HAL open science

Analyse de la variabilité multi-échelles du rayonnement solaire incident sur la façade atlantique de l'Afrique Centrale : observations in-situ, estimations satellitaires, et simulations climatiques CMIP6

Amine Ouhechou

To cite this version:

Amine Ouhechou. Analyse de la variabilité multi-échelles du rayonnement solaire incident sur la façade atlantique de l'Afrique Centrale : observations in-situ, estimations satellitaires, et simulations climatiques CMIP6. Météorologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2024. Français. ⟨NNT : 2024GRALU007⟩. ⟨tel-04658978⟩

HAL Id: tel-04658978

https://theses.hal.science/tel-04658978v1

Submitted on 22 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Autorisation HAL

HAL Authorization

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : STEP - Sciences de la Terre de l'Environnement et des Planètes
Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Environnement
Unité de recherche : Institut des Géosciences de l'Environnement

Analyse de la variabilité multi-échelles du rayonnement solaire incident sur la façade atlantique de l'Afrique Centrale : observations in-situ, estimations satellitaires, et simulations climatiques CMIP6

Analysis of multi-scale variability of incoming solar radiation on the Atlantic coast of Central Africa: in-situ measurements, satellite estimates and CMIP6 climate simulations.

Présentée par :

Amine OUHECHOU

Direction de thèse :

Nathalie PHILIPPON CHARGEE DE RECHERCHE, Université Grenoble Alpes	Directrice de thèse
Béatrice MOREL Université de la Réunion	Co-directrice de thèse

Rapporteurs :

Philippe BLANC
DIRECTEUR DE RECHERCHE, MINES Paris
Nadège MARTINY
MAITRESSE DE CONFERENCES, Université de Bourgogne

Thèse soutenue publiquement le **26 janvier 2024**, devant le jury composé de :

Nathalie PHILIPPON CHARGEE DE RECHERCHE HDR, CNRS délégation Alpes	Directrice de thèse
Philippe BLANC DIRECTEUR DE RECHERCHE, MINES Paris	Rapporteur
Nadège MARTINY MAITRESSE DE CONFERENCES, Université de Bourgogne	Rapporteure
Fatima DRIOUECH PROFESSEURE, Université Mohammed VI Polytechnique	Examinatrice
Sylvain BIGOT PROFESSEUR, Université Grenoble Alpes	Examinateur
Benoit HINGRAY DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS Délégation Alpes	Président

Invités :

Béatrice MOREL
MAITRESSE DE CONFERENCES, Université de la Réunion

Remerciements

Enfin, atteindre ce moment où je rédige ces mots de reconnaissance, alors que le manuscrit est déjà achevé, est un moment d'émotion profonde. Ces mots me permettent de réfléchir au chemin parcouru, aux personnes rencontrées en route et aux expériences marquantes qui ont enrichi mon parcours. Ces lignes marquent la conclusion d'un chapitre important de ma vie, et j'espère qu'ils apporteront un sourire à ceux qui y sont mentionnés et offriront un moment agréable à ceux qui auront la chance de les lire.

Je commence par exprimer ma profonde gratitude envers mes deux directrices de thèse. Tout d'abord, ***Nathalie Philippon***, qui m'a accordé sa confiance dès le premier jour et m'a soutenu tout au long de ces années, même pendant la période particulièrement difficile du COVID, qui nous a contraints au télétravail. Grâce à toi, j'ai eu la chance de m'initier au monde de la recherche, de bénéficier d'une liberté scientifique et d'apprendre de ton expertise. Je suis conscient que ce n'était pas toujours facile de m'encadrer, mais tu as toujours été là pour m'écouter. Je ne pourrai jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. Et à toi, ***Béatrice Morel***, un immense merci également. Tu as toujours été disponible lorsque j'avais besoin de conseils et de remarques, malgré la distance entre nous. Ta présence constante pour me guider dans la préparation de mes résumés, posters, et présentations, même pendant tes congés ou tes pauses, témoigne d'un dévouement exceptionnel. Avec vous deux, j'ai eu la chance de former un duo d'encadrement hors pair au cours de ces années. Merci du fond du cœur.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers ***Philippe Blanc*** et ***Nadège Martiny*** d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Leur temps et leur expertise déployés dans la lecture de ce manuscrit sont très appréciés. Je remercie également ***Sylvain Bigot***, ***Benoit Hingray*** et ***Fatima Driouech*** d'avoir accepté de faire partie de mon jury et pour nos échanges enrichissants lors de ma soutenance.

