

## Evolution spatio-temporelle de l'activité d'éclair dans le bassin du Congo

Kigotsi K. J.<sup>1,2\*</sup>, S. Soula<sup>2</sup>, J. F. Georgis<sup>2</sup>, Barthe C.<sup>3</sup>, Kazadi M. A.<sup>1</sup>

1 : Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa  
B.P. 190 Kinshasa XI, R.D. Congo

2: Laboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France

3. Lacy, UMR 8105, Météo-France / CNRS / Université de La Réunion, Saint-Denis, France

---

### Résumé

L'évolution spatio-temporelle de l'activité d'éclair dans le bassin du Congo est analysée à l'échelle régionale dans ce travail. L'analyse est basée sur les données du réseau global WWLLN (World Wide Lightning Location Network), pour la période de 2005 à 2013. Mais la comparaison avec les données LIS (Lightning Imaging Sensor), correspondant à la même période, est aussi faite dans une certaine mesure. Nous trouvons que le taux d'éclair mensuel moyen décrit un cycle annuel avec une forte activité pendant la période d'octobre à mars et une faible activité de juin à août. Nous trouvons aussi que la distribution zonale des éclairs présente un maximum localisé entre 1°S et 2°S et environ 56% des éclairs dans la zone 10°S - 10°N, sont situés au sud de l'équateur. D'autre part l'évolution diurne de l'activité d'éclair passe par le maximum entre 1400 et 1700 TU, selon l'année considérée. De plus la densité annuelle d'éclairs et le nombre de jours d'orages montrent un maximum aigu localisé dans la partie orientale de la République Démocratique du Congo (RDC), quelles que soient l'année et la période de l'année. Ces maxima atteignent 12,86 éclairs km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> et 189 jours, respectivement, en 2013, et correspondent à une région très active située en aval de la chaîne de montagnes des Mitumba dont les altitudes peuvent dépasser 3000 mètres. La présence de cette orographie joue un rôle dans le développement des orages tout au long de l'année. L'évaluation de ce maximum local de la densité d'éclairs en tenant compte de l'efficacité de détection, conduit à une valeur compatible avec celle de la climatologie globale de Christian et al. (2003).

**Mots-clés:** *activité d'éclair, efficacité de détection, densité d'éclair, Bassin du Congo.*

### Abstract

The spatio-temporal evolution of the lightning activity in the Congo Basin is analyzed on the regional scale in this work. The analysis is based on data from the global network World Wide Lightning Location Network (WWLLN) for the period from 2005 to 2013 and when it is necessary a comparison is done with data from Lightning Imaging Sensor (LIS). The average monthly flash rate describes an annual cycle with a strong activity from October to March and a low one from June to August. The zonal distribution of the lightning flashes exhibits a maximum between 1°S and 2°S and about 56 % of the flashes in the 10°S – 10°N interval are located south of the equator. The diurnal evolution of the flash rate has a maximum between 1400 and 1700 UTC, according to the reference year. The annual flash density and number of stormy days show a sharp maximum localized in the eastern part of Democratic Republic of Congo (DRC) regardless of the reference year and the period of the year. These maxima reach 12.86 fl km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> and 189 days, respectively, in 2013, and correspond to a very active region located at the rear of the Mitumba mountain range at altitudes that can exceed 3000 meters. The presence of this range plays a role in the thunderstorm development along the year. The estimation of this local maximum of the lightning density by taking into account the DE, leads to a value consistent with that of the global climatology by Christian et al. (2003).

**Keywords:** *lightning, detection efficiency, lightning density, Congo Basin.*

---

\* Corresponding author: (243) 850737430  
Email: [jeankigotsi@gmail.com](mailto:jeankigotsi@gmail.com) (Kigotsi K. J)

## 1. Introduction

Les observations spatiales ont montré que les concentrations les plus élevées d'éclairs sur le Globe Terrestre sont pour la plupart du temps localisées sur le territoire de la République Démocratique du Congo (RDC) (Christian et al., 2003 ; Williams et Stanfill, 2002 ; Collier et al., 2006 ; Cecil et al., 2014).

Basée sur des données enregistrées pendant cinq ans (Mai 1995-Mars 2000) par le détecteur optique OTD (Optical Transient Detector) placé à bord du satellite MicroLab-1, la climatologie globale de l'activité d'éclair proposée par Christian et al. (2003) a mis en évidence les caractéristiques de la distribution d'éclairs sur le Globe et a montré que le plus grand taux d'éclairs ( $> 50$  éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$  et jusqu'à  $82,7$  éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$  avec une résolution de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) concerne la région équatoriale du Bassin du Congo. Le capteur d'éclairs LIS (Lightning Imaging Sensor) monté à bord du satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), dédié à la mesure des pluies tropicales, a détecté les éclairs pendant dix-sept ans (1997-2014). Il a fourni une climatologie d'éclairs dans une zone restreinte du Globe comprise entre  $38^\circ\text{S}$  et  $38^\circ\text{N}$ . A partir des observations de trois ans (1998-2000), Williams et Stanfill (2002) ont analysé le contraste terre-océan de l'activité d'éclair. Comme pour Christian et al. (2003) ils ont conclu que l'activité maximale d'éclair sur le Globe se trouve en Afrique centrale.

Collier et al. (2006) ont développé une étude de l'activité d'éclair à partir des données LIS pour établir la distribution statistique et saisonnière de l'activité d'éclair en Afrique australe. Comme pour Christian et al. (2003), la plus forte densité d'éclairs ( $107$  éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$ ) a été trouvée dans le bassin du Congo. Les fortes densités d'éclairs ont également été observées à Madagascar et en Afrique du Sud ( $32,1$  éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$  et  $26,4$  éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$ , respectivement) essentiellement pendant l'été austral. Plus récemment, Cecil et

al. (2014) ont détaillé les caractéristiques de l'activité d'éclair à travers le monde à partir des données combinées de LIS et OTD, et ils ont confirmé que la plus grande densité d'éclairs est observée en Afrique centrale. Le pic du taux annuel d'éclairs a été trouvé dans l'Est de la RDC avec une valeur de  $160$  éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$ .

Comme le bassin du Congo est la région la plus active de la planète en termes d'activité d'éclair, la prévision de l'activité orageuse est d'une grande importance pour les pays concernés. Il est également important d'établir les liens entre les éclairs et les autres phénomènes violents associés à des orages tels que les pluies convectives et les vents violents, en vue d'améliorer la prévision des orages à court terme et de mieux prévenir les risques de foudre et d'autres phénomènes violents associés à des orages.

L'objectif principal de cet article est d'analyser l'évolution spatio-temporelle de l'activité d'éclair dans le bassin du Congo. La zone d'étude est géographiquement définie par les bandes  $15^\circ\text{S}$  -  $10^\circ\text{N}$  de latitude et  $10^\circ\text{E}$  -  $35^\circ\text{E}$  de longitude, afin de couvrir l'ensemble du bassin du Congo et est indiquée sur la figure 1 avec un carré rouge. Cette étude est basée sur les données WWLLN pour la période de 2005 à 2013. Quand l'utilité le requiert, elle compare ces données avec les données LIS correspondant à la même période.

## 2. Acquisition de données et méthodes

Les données utilisées dans ce travail viennent du réseau global WWLLN (World Wide Lightning Location Network) et de la base de données de GHRC (Global Hydrology Resources Center) accessible sur le site de la NASA (<http://thunder.msfc.nasa.gov/data>).

