

ÉVOLUTION DE LA COUVERTURE NUAGEUSE BASSE DE SAISON SÈCHE SUR LA FAÇADE ATLANTIQUE DE L'AFRIQUE CENTRALE DE L'ÉCHELLE DIURNE À INTERANNUELLE

Vincent MORON¹, Raffael AELLIG², Lewis BACKITA³, Alexandre BERGER⁴, Sylvain BIGOT⁵, Pierre CAMBERLIN⁴, Thierry CASTEL⁴, Olivier CHAMPAGNE⁵, Andreas FINK², Peter KNIPPERTZ², Jean Damien MALOBA MAKANGA³, Armand MARISCAL⁵, Béatrice MOREL⁶, Amine OUHECHOU⁵, Julien PERGAUD⁴, Nathalie PHILIPPON⁵, Gaston SAMBA⁷, Geneviève SEZE⁸

¹ CEREGE, Aix Marseille Université, Aix en Provence, France, moron@cerege.fr

² IMK, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Allemagne

³ LANASPET, Université Omar Bongo, Libreville, Gabon

⁴ CRC-BIOGEOSCIENCES, Université Bourgogne Franche Comté, Dijon, France

⁵ IGE, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

⁶ LE2P, Université de La Réunion, Saint Denis, France

⁷ CREE, Université Marien Nguabi, Brazzaville, République du Congo

⁸ LMD, Sciences Sorbonne Université, Paris, France

Résumé : Malgré son importance bioclimatique, peu d'études se sont intéressées à la couverture nuageuse basse stratiforme de saison sèche (juin-septembre) de la façade Atlantique de l'Afrique Centrale. Grâce à des données in-situ documentant la période 1971-2019, nous montrons que cette couverture nuageuse est sous-estimée par les observations satellites SAFNWC et les modèles CMIP6. Nous identifions trois types de journées : claires, nuageuses la nuit et totalement nuageuses, ces dernières étant plus fréquentes sur la côte et l'intérieur, au vent des Monts de Cristal et de Chaillu. A l'échelle interannuelle, les anomalies de température dans l'Atlantique tropical Sud, le Pacifique équatorial et le bassin du Congo, en modulant les cellules méridienne et zonale de circulation jouent sur la stabilité des basses couches, le cisaillement vertical et in-fine la fréquence des journées les plus nuageuses.

Mots-Clés : Afrique Centrale – nuages bas – cycle diurne – modèles CMIP6

Abstract: Evolution of dry season low cloud cover over the Atlantic coast of Central Africa from diurnal to interannual scale

Despite its bioclimatic importance, few studies have focused on the stratiform low-level cloud cover of the dry season (June-September) of the Atlantic coast of Central Africa. Using in-situ data documenting the period 1971-2019, we show that this cloud cover is underestimated by SAFNWC satellite observations and CMIP6 models. We identify three types of days: clear, cloudy at night and totally cloudy, the latter being more frequent on the coast and inland, to the windward of the Cristal and Chaillu Mountains. On an interannual scale, temperature anomalies in the South Tropical Atlantic, the equatorial Pacific and the Congo Basin, by modulating the meridional and zonal circulation cells, influence the stability of the lower layers, the vertical shear and ultimately the frequency of the cloudiest days.

Keywords : Central Africa - low clouds - diurnal cycle - CMIP6 models

Introduction

La façade Atlantique de l'Afrique Centrale (principalement de l'extrême sud du Cameroun au SW de la république du Congo, jusque vers 14°E) présente une saison sèche très marquée (<1mm/mois en moyenne), centrée sur juin-septembre et combinée à une couverture nuageuse basse persistante. La fraction élevée de nuages bas (> 70 % Dommo et al., 2018), limite fortement le rayonnement solaire incident en surface (Philippon et al., 2019, 2022), diminuant fortement l'amplitude diurne des températures et le taux d'évapotranspiration (Philippon et al., 2019). Ceci a des impacts majeurs sur le fonctionnement et la composition des forêts (Réjou-Méchain et al. 2021). Une forêt ombrophile est ainsi présente sur ce secteur,