Mes années passées à l'Institut de Géosciences de l'Environnement (IGE) resteront gravées dans ma mémoire. Au sein de l'équipe PhyRev, nos moments de convivialité, que ce soit lors des animations scientifiques, des pique-niques ou des repas, étaient toujours très appréciés. Un remerciement particulier à mes collègues de bureau, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables. Merci à ***Elisa***, ***François***, ***Olivier***, ***Chloé***, ***Nelson*** et ***Martin***.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement tous les membres du projet Dyvalocca, avec qui j'ai eu de nombreuses réunions et discussions enrichissantes. Vos contributions ont indubitablement amélioré mon travail et renforcé l'esprit d'équipe en moi. Je souhaite particulièrement remercier ***Vincent Moron*** pour nos échanges et ses idées, merci également à ***Pierre***, ***Andreas***, ***Raffael***, ***Peter*** et ***Thierry*** pour leur précieuse collaboration.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les membres du comité de thèse, ***Martin Wild*** et ***Christopher Lennard***, dont les échanges à la fin de chaque année universitaire m'ont permis de progresser dans mon travail. Leurs remarques et leurs conseils ont été d'une grande valeur pour maintenir le cap.

Un grand merci à mes amis d'université, ***Ayoub Ouzzoukar***, merci pour être toujours là à mes côtés, surtout durant la rédaction de ce manuscrit. Ta présence et ton soutien vont bien au-delà de l'amitié. Je te suis infiniment reconnaissant pour tout ce que tu as fait pour moi. À ***Zainab El Kostali***, merci pour ton énergie positive, et d'être toujours là pour m'encourager. Un grand merci également à mon ami ***Faedi Loulidi***, avec qui j'ai partagé ma passion pour la science et des discussions sur la mécanique quantique. Merci également à mon cher ami ***Mohamed Rai***, ton soutien m'a permis de développer mon intérêt pour la programmation.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à tous les membres de ma famille, en particulier à mes deux petits frères, pour leurs appels et messages qui illuminent mes journées. Merci pour votre soutien constant tout au long de ces années de doctorat, que ce soit de près ou de loin, vous avez toujours été présents. Un immense merci à mes parents pour leurs sacrifices, leur confiance en moi et leur soutien indéfectible. Je ne saurais jamais vous remercier assez, je vous aime énormément.

Enfin, je dédie ce travail à mes grands-parents, que leurs âmes reposent en paix.

Voilà, j'ai essayé de remercier chaque personne qui a contribué à cette aventure, mais je m'excuse auprès de ceux que j'aurais pu oublier ou pour ne pas trop allonger ces lignes.

Résumé

L'Afrique centrale occidentale abrite les forêts les plus denses du bassin du Congo, deuxième plus grand massif forestier tropical après l'Amazonie. Elle se caractérise par un climat équatorial avec des températures élevées, un régime pluviométrique bimodal et surtout une longue saison sèche nuageuse, de juin à septembre. Malgré son importance écologique, la variabilité climatique de cette région a été peu étudiée par rapport à d'autres régions du continent africain, principalement en raison de la rareté des observations in-situ.

Reconnaissant ces défis posés par le manque de données in situ, cette étude explore la variabilité climatique en Afrique centrale occidentale sous l'angle du rayonnement solaire en surface, paramètre clef pour le fonctionnement des forêts tropicales. Dans ce contexte, cette thèse s'attache à établir une première climatologie du rayonnement solaire en surface pour la région, à en documenter la variabilité, en particulier durant la saison sèche nuageuse de juin à septembre, et à évaluer la performance des produits satellitaires, des réanalyses et des simulations des modèles climatiques CMIP6.

Dans une première partie, une évaluation de huit produits satellitaires d'estimation du rayonnement solaire (CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2, CAMS-JADE, WorldClim 2 et les réanalyses ERA5), révèle des différences dans les champs spatiotemporels. Tout en capturant avec succès les cycles annuels moyens de rayonnement solaire, les produits présentent des variations régionales, soulignant l'impact des paramètres atmosphériques sur l'estimation précise du rayonnement solaire. En outre, tous les produits à l'exception de WorldClim 2 s'accordent sur le fait que la façade atlantique reçoit moins de rayonnement solaire que les autres régions d'Afrique Centrale. La performance de ces produits est également évaluée par rapport aux observations in-situ sur la base de quatre types de cycle diurne de rayonnement solaire - les jours Obscurs, Obscurs AM (matin), Obscurs PM (après-midi) et Lumineux. Les produits représentent correctement la forme de ces quatre types, mais avec une amplitude plus grande.

La deuxième partie se concentre sur l'étude de la variabilité interannuelle et les tendances du rayonnement solaire pendant la saison sèche nuageuse juin-septembre, mettant en évidence des différences marquées entre le produit satellitaire CMSAF SARAH-2 et la réanalyse climatique ERA5. Dans cette partie, l'étude a également permis d'identifier les dates de début et de fin de la saison sèche à partir du rayonnement solaire, et en établissant une relation significative entre les températures de surface de l'océan Atlantique équatorial et le début de la saison sèche.