Les données WWLLN enregistrées pendant neuf ans (de 2005 à 2013) ont été utilisées dans ce travail afin d'étudier l'évolution temporelle de l'activité d'éclair et sa répartition spatiale dans le Bassin du Congo. Le WWLLN ([www.wwlln.net/](http://www.wwlln.net/)) est un réseau

mondial de détection d'éclair basé au sol. Une équipe, coordonnée à partir de l'Université de Washington, collecte ces données avec la coopération des Universités et des Instituts de Recherche qui abritent les stations de détection. Les radiations électromagnétiques émises par les arcs d'éclairs à très basse fréquence (VLF) et appelées sferics sont détectées par les capteurs du WWLLN. Les sources de ces signaux sont alors localisées en utilisant la technique de temps d'arrivée (TOGA) (Dowden et al., 2002). Les stations peuvent être séparées par des milliers de km car les fréquences VLF peuvent se propager dans le guide d'ondes Terre-ionosphère avec très peu d'atténuation. En

2014, le réseau comportait plus de 60 capteurs répartis sur la planète (Figure 1). Nous avons obtenu les données WWLLN utilisées dans ce travail par Chritelle Barthe du CNRS et de l'Université de la Réunion à Saint Denis (France). Elle est Collaboratrice dans le réseau et Co-auteur dans ce travail.

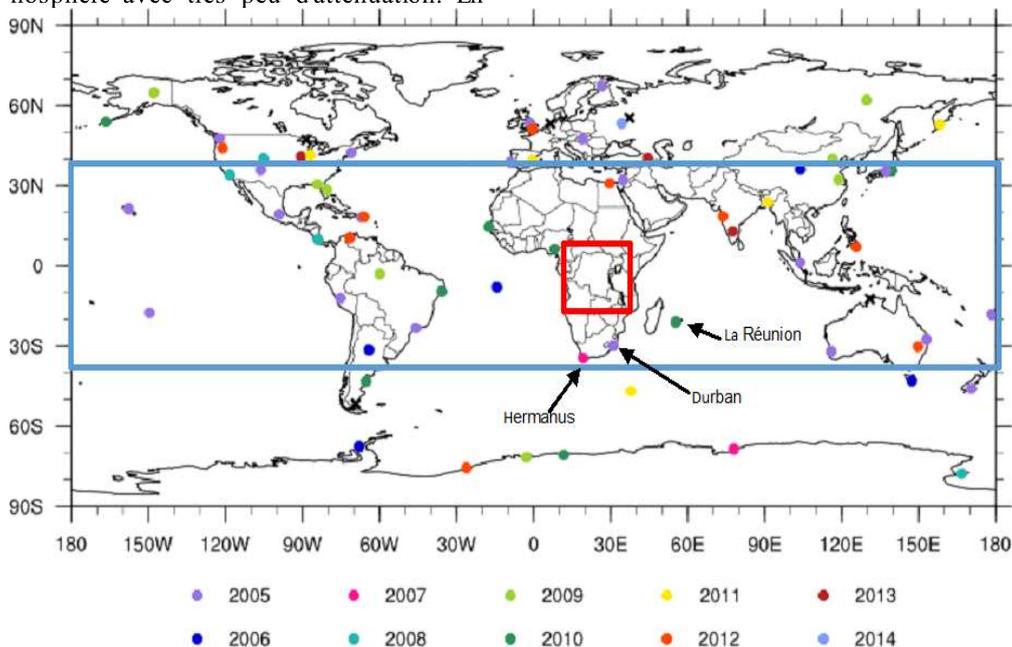


Figure 1. Carte des stations de WWLLN dans le monde entier. La couleur fournit l'année d'installation comme indiqué dans la légende. Le carré rouge et le rectangle bleu indiquent la zone d'étude et la couverture de LIS, respectivement.

LIS est un capteur optique de la plateforme scientifique du satellite TRMM ([http://thunder.msfc.nasa.gov/lis/overview\\_lis\\_instrument.html](http://thunder.msfc.nasa.gov/lis/overview_lis_instrument.html)), lancé en décembre 1997 et resté en service jusqu'en août 2014 (Christian et al., 1999; Boccippio et al., 2002; Chronis et al., 2008). Il permet de détecter les éclairs intra nuage (IC) et nuage sol (CG) avec une efficacité de détection d'environ 90%, mais il ne les distingue

pas. Il dispose d'une orbite basse, à 350 km, autour de la Terre (402 km après un changement d'orbite en août 2001), d'un champ de vision de  $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$  et une inclinaison de  $35^\circ$ , ce qui permet la couverture d'une région de la Terre comprise entre  $38^\circ\text{N}$  et  $38^\circ\text{S}$  (rectangle bleu dans la figure 1).

La méthode utilisée dans ce travail consiste d'abord à reconstruire les éclairs à partir des

arcs fournis par le réseau WWLLN en utilisant des critères de temps et de distance. Deux arcs sont rattachés à un même éclair s'ils sont séparés d'au plus 0,5 seconde et si leurs impacts au sol sont séparés par une distance inférieure ou égale à 20 km. En effet chaque arc est défini par 8 paramètres, à savoir : la longitude ( $L$ ), la latitude ( $l$ ), l'année

$$D = \sqrt{[111 \times (l_1 - l_2)]^2 + [111 \times \cos(l_1) \times (L_1 - L_2)]^2}$$

On calcule aussi  $\Delta t = S_2 - S_1$ . On écrit alors si  $D \leq 20$  km et  $\Delta t \leq 0,5$  s, (ARC1, ARC2)  $\equiv$  E ( $L_1, l_1, A, M, J, H, m, S_1, \mu$ ). La multiplicité  $\mu$  est le nombre d'arcs rattachés à l'éclair E. Ce test est répété plusieurs millions de fois à l'aide d'un code informatique approprié car chaque fichier WWLLN contient plusieurs millions de lignes. A la fin de cette opération un fichier dont chaque ligne représente un arc est transformé en un fichier dont chaque ligne représente un éclair. La deuxième étape consiste alors à construire un fichier de matrice qui permettra de tracer les cartes de densité d'éclairs. Le procédé consiste à diviser le domaine d'étude en pixels en adoptant une résolution de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ . Ensuite il faut incrémenter la quantité d'éclair dans chaque pixel. Comme la zone d'étude est définie par  $10^\circ E \leq \text{Longitude} \leq 35^\circ E$  et  $15^\circ S \leq \text{Latitude} \leq 10^\circ N$ , il est clair que la résolution adoptée engendre une grille de 62500 pixels. Soit un pixel ABCD défini par les longitudes et les latitudes des sommets respectivement: A ( $j, k$ ), B( $j+0,1^\circ, k$ ), C ( $j+0,1^\circ, k+0,1^\circ$ ), D( $j, k+0,1^\circ$ ). Soit un éclair E ( $j_1, k_1$ ). Si  $j \leq j_1 \leq j+0,1^\circ$  et  $k \leq k_1$

$\leq k+0,1^\circ$ , E ( $j_1, k_1$ ) est dans le pixel ABCD. Ce test effectué en utilisant un code informatique approprié, pour tous les 62500 pixels et sur les millions des coordonnées géographiques des éclairs du fichier WWLLN d'une année, permet d'associer, par incrémentation, à chaque pixel un nombre  $N_i$  représentant la quantité d'éclairs localisés dans le pixel. La valeur locale de la densité d'éclair est alors définie par Densité d'éclair (éclair  $\text{km}^{-2}$ ) =  $N_i / (0,1 \times 111) \times (0,1 \times 111)$ . Si

(A), le mois (M), le jour (J), l'heure (H), la minute (m) et la seconde (S). On peut alors définir deux arcs ARC1 et ARC2 à l'aide de ces paramètres en écrivant : ARC1 ( $L_1, l_1, A, M, J, H, m, S_1$ ) et ARC2 ( $L_2, l_2, A, M, J, H, m, S_2$ ). On calcule ensuite la distance entre les 2 arcs en employant l'expression :

l'on note par  $N_w$  la quantité d'éclairs détectés par WWLLN pendant une année dans la zone d'étude, on a

$N_w = \sum_{i=1}^{62500} N_i$ . Les données LIS, les nombres de jours d'orages et les nombres moyens d'éclairs par jour d'orage sont localisés dans les pixels de la même façon et avec la même résolution.