bien que les précipitations annuelles y soient bien plus faibles que dans d'autres secteurs forestiers équatoriaux comme l'Amazonie ou Bornéo. Malgré cette importance bioclimatique, peu d'études se sont intéressées à cette couverture nuageuse basse de saison sèche, en particulier son évolution de l'échelle diurne à saisonnière, sa variabilité interannuelle et la capacité des estimations satellites, des réanalyses et des modèles climatiques globaux à la représenter. De premiers éléments de réponse obtenus dans le cadre du projet ANR-DFG franco-allemand « DYVALOCCA » (Dynamics, Variability and bioclimatic effects of Low Clouds in Western Central Africa) sont présentés ici.

1. Climatologie des nuages bas de saison sèche

1.1. Observations in-situ

La principale source de données de couverture nuageuse basse observée utilisée est la base EECRA (Eastman et Warren, 2014). Elle fournit la fraction (en octas) et le type de nuages bas (9 types comprenant cumulus, stratocumulus, stratus, et cumulonimbus). Les données aux heures synoptiques principales (00, 06, 12, et 18 UTC) et intermédiaires (03, 09, 15, 21 UTC) ont été extraites pour 88 stations sur la fenêtre spatiale 7°N-7°S/5°-18° (Cameroun, Gabon, République du Congo, figure 1) et la période 1971-2009. Les bases SYNOP, MIDAS (Met Office, 2012), ISD (Smith et al., 2011) et AMMA (Fleury et al., 2011) ont également été utilisées pour combler les lacunes d'EECRA et étendre les données tri-horaires jusqu'en 2019 (Champagne et al., 2022 ; Moron et al., 2022).

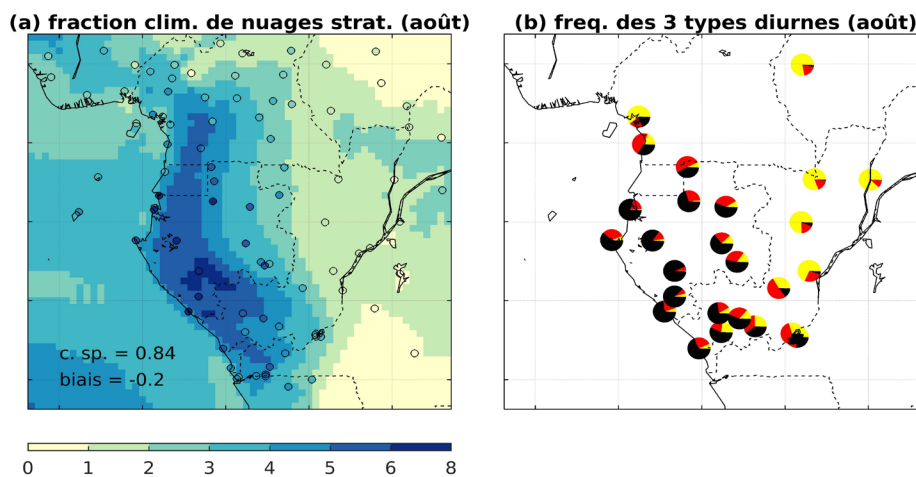


figure 1. a) fraction moyenne de nuages stratiformes en août calculée à partir des données aux stations (cercles) et des réanalyses ERA-5 (aplats). c.sp correspond à la corrélation spatiale entre stations et pixels ERA-5, et biais au biais dans ERA-5. b) fréquence des 3 types de cycles diurnes aux stations en août.

En saison sèche (juin-septembre), la nuit, les stratocumulus sont dominants avec une fréquence de 66 % et des niveaux d'octas supérieurs à 5, puis les cumulonimbus (15 %). Pendant la journée, bien que moins dominants, les stratocumulus restent les plus fréquents (40%) suivis des cumulus (26%) en couverture moins compacte (3-7 octas) et d'une association cumulus-stratocumulus (17 %). Ces fréquences sont également modulées dans l'espace avec un net gradient est-ouest (figure 1a) : sur les plaines côtières et versants au vent des massifs (Mt de Cristal, massif du Chaillu) la fréquence des nuages bas dépasse 70 % contre 40 % sous le vent des massifs et sur les plateaux intérieurs.