Dans la dernière partie, la capacité des modèles climatiques globaux CMIP6 à reproduire les niveaux moyens de rayonnement solaire dans la région a été évaluée. Les résultats soulignent des disparités sous-régionales dans la performance des modèles. Les modèles utilisés dans cette étude sous-estiment le rayonnement solaire au sud-ouest du Gabon-Congo tandis qu'ils le surestiment au nord-est du Gabon-Congo, principalement d'avril à décembre. Les différences les plus importantes étant observées pendant la saison des pluies octobre-novembre. Ces disparités semblent provenir de la nébulosité, en particulier des nuages de basse et moyenne altitude, qui influencent de manière significative le rayonnement solaire

mais avec des relations variables selon les modèles. Cette partie met également en évidence la téléconnexion entre la température de surface de l'océan Atlantique équatorial et le rayonnement solaire dans les modèles, mais qui varie entre le littoral et l'intérieur du Gabon, soulignant la nécessité de travailler avec des modèles climatiques régionaux mieux résolus.

Abstract

Western Central Africa, home to the densest forests of the Congo Basin - the second largest tropical forest massif after Amazonia - is characterized by an equatorial climate with high temperatures, a bimodal rainfall pattern and, a long and cloudy dry season from June to September. Despite its ecological importance, the climate variability of this region has been less studied compared with other parts of the African continent, mainly because of the scarcity of in-situ observations.

Recognizing these challenges posed by the lack of in-situ data, this study explores the climate variability in Western Central Africa through the lens of surface solar radiation, a key parameter for the functioning of tropical forests. In this context, this thesis aims to establish an initial climatology of surface solar radiation for the region, to document its variability, particularly during the cloudy dry season from June to September, and to assess the performance of satellite products, reanalyses and CMIP6 climate model simulations.

In the first part, an evaluation of eight satellite products for estimating solar radiation (CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2, CAMS-JADE, WorldClim 2 and ERA5 reanalysis) reveals differences in the spatiotemporal fields. While successfully capturing mean annual solar radiation cycles, the products show regional variations, highlighting the impact of atmospheric parameters on the accurate estimation of solar radiation. In addition, all the products except WorldClim 2 agree that the Atlantic coast receives less solar radiation than the other regions of Central Africa. The performance of these products is also assessed against in-situ measurements based on four types of solar radiation diurnal cycle - Obscure, Obscure AM (morning), Obscure PM (afternoon) and Bright days. The products correctly represent the shape of these four types, but with a larger amplitude.

The second part focuses on studying the interannual variability and trends in solar radiation during the June-September cloudy dry season, highlighting notable differences between CMSAF SARAH-2 satellite product and ERA5 reanalysis. The study also made it possible to identify the onset and cessation dates of the dry season based on solar radiation, and establishing a significant relationship between surface temperatures of the equatorial Atlantic ocean and the onset of the dry season.

In the final part, the capacity of CMIP6 global climate models to reproduce average levels of solar radiation in the region was assessed. The results highlight sub-regional disparities in model performance. The models used in this study underestimate solar radiation in the south-west of Gabon-Congo, while they overestimate it in the north-east of Gabon-Congo, mainly from april to december. The largest differences were observed during the october-november rainy season. These disparities seem to be caused by cloud cover, in particular low- and medium-level clouds, which have a significant influence on solar radiation, although the relationship varies according to the models. This section also highlights the teleconnection between the surface temperature of the equatorial Atlantic ocean and solar radiation in the models, which varies between the coastal and inland areas of Gabon, underlining the need to use regional climate models.

Table des matières

Introduction générale **1**

Chapitre I. Données et Approches méthodologiques **8**
1 Données 9
1.1 Les mesures in-situ 9
1.2 Produits satellitaires d'estimation du rayonnement solaire 13
1.3 Les réanalyses ERA5 et les modèles climatiques CMIP6 18
1.4 Autres données auxiliaires 19
2 Approches méthodologiques 22
2.1 Qualité des données 22
2.2 Classification des cycles diurnes 23
2.3 Analyse en composantes principales (ACP) 24
2.4 Méthode des anomalies cumulées : détection des dates de début et de fin de la saison sèche 25
2.5 Autres métriques statistiques 25

Chapitre II. Analyse comparative et validation des estimations satellitaires du rayonnement solaire incident pour l'Afrique centrale : des moyennes annuelles aux cycles diurnes **28**
1 Publication: Inter-comparison and validation against in-situ measurements of satellite estimates of incoming solar radiation for Central Africa: from the annual means to the diurnal cycles 29