En notant par  $N_L$  la quantité d'éclairs détectés par LIS sur la zone d'étude en une année, l'efficacité de détection DE du WWLLN par rapport à LIS est donnée par l'expression :

$$DE = \frac{N_w}{N_L} \times 0,00124 \text{ (Soula et al., 2016 ; Kigotsi et al., 2016).}$$

### 3. Résultats et Interprétatin

#### 3.1 Evolution de l'activité annuelle d'éclairs

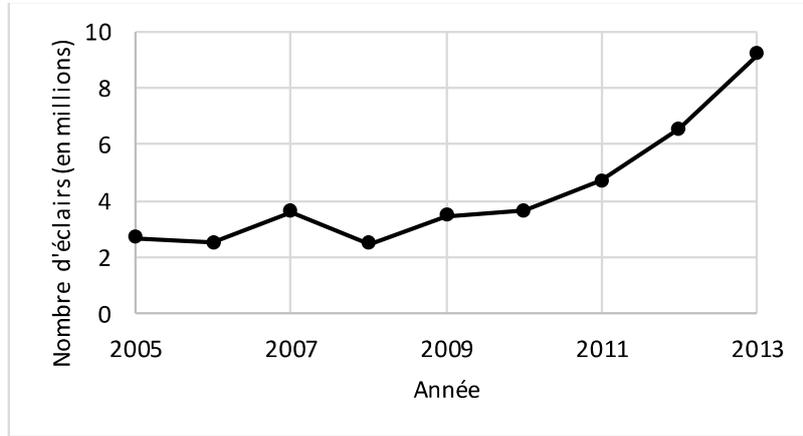


Figure 2. Evolution du nombre annuel d'éclairs vus par WLLN

La figure 2 représente l'évolution du nombre annuel d'éclairs vus par WLLN. Cette évolution met en évidence trois faits, à savoir : le nombre d'éclairs détectés est presque constant pour les années 2005, 2006 et 2008 ; l'année 2007 est exceptionnelle ; de 2009 à 2013, le nombre d'éclairs a augmenté régulièrement.

#### 3.2 Evolution annuelle de l'activité d'éclairs

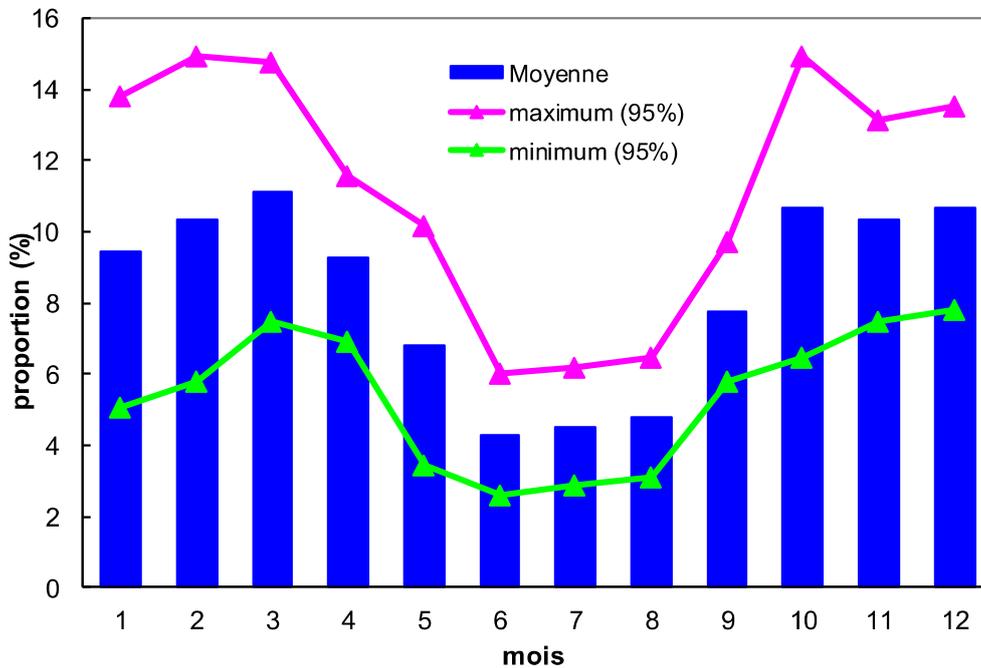


Figure 3. Evolution de la proportion mensuelle d'éclairs WLLN (en %)

La figure 3 montre l'évolution annuelle des proportions mensuelles d'éclairs détectés par le réseau WWLLN sur la zone d'étude. La proportion mensuelle d'éclairs est le rapport entre la quantité d'éclairs détectée par WWLLN sur la zone d'étude au cours d'un mois et celle qu'il a détectée au cours de l'année. L'histogramme affiche l'activité mensuelle moyenne sur la période de 9 ans (2005 – 2013). Deux courbes affichent les valeurs extrêmes de cette proportion dans un intervalle de confiance de 95%, obtenu par application de la loi normale de Gauss, afin de montrer la variabilité sur toute la période. La valeur moyenne lisse les fluctuations

mensuelles et la dispersion autour de cette moyenne est comprise entre 12% et 25% en valeur relative.

Pour chaque année le même cycle est observé. Ainsi, un minimum d'activité d'éclair est clairement identifié pendant les mois de juin, juillet et août avec une proportion de l'activité mensuelle d'éclairs autour de 4%. Tandis que l'activité maximale est centrée sur la période décembre - janvier et de durée variable selon l'année considérée. Selon l'activité mensuelle moyenne de la figure 3, la période de grande activité dure environ six mois à partir d'octobre jusqu'à mars.

### 3.3 Evolution diurne de l'activité d'éclairs

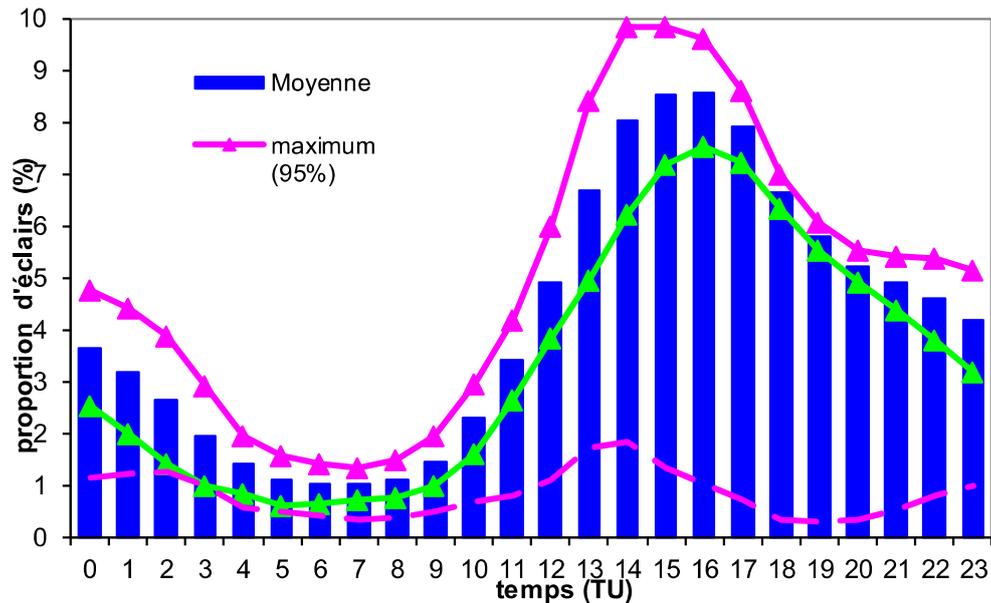


Figure 4. Evolution diurne de l'activité d'éclair

La figure 4 décrit l'évolution diurne de l'activité d'éclair sur toute la zone d'étude, en termes de proportions horaires. La proportion horaire d'éclairs représente le rapport entre la somme des quantités d'éclairs détectés par WWLLN pendant une heure de la journée durant une année et la quantité d'éclairs détectés par WWLLN durant toute l'année. La proportion horaire moyenne, pour la période de 2005 à 2013, est représen-