Une classification dynamique (K-means) appliquée à la fraction de la nébulosité basse stratiforme (les bases de nuages cumuliformes sont mises à zéro) permet d'extraire 3 types de journées en fonction de son évolution au cours du cycle diurne (figure 2) : peu stratiformes (avec plutôt des types cumuliformes notamment la journée), très nuageuses toute la journée, et très nuageuses la nuit seulement. Les journées très nuageuses et claires montrent des signatures spatiales et temporelles opposées : les premières sont très

fréquentes en juillet-août, coeur de la saison sèche, de la zone côtière du Gabon au SW de la République du Congo (Moron et al., 2022). Les secondes sont bien plus présentes au nord de 2°N et à l'est de 14°E, surtout en mai-juin et en septembre-octobre. Les journées où le plafond stratiforme s'éclaircit partiellement durant la seconde moitié de la journée forment une transition spatio-temporelle entre le coeur gabonais, plutôt très nuageux, et les marges, le plus souvent claires.

1.2. Estimations satellites SAFNWC

La classification nuageuse du SAFNWC (Derrien et Le Gléau, 2005), dérivée des acquisitions du satellite MétéoSat Seconde Génération fournit des données au pas de temps de 15min et à la résolution de 5km sur la période 2008-2021. La confrontation avec les observations montre qu'elle sous-estime très fortement la couverture nuageuse basse. Cette sous-estimation est particulièrement prononcée la nuit en présence de stratocumulus, et de jour en présence de cumulus. Une majorité des ciels couverts en nuages bas sont classés « ciels clairs » par l'algorithme si bien qu'il n'est pas possible d'extraire des cycles diurnes de la couverture nuageuse basse proches des observations à partir des estimations du SAFNWC (Champagne et al. 2022).

1.3. Réanalyses ERA-5 et simulations CMIP6

La fraction de couverture nuageuse basse est également extraite des réanalyses ERA-5 et des simulations CMIP6 (couplées et type AMIP – Atmospheric Model Inter-comparison Project, Eyring et al., 2016) pour 8 modèles climatiques globaux (Camberlin et al., 2022). Les réanalyses ERA-5 ont tendance à légèrement surestimer cette fraction nuageuse notamment sur l'est du Cameroun et le nord de la République du Congo (figure 1a, 40 vs 20% dans les observations). Ceci s'explique probablement par le fait que dans ERA-5 les nuages bas incluent les nuages convectifs dont la base est relativement basse. Or ces nuages convectifs sont plus fréquents sur les marges nord et est de la région en cette saison. Malgré ce biais, ERA-5 reproduit très bien la variabilité interannuelle de la couverture nuageuse basse à l'échelle régionale.

Concernant les simulations CMIP6, la tendance générale est à la sous-estimation de la couverture nuageuse basse pour la région mais la diminution à l'est de 14°-15°E est correctement reproduite. La sous-estimation est cependant plus marquée dans les simulations couplées que dans les simulations forcées par les températures océaniques (type AMIP). Cette sous-estimation est en partie liée au biais chaud connu des modèles CMIP (Richter et Tokinaga, 2020), dans l'Atlantique équatorial est. Cependant, la sous-estimation de la couverture nuageuse n'est pas directement proportionnelle à l'amplitude de ce biais chaud.

2. Variabilité interannuelle des nuages bas de saison sèche

La variabilité interannuelle de la couverture nuageuse basse sur la période 1971-2019 est analysée sur la base des anomalies dans la fréquence des 3 types de jours au cours des bimestres mai-juin (début), juillet-août (coeur) et septembre-octobre (fin de saison). Les modes de variabilité extraits sont corrélés aux champs synchrones de température de surface de la mer et continentale (HadCRU v5), de précipitations (GPCP) et de dynamique atmosphérique (ERA-5). Les résultats obtenus suggèrent que les principaux facteurs de la variabilité interannuelle de la couverture nuageuse basse résident dans les températures de surface de la mer sur l'Atlantique tropical sud et équatorial, et secondairement dans le Pacifique équatorial, ceci via la modulation des cellules de circulation méridienne et zonale.