Chapitre III. Analyse de la variabilité interannuelle du rayonnement solaire et détection des dates de début et de fin **66**
1 Variabilité interannuelle du rayonnement solaire : Contexte et exploration préliminaire 67
2 Tendances et modes de variabilité interannuelle du rayonnement solaire au cours de la saison sèche 68
3 Le rôle des nuages et des aérosols dans la variabilité interannuelle du rayonnement solaire 74
3.1 Lien avec la couverture nuageuse 74
3.2 Lien avec les aérosols 79
4 Définition et détection des dates de début et de fin de la saison sèche 82
4.1 Contexte et définitions 82
4.2 Détection des dates de début et de fin de la saison sèche 83
5 Variabilité interannuelle des dates de début et de fin 86
5.1 À partir du rayonnement solaire SARAH-2 86
5.2 À partir d'autres variables 88
5.3 Typologie de la saison sèche : une classification des années 90
5.4 Lien avec les cycles diurnes de rayonnement solaire 92
6 Liens avec les températures de surface de la mer 96
7 Conclusion du chapitre 99

Chapitre IV. La représentation du rayonnement solaire en Afrique centrale occidentale dans les simulations historiques CMIP6 ..... **102**
1 Aperçu et contexte 103
2 Rayonnement solaire dans les simulations historiques CMIP6 104
3 La nébulosité dans les simulations CMIP6 et lien avec le rayonnement 111
4 Interactions avec les températures de surface de la mer (SST) 120
5 Conclusion du chapitre 127

Conclusion et perspectives **130**
1 Conclusion 130
2 Perspectives 135

Références Bibliographiques 139
Annexe A 157
Annexe B 161
Annexe C 168
Annexe D 176

Introduction générale

Contexte et motivations

L'Afrique Centrale, est une région située au niveau de l'équateur dont la principale entité physique est le bassin du Congo. Elle comprend le Cameroun, le Gabon, la Guinée équatoriale, le Congo et la République Démocratique du Congo (Figure 0.1). Les forêts d'Afrique Centrale constituent le second massif forestier tropical de la planète après le bassin amazonien et représentent une des zones les plus riches du monde en termes de biodiversité (De Wasseige et al., 2015 ; FAO, 2016).