tée par un histogramme tandis que la variabilité sur toute la période est tracée avec deux courbes qui affichent les valeurs minimales et maximales dans les intervalles de confiance de 95%. La ligne pointillée montre l'écart-type. La proportion associée à une heure donnée correspond aux éclairs produits jusqu'à l'heure suivante. La proportion minimale est comprise entre 05h00 et 08h00 TU (06h00 et 09h00 locale) et la maximale

entre 14h00 et 17h00 TU (15h00 et 18h00 locale).

### 3.4 Distribution spatiale de l'activité d'éclairs

#### 3.4.1. Densité d'éclairs

La densité moyenne d'éclair pour chaque année, de 2005 à 2013, est représentée sur la figure 5. L'échelle n'est pas identique sur tous les graphiques de la figure 5 ; elle est adaptée aux valeurs à représenter. La même

tendance est observée pour chaque année: un maximum de forte densité est observé dans une même région restreinte de la RDC, autour de 28°E de longitude et dans la bande latitudinale 1°S - 2°S, approximativement. La distribution de la densité dans cette région sera analysée en détail au point 3.4.4. Le contraste de la densité dans cette région avec le reste de la zone est variable d'une année à l'autre.

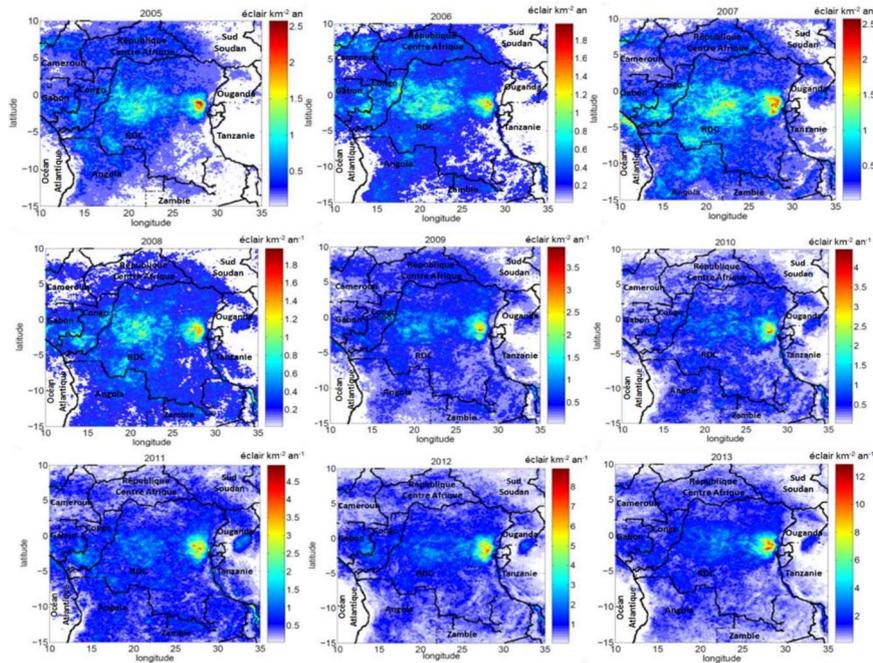


Figure 5. Densité d'éclairs WWLLN (éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$ ) dans la zone d'étude.

Une autre région de grande densité d'éclairs est visible sur les figures 5a-d de 2005 à 2008. La taille de ce maximum secondaire est variable d'une année à l'autre. Mais il s'étend du centre de la RDC jusqu'au Congo et au Gabon, à l'ouest, et au nord de l'Angola

au sud. Pour les années suivantes sur les figures 5e-i, de 2009 à 2013, la densité d'éclairs dans cette grande région de maximum secondaire est moins prononcée par rapport au maximum principal.

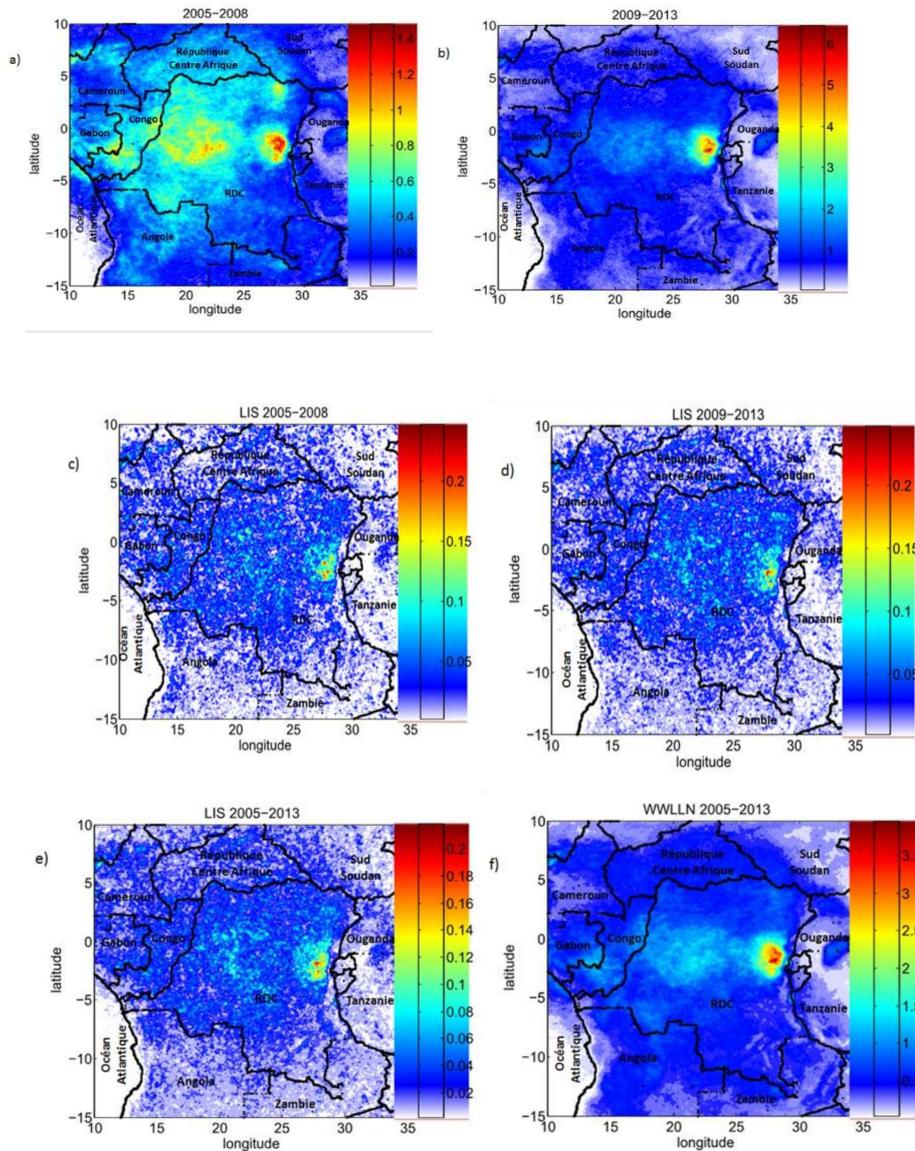


Figure 6. Densité moyenne d'éclairs WLLN ( $\text{éclairs km}^{-2} \text{an}^{-1}$ ) pour les périodes 2005-2008 (a) et 2009-2013 (b). Densité moyenne d'éclairs LIS ( $\text{éclairs km}^{-2} \text{an}^{-1}$ ) pour la période 2005-2008 (c) et 2009-2013 (d). Densité annuelle d'éclairs ( $\text{éclairs km}^{-2} \text{an}^{-1}$ ) pour toute la période 2005-2013 à partir des données LIS (e) et à partir des données WLLN (f).