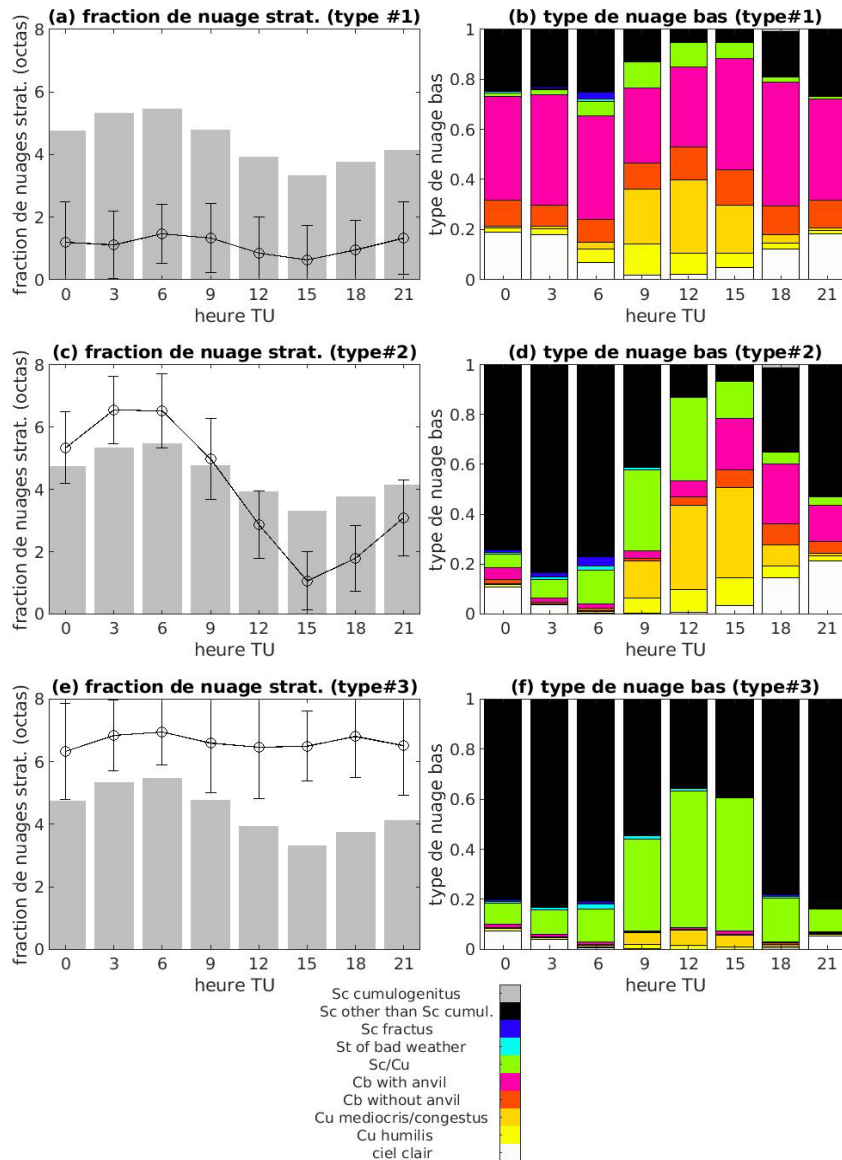


figure 2. (gauche) fraction de nuages stratiformes moyenne tri-horaire (barres grises avec 0.5 écart-type sous la forme d'un trait vertical) superposée avec la fraction de nuages stratiformes de 3 types de journées définis par une classification dynamique. (droite) : fréquence relative des 9 types de nuages bas pour les 3 types de journées. Les classes sont définies à partir de ~ 23000 jours-stations possédant des données de fraction nuageuse et le type de nuages bas sur 8 créneaux tri-horaires.