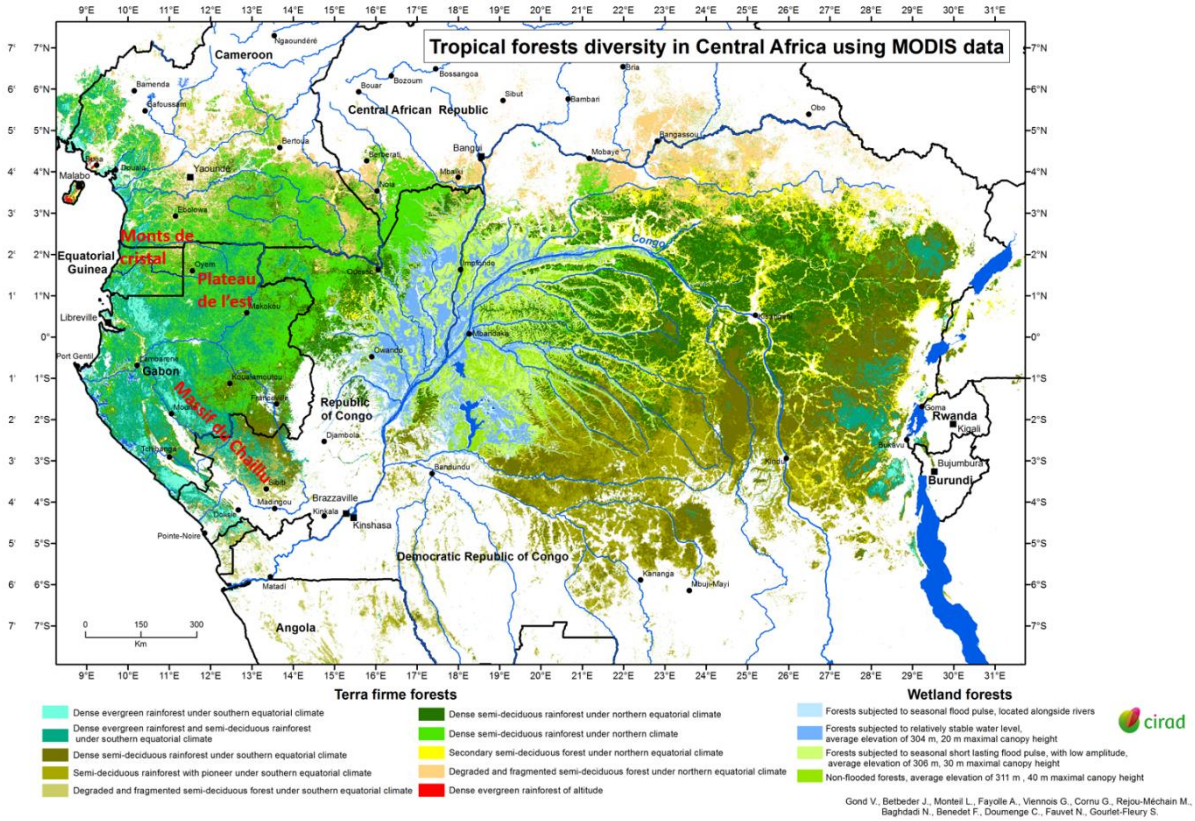

Figure 0. 1 - La région d'Afrique Centrale et sa diversité des forêts tropicales, source : Gond et al. (2016), CIRAD. Avec modification.

La partie occidentale de l'Afrique centrale se singularise par une saison sèche particulièrement longue, de juin à septembre, et très nuageuse (Philippon et al., 2019). Ainsi, contrairement à l'idée habituelle selon laquelle les saisons sèches sont plus ensoleillées que les saisons des pluies, la saison sèche de l'Afrique centrale occidentale se caractérise par un ensoleillement plus faible que pendant les deux saisons des pluies. Ce faible niveau d'ensoleillement est dû à la présence de nuages bas stratiformes, qui forment souvent une couche compacte (Dommo et al., 2018 ; Champagne et al., 2023 ; Moron et al., 2023) et sont donc particulièrement opaques. Pour illustrer ce caractère unique, la Figure 0.2 établit une comparaison avec l'Amazonie. En Guyane, les niveaux de rayonnement solaire sont les plus

élevés les jours de faibles précipitations (Figure 0.2c), alors qu'au Gabon, les niveaux les plus élevés de rayonnement solaire sont enregistrés les jours les plus pluvieux (Figure 0.2d). Ce contraste souligne la nature exceptionnelle du climat de l'Afrique centrale occidentale, qui le distingue de l'Amazonie et de tous les autres climats du monde.

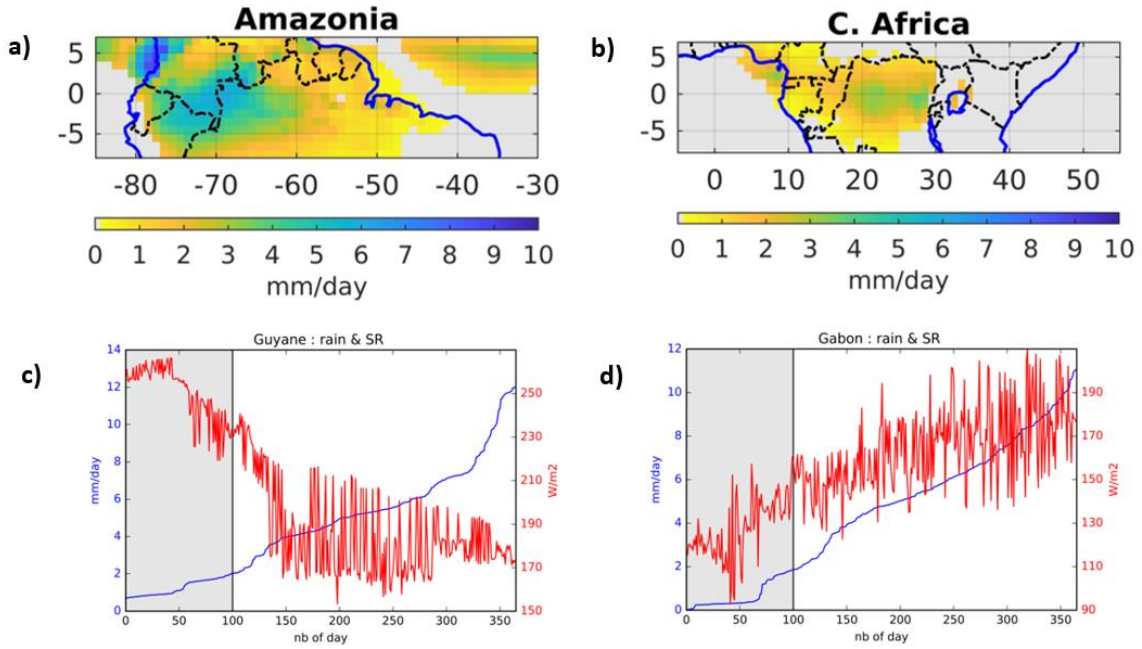

Figure 0. 2 - Moyennes climatologiques des précipitations journalières en Amazonie (panneau a) et en Afrique Centrale (panneau b, données TRMM, période 1998-2020). Les panneaux c et d représentent la distribution par ordre croissant des précipitations journalières (en bleu) et les moyennes journalières correspondantes du rayonnement solaire (en rouge, données SARAH-2) en Guyane (Amazonie), et au Gabon (Afrique Centrale) pour l'année 2015. La bande grise indique les 100 jours les plus secs.