La Figure 6a-b affiche la répartition des valeurs moyennes de la densité d'éclairs à partir de données WLLN pour deux périodes distinctes, 2005-2008 (Figure 6a) et 2009-2013 (Figure 6b). Le contraste entre le maximum aigu situé à l'Est de la RDC et le reste de la zone est beaucoup plus prononcé au

cours de la deuxième période. Ainsi, la grande région avec des valeurs de densité relativement importantes dans le centre et à l'ouest du bassin du Congo (région du maximum secondaire) est beaucoup plus visible au cours de la première période. La plus grande valeur de la densité d'éclairs dans la

région du maximum principal observé à l'est de la RDC varie de 1,5 à 6,5 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  de l'une des périodes à l'autre, alors qu'elle varie d'environ 1 à 2 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  dans la région du maximum secondaire.

Afin de vérifier si la différence observée entre les deux périodes est due à des effets naturels, l'activité d'éclairs observée par LIS est analysée de la même manière. Ainsi, la figure 6c-d affiche la densité moyenne d'éclair obtenue à partir de données LIS pour les mêmes périodes 2005-2008 et 2009-2013. La différence de contraste observée à partir des données WWLLN pour les deux périodes n'est plus visible. En effet, les deux échelles sont identiques et la distribution de la densité d'éclairs est très proche pour les deux graphiques. Par conséquent, la différence observée à partir des données WWLLN pour les deux périodes est probablement due à une évolution de l'efficacité de la détection dans la région étudiée. La Figure 6e-f montre que les structures de densité d'éclairs obtenues avec les données WWLLN et les données LIS pour toute la période d'étude présentent les mêmes caractéristiques.

#### 3.4.2 Relation entre densité d'éclairs et nombre de jours d'orages

Afin de comparer l'activité d'éclair dans les différentes régions du Bassin du Congo, nous avons calculé le nombre de jours d'orage avec la même résolution ( $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ). La figure 7 affiche la structure de la densité d'éclairs (a) et celle du nombre de jours d'orages (b) en 2013. Dans un pixel donné, une journée est considérée comme orageuse si au moins un éclair est détecté. On constate que le nombre de jours d'orages

est maximal dans la zone où la densité d'éclairs est maximale dans l'Est de la RDC (Figure 7). Cela signifie que les grandes densités d'éclairs sont principalement dues à un grand nombre de jours d'orages. Cependant, les plus grandes valeurs d'éclairs sont dispersées et le contraste avec le reste de la région est plus fort pour la densité d'éclairs. Cela signifie que le maximum de densité d'éclairs est non seulement l'effet d'un plus grand nombre de jours d'orages, mais aussi d'un plus grand nombre d'éclairs pendant ces jours d'orage.

Au cours de la période d'étude, la valeur maximale du nombre de jours d'orage augmente de 114 jours en 2005 à 189 jours en 2013 dans la région du maximum principal, alors que la densité maximale d'éclairs augmente de 1,90 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  en 2005 à 12,86 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  en 2013. Comparativement, l'augmentation de la densité d'éclairs est beaucoup plus grande suite à l'augmentation du DE du WWLLN.

Afin de comparer l'activité journalière d'éclairs quand les orages se produisent, nous avons calculé le nombre moyen d'éclairs par jour d'orage avec la même résolution spatiale et le résultat est affiché dans la figure 7c. Ce paramètre est moins contrasté que la densité d'éclairs ou le jour d'orages. Il convient de noter que ce nombre moyen d'éclairs par jour d'orages est plus grand dans les régions d'activité maximale en termes de densité d'éclair et de nombre de jours d'orage, à savoir l'Est de la RDC. Dans cette région, le nombre d'éclairs par jour d'orage atteint environ 8 éclairs  $\text{jour}^{-1}$ , alors qu'il atteint environ 5 éclairs  $\text{jour}^{-1}$  dans la région centrale du bassin du Congo.

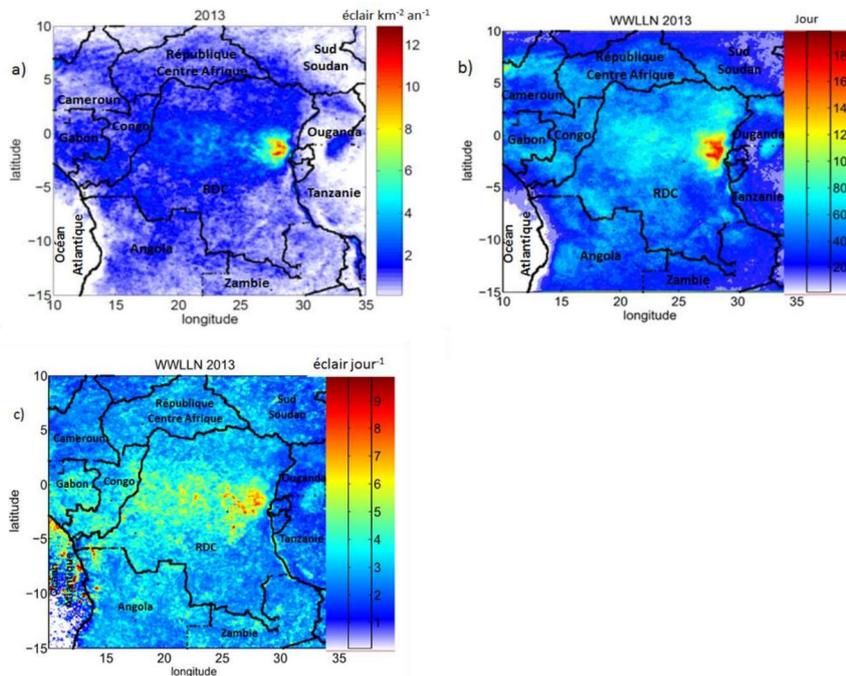


Figure 7. Densité moyenne d'éclairs (éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$ ) pour 2013 (a) et le nombre de jour d'orages pour 2013 (b), à partir des données WWLLN. (c) Nombre d'éclairs par jour d'orage (éclair  $\text{jour}^{-1}$ ) pour 2013.

### 3.4.3 Relation entre densité d'éclairs et caractéristiques de surface

La figure 8 montre une comparaison de la densité moyenne d'éclairs sur toute la période 2005-2013 avec l'orographie.

La valeur maximale moyenne est à environ 4 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  dans l'Est de la RDC ; cette valeur est à peu près sept à huit fois les valeurs moyennes observées dans la plupart des parties du domaine. La plupart des grandes valeurs de densité sont situées au sud de l'équateur et on doit noter que la densité d'éclairs est souvent renforcée sur les principaux lacs comme le lac Victoria (33°E; 1°S) ou le lac Tanganyika (34°E; 10°S).