Ainsi, le type très nuageux est favorisé par des températures de surface de la mer anormalement basses sur l'Atlantique tropical sud et équatorial. De telles anomalies augmentent la stabilité et l'inversion thermique de basses couches et renforcent la composante zonale du vent en surface via le renforcement du gradient de température entre Atlantique équatorial et bassin du Congo. Une cellule méridienne relie également la couverture nuageuse basse avec la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) ouest-Africaine et dans l'Atlantique tropical, le type le plus nuageux étant alors plus fréquent quand la ZCIT est plutôt au nord de sa position normale. Ces relations sont plus fortes en début (mai-juin) et fin de saison (septembre-octobre) qu'au coeur de la saison (juillet-août). En effet en coeur de saison, les températures dans l'Atlantique tropical sud et équatorial sont alors inférieures à 24°C-25°C en moyenne, si bien que les anomalies chaudes impactent moins l'inversion thermique de basses couches qu'au début ou à la fin de la saison. En juillet-août, le type le plus nuageux est également favorisé en conditions chaudes de l'El Niño Southern Oscillation (ENSO) :

l'augmentation des températures dans la moyenne troposphère et le renforcement des vents d'est alors observés augmentent la stabilité dans les basses couches et le cisaillement vertical. La fin de saison (septembre-octobre) se caractérise enfin par une tendance à la hausse de la couverture nuageuse basse (Moron et al., 2022).

Si les réanalyses ERA-5 reproduisent correctement la variabilité interannuelle de la couverture nuageuse basse (coefficient de corrélation compris entre 0.7 et 0.8 à l'échelle régionale), les résultats sont plus contrastés pour les simulations CMIP6 type AMIP des 8 modèles retenus (figure 3). Seuls trois modèles montrent des corrélations supérieures à 0.6, et deux autres montrent des corrélations inférieures à 0.2 voire négatives (Camberlin et al., 2022).

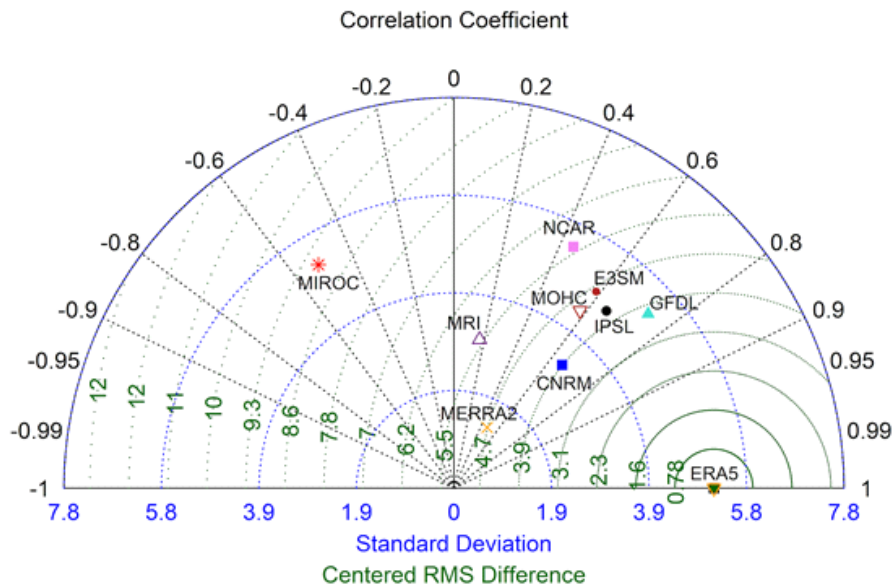


Figure 3: Diagramme de Taylor de la nébulosité basse dans le Nord-Ouest du Gabon (juin-septembre 1979–2014) dans les modèles CMIP6 (simulations type AMIP) et les réanalyses MERRA2. Les données ERA5 sont la référence. Pointillés noirs : corrélations. Pointillés bleus : écarts-types. Courbes vertes : erreur quadratique.