L'Afrique Centrale est parmi les principales régions convectives de la planète (Washington et al., 2013). Située au niveau de l'équateur, la région connait des températures élevées qui provoquent une évapotranspiration importante et la formation de nuages, ce qui entraîne des précipitations intenses (Tsalefac et al., 2015). Ces fortes précipitations sont principalement situées le long de la côte du golfe de Guinée, avec une moyenne annuelle qui dépasse 2500 mm et au centre du bassin du Congo (Figure 0.2). En Afrique centrale occidentale, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1500 mm (Tsalefac et al., 2015).

L'étude des climats d'Afrique centrale est d'une importance capitale, notamment pour la compréhension de la phénologie et la croissance des forêts. En effet, une meilleure compréhension des rythmes phénologiques et de croissance pourrait permettre d'améliorer les plans d'aménagement forestier (Kearsley et al., 2024). De plus, la connaissance des relations entre phénologie, croissance, et le climat est fondamentale pour anticiper les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers d'Afrique centrale (Couralet et al., 2010 ; Kearsley et al., 2024)

Bien que des progrès importants ont été réalisés au cours des deux dernières décennies, les connaissances sur les climats passés et présents de l'Afrique Centrale restent

limitées. Cette situation s'explique par le fait qu'il y a peu de données provenant de stations météorologiques, que les réseaux de surveillance du climat passés et actuels sont peu denses, et qu'il y a peu de recherches scientifiques consacrées au climat de cette région. Malhi et al. (2013) soulignent qu'en raison de la rareté des mesures in-situ météorologiques, le climat d'Afrique Centrale a été moins étudié que celui des régions semi-arides africaines voisines. Camberlin et al. (2019) ainsi que Bigot et al. (2016) expliquent également cette situation par les fréquentes interruptions de service, parfois longues, allant jusqu'à plusieurs années, dans certaines de ces stations. À titre d'exemple, au début des années 2010, le système mondial de télécommunications (Global Telecommunications System, GTS) n'a reçu aucun rapport en provenance de la majeure partie de la République démocratique du Congo (RDC), qui couvre plus de 2 millions de kilomètres carrés (Camberlin et al., 2019). Ce manque aigu de données est encore plus marqué pour le rayonnement solaire qui jusqu'à présent a reçu relativement peu d'attention dans la recherche sur le climat par rapport à d'autres variables climatiques telles que la température et les précipitations. En effet la plupart des stations météorologiques d'Afrique Centrale ne sont pas équipées des instruments nécessaires pour mesurer cette variable.

En 2000, le Système d'Observation du Climat mondial (Global Climate Observing System, GCOS), l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et les services nationaux hydrologiques et météorologiques ont entrepris des évaluations des systèmes de surveillance climatique dans diverses régions du globe (Tsalefac et al., 2015). Les conclusions de ces évaluations ont révélé que l'Afrique présentait la densité la plus faible et la qualité la plus limitée en termes de stations météorologiques par rapport à toutes les autres régions du monde. En réponse à cette constatation, des conférences régionales ont eu lieu entre 2001 et 2005 dans le but de formuler des plans d'action régionaux spécifiques pour l'Afrique. Ces améliorations étaient considérées comme un moyen crucial de stimuler le développement économique du continent africain. Toutefois, malgré ces démarches et déclarations d'intention, aucune réalisation concrète n'a encore permis de remédier à cette situation (Tsalefac et al., 2015).

En outre, la littérature sur le climat d'Afrique centrale occidentale est relativement limitée par comparaison avec les régions semi-arides voisines, avec seulement quelques études se concentrant sur différents aspects tels que les précipitations (Camberlin et al., 2019 ; Bush et al., 2020), les nuages bas (Dommo et al., 2018 ; Moron et al., 2023 ; Champagne et al., 2023, Philippon et al., 2019), la durée d'ensoleillement (Philippon et al., 2022) ou la température (Bush et al., 2020). Beaucoup de ces études s'appuient principalement sur des données satellitaires ou de réanalyses, avec très peu d'observations in-situ. Par ailleurs, la période de ces études est relativement courte.

À cet égard, la compréhension de la variabilité climatique d'Afrique Centrale et notamment occidentale par le biais de l'étude de la variabilité du rayonnement solaire est originale.