D'autre part, les lacs situés plus au nord influencent moins la densité d'éclairs, par exemple le lac Edouard (29,67°E; 0,67°S) et le lac Albert (30,67°E; 1,33°N). La grande région du maximum secondaire de densité d'éclairs observée au sud de l'équateur et à l'ouest du maximum aigu, correspond à la zone forestière et est caractérisée par une altitude inférieure à 1000 mètres. De petites zones de plus grandes densités sont également observées dans la partie ouest de la région, en particulier sur la frontière Congo-Cameroun entre (14°E; 2,5°S) et sur le littoral du Gabon (11°E; 3,5°S).

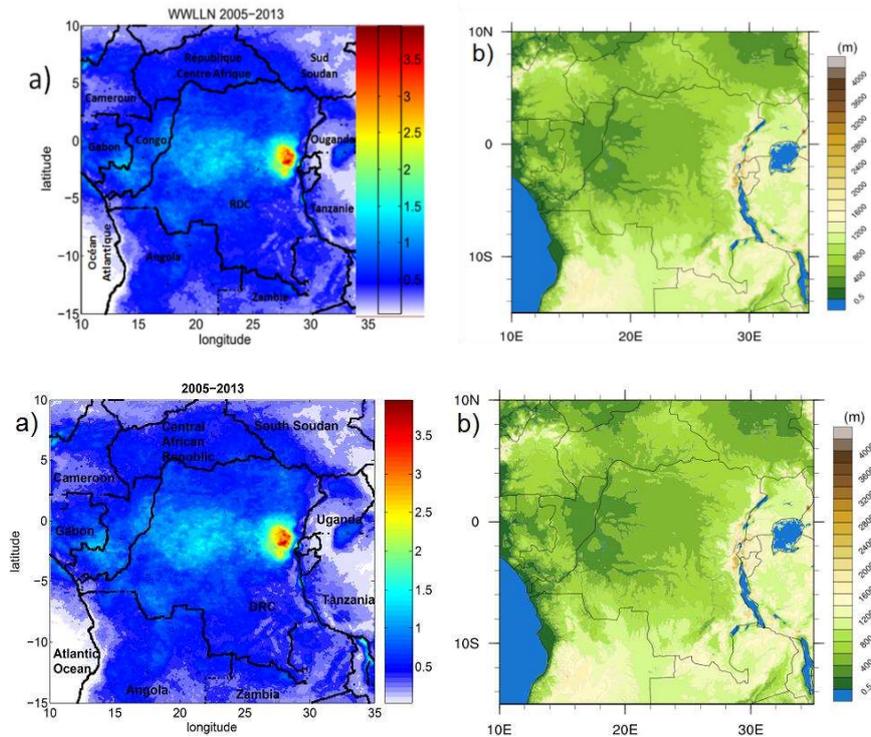


Figure 8. (a) Densité moyenne d'éclairs (éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$ ) à partir des données WLLN dans toute la région pour la période 2005-2013. (b) Orographie (m) dans la même zone.

### 3.4.4 Distribution de la densité d'éclairs dans la région du maximum principal

La densité d'éclairs dans la région du maximum principal est représentée en détail sur les figures 9a-d, pour plusieurs années (2005, 2007, 2009 et 2013). La densité d'éclairs est moyennée sur la période de 9 ans pour être représentative de la période complète d'étude en termes de localisation et est affichée dans la figure 9e. L'orographie de la région est affichée dans la figure 9f. L'échelle de densité d'éclairs est adaptée à chaque graphique, et elle varie entre la valeur minimale et la valeur maximale trouvée dans la région. La plupart des lacs présentent une grande densité d'éclairs ; c'est le cas pour le lac Kivu (29,1°E; 2°S) et la partie nord du lac Tanganyika (29,5°E; 3,5°S). Au-dessus et autour des plus hautes montagnes de la région à plus de 4000 m, en particulier à la frontière entre la RDC et

l'Ouganda (29,9°E; 0,4°N), la densité d'éclairs est plus faible.

La région de plus grandes valeurs de densité d'éclairs a à peu près la même forme et la même taille chaque année, comme indiqué dans les figure 9a-d pour différentes années et à la figure 9e pour la moyenne sur la période 2005-2013. Elle a une extension d'environ 300 km suivant la direction nord-sud et 200 km suivant la direction est-ouest et semble présenter deux coeurs de plus grandes valeurs séparées d'environ 75 km ; l'un proche de 1°S de latitude et l'autre près de 2°S. La valeur maximale peut être située dans l'un ou l'autre des coeurs en fonction de l'année. Cette valeur est à environ 4 éclairs  $\text{km}^2 \text{an}^{-1}$  et est située dans le coeur sud de la figure 9e affichant la densité moyenne, à environ 28,1°E de longitude et 1,8°S de latitude. La forme de la distribution de la densité moyenne est similaire à celle de 2013, ce qui

révèle une contribution plus forte de cette année dans la distribution moyenne. Cette région de grandes valeurs de densité d'éclairs est située à l'ouest d'une chaîne de

montagnes (la chaîne de Mitumba) orientée suivant la direction sud-nord et caractérisée par des sommets de plus de 2500 m d'altitude près du lac Kivu.

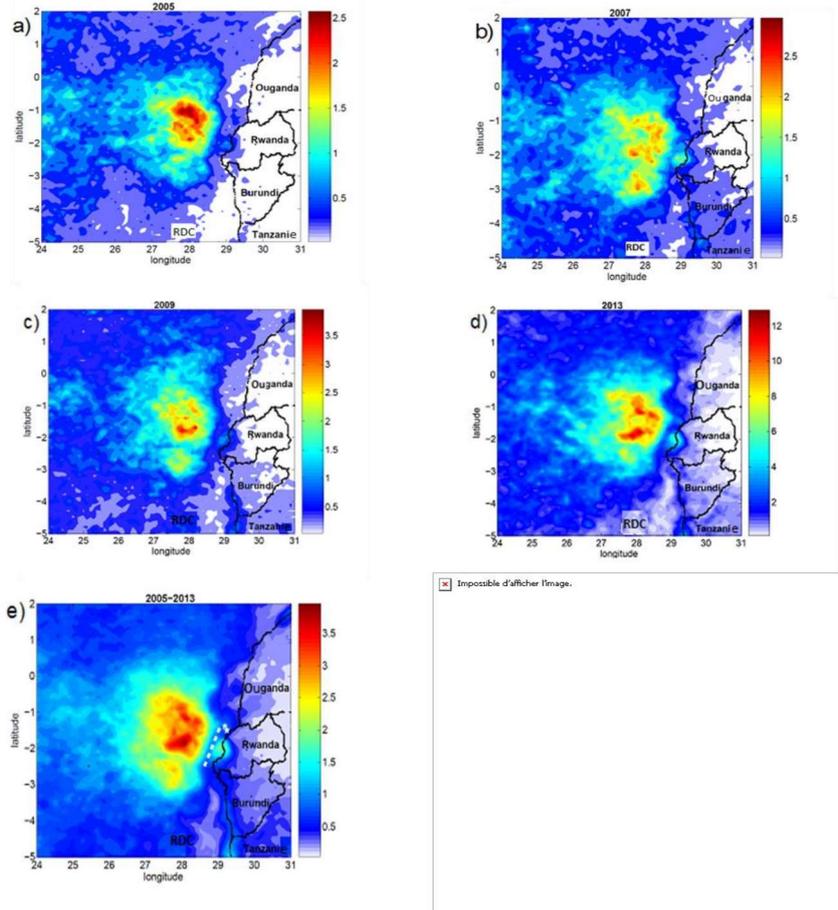


Figure 9. Densité d'éclairs (éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$ ) à partir des données WWLLN dans la région du maximum pour (a) 2005, (b) 2007, (c) 2009, (d) 2013, (e) la période 2005-2013. Dans e) la ligne en pointillés représente une chaîne de montagnes à l'ouest du lac Kivu et les étoiles blanches deux volcans actifs dans la région. (f) Orographie (m) dans la même région.