Conclusion

Les premiers résultats du projet franco-allemand DYVALOCCA (Camberlin et al., 2022 ; Champagne et al., 2022 ; Moron et al., 2022) mettent en évidence différents éléments concernant (1) les variations spatio-temporelles de la couverture nuageuse basse de saison sèche sur la façade Atlantique de l'Afrique Centrale, (2) leur représentation par les estimations satellites, les réanalyses et les modèles climatiques globaux, et (3) les facteurs atmosphériques et océaniques à grande échelle expliquant ces variations. Une campagne de terrain au Gabon prévue en juillet 2022 permettra de compléter ces analyses par des éléments sur les processus en jeu dans la couche limite pour expliquer les évolutions diurnes de la couverture nuageuse basse encore mal comprises.

Remerciement : le projet DYVALOCCA (<https://dyvalocca.osug.fr/>) est financé par l'ANR (ANR-19-CE01-0021) et la DFG (DFG FI 786/5-1). Il s'inscrit dans le Laboratoire Mixte International « DYCOFAC » de l'IRD (<https://www.lmi-dycofac.org/>).

Bibliographie

Camberlin P., Togbeji C.F., Pergaud J., Berger A., Aellig R., Fink A.H., Knippertz P., Moron V., et Philippon N., 2022: The Representation of Dry-Season Low-Level Clouds Over Western Equatorial Africa in Reanalyses and Historical CMIP6 Simulations. *Climate Dynamics*, soumis.

- Champagne O., Aellig R., Fink A.H., Philippon N., Camberlin P., Moron V., Knippertz P., Sèze G., et van der Linden R., 2022 : Climatology of low-level clouds over Western equatorial Africa based on ground observations and satellites, *J. Climate*, soumis.
- Derrien M., et Le Gléau H., 2005: MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC. *Int. J. Remote Sens*, **26**, 4707–4732.
- Dommo A., Philippon N., Vondou D.A., Sèze G., et Eastman R., 2018: The June–September Low Cloud Cover in Western Central Africa: Mean Spatial Distribution and Diurnal Evolution, and Associated Atmospheric Dynamics. *J. Climate*, **31**, 9585–9603.
- Eastman R., et Warren S.G., 2014: Diurnal Cycles of Cumulus, Cumulonimbus, Stratus, Stratocumulus, and Fog from Surface Observations over Land and Ocean. *J. Climate*, **27**, 2386–2404.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., et Taylor K.E., 2016 : Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1937–1958.
- Fleury L., Boichard J.-L., Brissebrat G., Cloché S., Eymard L., Mastrorillo L., Moulaye O., Ramage K., Asencio N., Coppeaux J., Devic, M.-P., Favot F., Ginoux K., Lafore J.-P., Polcher J., Redelsperger J.-L., Rousot O. et Tytéca M., 2011: AMMA information system: an efficient cross-disciplinary tool and a legacy for forthcoming projects. *Atmosph. Sci. Lett.*, **12**, 149–154.
- Met Office, 2012: Met Office Integrated Data Archive System (MIDAS) Land and Marine Surface Stations Data (1853–current). <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/220a65615218d5c9cc9e4785a3234bd0>
- Moron V., Camberlin P., Aellig R., Champagne O., Fink A.H., Knippertz P., et Philippon N. (2022) Interannual variability of low-level cloud cover over western equatorial Africa. *J. Climate*, soumis.
- Philippon N., Cornu G., Monteil L., Gond V., Moron V., Pergaud J., Sèze G., Bigot S., Camberlin P., Doumenge C., Fayolle A., et Ngomanda A., 2019: The light-deficient climates of western Central African evergreen forests. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 034007.
- Réjou-Méchain M, Mortier F, Bastin JF et al., 2021 : Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. *Nature*, **593**, 90–94.
- Richter I., et Tokinaga H., 2020 : An overview of the performance of CMIP6 models in the tropical Atlantic: mean state, variability, and remote impacts. *Climate Dynamics*, **55**, 2579–2601.
- Smith A., Lott, N., et Vose R., 2011. The Integrated Surface Database: Recent Developments and Partnerships. *Bull. Am. Meteorol. Soc*, **92**, 704–708.