Le rayonnement solaire est une variable cruciale de notre système climatique (Wild et al., 2015, 2017). Le rayonnement solaire s'étend sur une large gamme d'ondes électromagnétiques, dont la lumière visible, le rayonnement ultraviolet et le rayonnement infrarouge, chacune transportant des quantités d'énergie différentes.

Le rayonnement solaire incident à la surface est la fraction du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre dans la région des longueurs d'onde de 0.2 à 4 µm. Cette énergie solaire entrante revêt une importance considérable. En tant que principale source d'énergie du système terrestre (Wild et al., 2015 ; Ohmura & Gilgen, 1993 ; Pfeifroth et al., 2018 ; Ramanathan et al., 2001), elle exerce une influence sur plusieurs variables climatiques et contribue à des processus tels que les cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone, ainsi que la circulation atmosphérique et océanique (Wild et al., 2012, 2017 ; Wang et al., 2010). En outre, le rayonnement solaire de surface constitue une composante principale du bilan radiatif global de la terre (Wild et al., 2017), ce qui en fait un facteur crucial non seulement pour la recherche sur le climat, mais aussi pour les études sur l'agriculture, la végétation et l'énergie solaire (Stanhill & Cohen, 2001, Mercado et al., 2009 ; Huld et al., 2017 ; Miglietta et al., 2017).

La mesure du rayonnement solaire a débuté au cours du 17-ème siècle avec la mise au point d'un premier instrument appelé pyrhéliomètre. Mais c'est au 19-ème siècle que des efforts plus systématiques ont vu le jour, avec l'invention d'un dispositif capable de quantifier la chaleur des rayons du soleil. La fin du 19-ème siècle et le début du 20-ème siècle ont vu le développement d'instruments de plus en plus sophistiqués, comme l'actinomètre et le bolomètre, qui ont permis aux scientifiques de mieux caractériser le rayonnement solaire. Au milieu du 20-ème siècle, des technologies avancées telles que les pyranomètres et les spectroradiomètres sont utilisées pour mesurer et analyser avec précision le rayonnement solaire (Yellot, 1979 ; De Vincenzi & Fasano, 2020).

Il existe actuellement quatre méthodes différentes pour mesurer ou estimer le rayonnement solaire, comme l'ont souligné Zhang et al. (2015). Ces méthodes englobent les mesures directes du rayonnement solaire à l'aide de pyranomètres installés dans des observatoires météorologiques, l'estimation du rayonnement solaire à l'aide de données satellites, les données de réanalyses ainsi que les modèles climatiques régionaux et globaux.

Dans ce contexte, et vu la rareté, voire l'absence des mesures in-situ de rayonnement en Afrique Centrale, l'utilisation de produits satellitaires et de réanalyses devient un moyen essentiel, et parfois le seul, pour étudier la variabilité du rayonnement solaire et donc du climat dans la région. Les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine de la télédétection ont considérablement élargi la gamme des données disponibles. Les produits satellitaires, contrairement aux mesures de stations, permettent de mieux comprendre la variabilité spatiale des paramètres climatiques, plutôt qu'en des points isolés. Si les observations au sol restent la vérité pour représenter la situation sur le terrain, les données satellitaires constituent une alternative importante lorsque ces observations ne sont pas disponibles. En outre, les produits satellitaires, même avec leurs résolutions spatiales parfois grossières, offrent une large couverture spatiale, permettant de combler ces lacunes.

Le projet ANR-DYVALOCCA (DYnamics, VAriability and bioclimatic effects of LOw Clouds in western Central Africa ; https://dyvalocca.osug.fr/) en partenariat entre la France, l'Allemagne et le Gabon, a été lancé en 2020 pour comprendre les mécanismes qui contrôlent la couverture nuageuse basse de saison sèche dans la région, et étayer les évaluations de la stabilité passée et future des forêts sempervirentes d'Afrique Centrale. Dans ce cadre, cette thèse a été lancée pour répondre aux besoins du Workpackage 5, sur la disponibilité en eau et

en lumière pour les forêts sous la couverture nuageuse basse, et en particulier les variations spatiotemporelles de la disponibilité en lumière.

Objectifs de la thèse

En raison de divers facteurs, notamment la rareté des données des stations, l'importance des forêts d'Afrique centrale et la quasi-absence de recherches sur le rayonnement solaire dans le contexte de l'Afrique centrale, ces défis constituent les éléments qui motivent notre étude. L'objectif principal est d'améliorer notre compréhension du climat de cette région clef. Cette étude vise à fournir une analyse complète qui non seulement contribue à notre connaissance de la dynamique du climat local, mais met également en évidence l'interconnexion du rayonnement solaire et des caractéristiques environnementales uniques de la région. En comblant ces lacunes de recherche, notre étude vise à fournir des connaissances nouvelles sur la variabilité du climat de la région et précisément celle du rayonnement solaire en lien avec les nuages bas, facteur essentiel de sa variabilité.