### 3.5 Répartition zonale d'éclairs

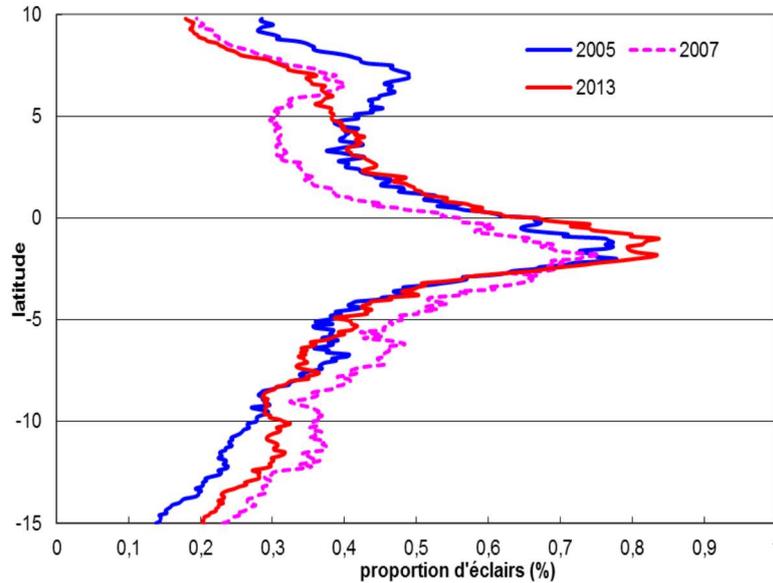


Figure 10. Répartition zonale d'éclairs (%) à partir de données WWLLN, avec une résolution de 0,1 ° pour 2005, 2007 et 2013 dans toute la région.

La Figure 10 montre la distribution zonale des éclairs détectés par WWLLN sur toute la zone d'étude, en 2005, 2007 et 2013. Cette répartition montre la dissymétrie par rapport à l'équateur puisque son maximum est clairement localisé dans l'hémisphère sud entre 1°S et 2°S en fonction de l'année. Toutes les distributions annuelles présentent une forme globale similaire.

#### 4 Discussion

On constate que tandis que les nombres d'éclairs détectés à l'échelle planétaire et l'efficacité de détection globale du réseau WWLLN ont augmenté régulièrement de 2005 à 2008, suite à l'augmentation du nombre de stations et à l'amélioration de l'algorithme de traitement des données (Rodger et al., 2006, Rodger et al., 2008), le nombre d'éclairs détectés en RDC par le réseau WWLLN pendant cette période est resté presque constant, exception faite pour l'année 2007 (voir figure 2). Ceci serait dû au fait que les stations qui ont été ajoutées au réseau pendant cette période n'auraient pas eu une grande influence dans la région de la

RDC. Par contre les stations ajoutées au réseau de 2009 à 2013 auraient eu une grande influence dans cette région c'est pourquoi le nombre d'éclairs détectés a augmenté régulièrement de 2008 à 2013.

L'évolution diurne de l'activité d'éclair obtenue dans cette étude est typique de l'évolution journalière caractéristique de régions continentales telle qu'elle est représentée par exemple dans Collier et al. (2006), pour une partie de l'Afrique australe dont une fraction est incluse dans la zone correspondant à la présente étude, dans Liu et Zipser (2008) pour les régions tropicales du monde entier grâce à des données LIS, ou encore dans Proestakis et al. (2016) pour la superficie couverte par le réseau ZEUS aux latitudes moyennes.

Selon la lignée pointillée de l'écart type (Figure 4), la variabilité diurne est importante au cours de deux périodes de la journée, autour de 01h00 et 14h00 TU, et elle est faible au cours de deux autres périodes, autour de 07h00 et 19h00 TU. Ainsi, la variabilité présente un cycle de 12 heures, comme indiqué par la ligne en pointillé de l'écart type (2

SD). Cela signifie que l'activité orageuse est plus variable d'une année à l'autre autour de 01h00 et 14h00 TU. Mais l'évolution diurne peut être différente d'une région à l'autre, comme décrit dans Vernugopal et al. (2016). Les valeurs de densité d'éclairs trouvées dans ce travail ne sont pas représentatives et directement comparables à celles des autres régions de la Terre couvertes par des systèmes régionaux de détection d'éclairs comme par exemple le NLDN (National Lightning Detection Network) aux États-Unis (Orville et Huffines, 2001) parce que l'efficacité de détection du WWLLN est faible. En appliquant l'efficacité de détection déduite par comparaison avec les données LIS, la valeur maximale locale du nombre total d'éclairs est estimée pour chaque année dans la présente étude. La valeur moyenne trouvée est égale à 157,23 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$ , ce qui est tout à fait comparable à la valeur 160 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  rapportée par Cecil et al. (2014). Comme la résolution adoptée dans la présente étude est de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , nous trouvons des valeurs plus élevées que Christian et al. (2003) qui ont rapporté 82,7 éclairs  $\text{km}^{-2} \text{an}^{-1}$  pour la valeur maximale de la densité d'éclairs à partir des données LIS pour une résolution de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .

La valeur maximale annuelle de la densité d'éclair est systématiquement située dans l'Est de la RDC, dans la même zone où de nombreux auteurs ont situé le maximum de l'activité d'éclairs planétaire, comme Christian et al. (2003) qui l'ont faussement attribué au Rwanda, Cecil et al. (2014) et Albrecht et al. (2011).

Comme les montagnes les plus élevées dépassant 3000 m sont situées à environ  $28,5^\circ\text{E}$ , la présence des montagnes, mise en évidence par la ligne blanche pointillée sur la figure 9e, est un élément favorable pour le développement des orages susceptibles de produire une forte densité d'éclairs. La présence de lacs à la même latitude, le lac Kivu à petite échelle et le lac Victoria à grande échelle, peut également fournir l'humidité pour favoriser la convection et le développement des orages. Une situation analogue est observée à proximité du lac Maracaibo dans

l'État de Zulia au Venezuela, pour laquelle Munoz et al. (2016) montre le rôle de la topographie complexe et d'un Jet nocturne de faible altitude dans le bassin de Maracaibo, dans l'accroissement de l'activité d'éclairs. D'ailleurs plusieurs travaux utilisant des données provenant des réseaux régionaux et nationaux, basés au sol, de détection d'éclairs, ont révélé comment les paramètres environnementaux comme le relief et la brise des lacs peuvent affecter la distribution spatiale d'éclairs, par exemple (Hodanish et al., 1997 ; Soriano et al., 2005 ; Antonescu et Burcea, 2010 ; Pujol et al., 2005 et 2011). La localisation des plus grandes valeurs du nombre moyen d'éclairs par jour d'orage à l'Est de la RDC est en accord avec la figure 7a-b qui montre un contraste plus important pour la densité d'éclairs dans cette région. Cela indique que dans cette région, les orages sont soit plus actifs, soit plus stationnaires, soit plus nombreux, soit les deux ou trois à la fois. Certaines très grandes valeurs du nombre moyen d'éclairs par jour d'orages sont également observées localement dans des régions de faibles densités d'éclairs et de faible nombre de jours d'orage, manifestement des régions de faible activité (figure 7 c). C'est par exemple le cas le long de la côte Ouest sur l'océan Atlantique avec des valeurs dépassant 10 éclairs  $\text{jour}^{-1}$ . Dans ces régions les orages sont probablement rares mais intenses.

