie and Wenshou Tian, "Increasing Trend of Lightning Activity in the South Asia Region", *Science Bulletin*, 66, 2021, 78-84.
- [28] Abarca Sergio F, Kristen L Corbosiero and David Vollaro, "The World Wide Lightning Location Network and Convective Activity in Tropical Cyclones", *Monthly Weather Review*, 139, 2011, 175-91.
- [29] DeMaria Mark, Robert T DeMaria, John A Knaff and Debra Molenaar, "Tropical Cyclone Lightning and Rapid Intensity Change", *Monthly Weather Review*, 140, 2012, 1828-42.
- [30] Bovalo Christophe, Christelle Barthe, Nan Yu, and Nelson Bègue, "Lightning Activity within Tropical Cyclones in the South West Indian Ocean", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 2014, 8231-44.
- [31] Rodger CJ, JB Brundell, RH Holzworth and Erin Hoffmann Lay, "Growing Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network", *AIP Conference Proceedings*, 1118, 2009, 15-20.
- [32] Abarca Sergio F, Kristen L Corbosiero and Thomas J. Galarneau Jr, "An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth", *Journal of Geophysical Research*, 115, 2010, D18206.
- [33] Virts Katrina S and Steven J Goodman, "Prolific Lightning and Thunderstorm Initiation over the Lake Victoria Basin in East Africa", *Monthly Weather Review*, 148, 2020, 1971-85.
- [34] Holle Ronald L and Martin J Murphy, "Lightning over Three Large Tropical Lakes and the Strait of Malacca: Exploratory Analyses", *Monthly Weather Review*, 145, 2017, 4559-73.
- [35] Woodhams Beth J, Cathryn E Birch, John H Marsham, Todd P Lane, Caroline L Bain and Stuart Webster, "Identifying Key Controls on Storm Formation over the Lake Victoria Basin", *Monthly Weather Review*, 147, 2019, 3365-90.
- [36] Oki Taikan and Katumi Musiake, "Seasonal Change of the Diurnal Cycle of Precipitation over Japan and Malaysia", *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 33, 1994, 1445-63.
- [37] Yang Song and Eric A Smith, "Mechanisms for Diurnal Variability of Global Tropical Rainfall Observed from Trmm", *Journal of climate*, 19, 2006, 5190-226.
- [38] Ba Mamoudou B and Sharon E Nicholson, "Analysis of Convective Activity and Its Relationship to the Rainfall over the Rift Valley Lakes of East Africa During 1983-90 Using the Meteosat Infrared Channel", *Journal of Applied Meteorology*, 37, 1998, 1250-64.
- [39] Nicholson Sharon E and Jeremy P Grist, "The Seasonal Evolution of the Atmospheric Circulation over West Africa and Equatorial Africa", *Journal of climate*, 16, 2003, 1013-30.
- [40] Garcia-Carreras Luis, Douglas J Parker, Christopher M Taylor, Claire E Reeves, and Jennifer G Murphy, "Impact of Mesoscale Vegetation Heterogeneities on the Dynamical and Thermodynamic Properties of the Planetary Boundary Layer", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, 2010.