## Conclusion

L'évolution spatio-temporelle de l'activité d'éclair dans le bassin du Congo a été examinée dans ce travail. Nous avons trouvé que le cycle annuel d'activité d'éclairs présente une période de forte activité entre octobre et mars, au cours de laquelle environ 10% du total des éclairs sont produits chaque mois, et une période de faible activité de juin à août avec environ 4,5% du total d'éclairs produit chaque mois. Nous avons montré que la variabilité interannuelle du cycle diurne de l'activité d'éclair présente un cycle de 12 heures. Nous avons trouvé que le maximum de l'activité d'éclairs est situé

dans l'Est de la RDC dans une région longée par une chaîne de montagnes dont certaines altitudes peuvent dépasser 3000 mètres, quelle que soit l'année considérée et la période de l'année. En 2013, ce maximum en termes de densité d'éclairs et de nombre de jours d'orages a atteint 12,86 éclairs km<sup>2</sup> an<sup>-1</sup> et 189 jours, respectivement. En outre, le maximum du nombre d'éclairs par jour d'orage est situé dans la même région, ce qui signifie que les orages y sont soit plus nombreux soit plus intenses soit plus stationnaires, ou les deux ou trois à la fois. Certains des résultats de cette étude serviront de base pour une étude ultérieure visant à améliorer les connaissances sur la fréquence des orages dans le Bassin du Congo et à scruter les caractéristiques des orages telles que leur formation, leur emplacement, leur occurrence, leur déplacement et leur durée de vie.

#### Remerciements

Les auteurs remercient le World Wide Lightning Location Network (WWLLN) (<http://wwlln.net/>) pour les données d'éclairs utilisées dans cette étude. Ils sont reconnaissants à la NASA (National Aeronautic and Space Administration) et au Global Hydrology Resources Center (GHRC) pour les données LIS disponibles sur leur site web. L'un des auteurs est reconnaissant au Ministère des Affaires Étrangères de la France, à l'ambassade de France en RDC, en particulier à l'Attaché de Coopération Patrick Demougin, pour le financement de ses trois séjours en France. Il remercie aussi le Groupe International de Recherche en Géophysique Europe / Afrique (GIRGEA) pour l'organisation de la coopération, en particulier Docteur Christine Amory Mazaudier.

#### Références

1. Albrecht, R.I., Goodman, S.J., Petersen, W.A., Buechler, D.E., Bruning, E.C., Blakeslee, R.J., Christian, H.J., 2011. The 13 years of TRMM Lightning Imaging Sensor: from individual flash characteristics to decadal tendencies. Proceedings of the XIV International Conference on Atmospheric Electricity, 08–12 August 2011, Rio de Janeiro, Brazil.
2. Antonescu, B., Burcea, S., 2010. A cloud-to-ground lightning climatology for Romania, *Mon. Weather Rev.*, 138, 579–591. DOI: 10.1175/2009MWR2975.1.
3. Boccippio, D.J., Koshak, W.J., Blakeslee, R.J., 2002. Performance Assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor. Part I: Predicted Diurnal Variability. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19: 1318–1332.
4. Cecil, D., Buechler, D.E., Blakeslee, R.J., 2014. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description, *Atmos. Res.*, vol. 135, pp 404–414, doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.028.
5. Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Goodman, S.J., Mach, D.A., Stewart, M.F., Buechler, D.E., Koshak, W.J., Hall, J.M., Boeck, W.L., Driscoll, K.T., Boccippio, D.J., 1999. The Lightning Imaging Sensor. Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Huntsville, AL, NASA, pp. 746–749.
6. Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Boccippio, D.J., Boeck, W.L., Buechler, D.E., Driscoll, K.T., Goodman, S.J., Hall, J.M., Koshak, W.J., Mach, D.M., Stewart, M.F., 2003. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J. Geophys. Res.* 108(D1), 4005, doi: 10.1029/2002JD 002347.
7. Chronis, T.G., Goodman, S.J., Cecil, D., Buechler, D., Robertson, F.J., Pittman, J., Blakeslee, R.J., 2008. Global lightning activity from the ENSO perspective. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19804, doi: 10.1029 /2008GL03 4321.
8. Collier, A.B., Hughes, A.R.W., Lichtenberger, J., Steinbach, P., 2006. Seasonal and diurnal variation of lightning activity over southern Africa and correlation with European whistler observations. *Ann. Geophys.* 24. 529–542. doi:10.5194/angeo-24-529-2006.
9. Dowden, R.L., Brundell, J.B., Rodger, C.J., 2002. VLF lightning location by

- time of group arrival (TOGA) at multiple sites, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 64, 817-830.
10. Hodanish, S., Sharp, D., Collins, W., Paxton, C., and Orville, R.E., 1997. A 10-yr monthly lightning climatology of Florida: 1986–95. *Weather Forecast.* 12, 439–448.
  11. Kigotsi, J.K., S.Soula, J. F. Georgis, C. Barthe, M.A.Kazadi, 2016. An Estimation of Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network in the Congo Basin using Lightning Imaging Sensor as Reference, sous presse dans les *Annales de la Faculté des Sciences de l'Unikin*.
  12. Liu, C., Zipser, E., 2008. Diurnal cycles of precipitation, clouds, and lightning in the tropics from 9 years of TRMM observations. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L04819, doi: 10.1029/2007G L032437.
  13. Munoz, A.G., Daz-Lobaton, J., Chourio, X., Stock, M.J., 2016. Seasonal prediction of lightning activity in north western Venezuela: Large-scale versus local drivers, *Atmos. Res.*, doi: 10.1016/j.atmosres.2015.12.018.
  14. Orville, R.E., Huffines, G.R., 2001. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989–98. *Monthly Weather Review*, 129, 1179–1193.
  15. Proestakis, E., Kazadzis, S., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Kazantzidis, A., 2016. Lightning activity and aerosols in the Mediterranean region. *Atmos. Res.*, 170, 66-75.
  16. Pujol, O., Georgis, J., Chong, M., Roux, F., 2005. Dynamics and microphysics of orographic precipitation during MAP-IOP3. *Q. J. R. Meteor. Soc.* 131, 2795–2819.
  17. Pujol, O., Lascaux, F. Georgis, J.-F., 2011. Kinematics and microphysics of MAP-IOP3 event from radar observations and Meso-NH simulations. *Atmos. Res.*, vol. 101, 1–2, pp. 124–142.
  18. Rodger, C.J., Werner, S., Brundell, J.B., Lay, E.H., Thomson, N.R., Holzworth, R.H., Dowden, R.L., 2006. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study. *Ann. Geophys.*, 24.3197–3214.
  19. Rodger, C.J., Brundell, J.B., Holzworth, R.H., Lay, E.H., 2008. Growing Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network, *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.*, Coupling of thunderstorms and lightning discharges to near-Earth space: Proceedings of the Workshop, Corte (France), 23-27 June 2008, 1118, 15-20, DOI:10.1063/1.31 37706.
  20. Soriano, L.R., De Pablo, F., Tomas, C., 2005. Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 67, 1632–1639.
  21. Soula, S., Kigotsi, K.J., Georgis, J.F., Barthe, C., Lightning climatology in the Congo Basin, *Atmospheric Research* (2016), doi: 10.1016/j.atmosres.2016.04.006.
  22. Venugopal, V., Virts, K., Sukhatme, J., Wallace, J.M., Chattopadhyay, B., 2016. A comparison of the fine-scale structure of the diurnal cycle of tropical rain and lightning. *Atmos. Res.*, 169, 515-522.
  23. Williams, E., Stanfill, S., 2002. The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity. *C. R. Physique* 3, 1277–1292. doi:10.1016/S1631- 0705(02) 01407-X.