Cela donne lieu à un certain nombre de questions, auxquelles nous répondrons au fur et à mesure de cette étude et qui constitueront les 3 objectifs de cette thèse.

Objectif 1 : Comme déjà mentionné ci-dessus, l'utilisation de données satellitaires et de réanalyses est une alternative cruciale lorsque les mesures in-situ sont limitées ou indisponibles. Par conséquent, ***le premier objectif de cette thèse*** est de dresser une climatologie du rayonnement solaire incident en Afrique Centrale et d'évaluer la performance des différentes bases de données satellitaires disponibles au cours des dernières années. Cet objectif s'articule autour des questions suivantes :

- **Quelle est la vérité de terrain pour le rayonnement solaire en Afrique Centrale à partir des observations de stations disponibles ?**
- **Quand, où et dans quel ordre de grandeur se situent les principales différences entre les estimations satellitaires et ces mesures in situ ?**
- **En particulier, quelle est la performance des estimations CMSAF SARAH-2 compte tenu de leur résolution spatiale (0.05°) et temporelle (30min) plus fine, et de leur longue période de disponibilité (depuis 1983) ? Ce produit satellitaire est-il le meilleur choix pour étudier la variabilité du rayonnement solaire dans la région lorsque les observations in-situ sont absentes ?**

Objectif 2 : ***Le second objectif de cette thèse*** est de mieux caractériser et d'améliorer notre compréhension de la grande saison sèche nuageuse juin-septembre en Afrique Centrale. Dans le cadre de cet objectif, nous visons à :

Objectif n° 2.1 : Comprendre et documenter l'évolution à long terme du rayonnement solaire pendant cette saison sèche. Pour cela nous chercherons à répondre aux questions suivantes :

- **Les bases de données satellitaires sélectionnées dans cette partie peuvent-elles être utilisées pour analyser cette évolution à long terme de rayonnement solaire ? Et quelles informations peuvent-elles fournir ?**
- **A quel point la couverture nuageuse et les aérosols peuvent-ils expliquer l'évolution à long terme du rayonnement solaire ?**

Objectif n° 2.2 : Identifier et analyser les dates de début et de fin de la saison sèche à travers les données de rayonnement solaire, en se concentrant sur les questions suivantes :

- **Le démarrage et la fin de la saison sèche peuvent-ils être détectés par le rayonnement solaire ?**
- **Comment ces dates varient-elles d'une année à l'autre et y a-t-il notamment des tendances significatives dans ces variations ?**
- **Existe-t-il des différences entre les dates dérivées du rayonnement solaire et celles dérivées des précipitations ou de la couverture en nuages bas ?**
- **Dans quelle mesure la température de surface de la mer influence-t-elle le début ou la fin de la saison sèche dans la région ?**

Objectif 3 : ***Le troisième objectif de cette thèse*** est d'évaluer la capacité des modèles climatiques globaux CMIP6 pour la période historique à simuler le rayonnement solaire en Afrique Centrale occidentale, ce qui nous amène à nous poser un certain nombre de questions :

- **Ces modèles reproduisent-ils correctement les variations spatiotemporelles moyennes du rayonnement solaire dans la région ?**
- **Dans quelle mesure la variabilité du rayonnement solaire simulée par les modèles climatiques CMIP6 peut-elle être expliquée par la nébulosité et la température de surface l'océan Atlantique ?**

Alors que le changement climatique est devenu un axe de recherche majeur, et affecte l'ensemble de la planète (Trenberth et al., 2014), l'Afrique centrale se trouve particulièrement vulnérable à ces changements (Henry, 2022 ; WMO, 2020). Cette vulnérabilité souligne l'importance de comprendre le climat unique de l'Afrique centrale, qui est façonné par une

combinaison de plusieurs facteurs climatiques. Dans leur étude, Oliveira et al. (2014) suggèrent une menace potentielle du changement climatique dans la région d'Afrique Centrale.

Dans ce sens, un autre objectif implicite lié à ce dernier est d'utiliser les réponses à ces deux dernières questions comme un moyen de comprendre les mécanismes qui contrôlent les variations du rayonnement solaire en Afrique centrale, telles qu'elles sont représentées par les modèles CMIP6. Cette compréhension servira à son tour d'outil fondamental pour connaître l'évolution future de cette variable clé, pour évaluer l'impact potentiel du changement climatique sur la couverture nuageuse basse pendant la saison sèche. Cela nous aidera à déterminer si le changement climatique peut impacter la stabilité écologique des forêts de la région.

Plan du manuscrit

Compte tenu des caractéristiques spécifiques de la région, *le chapitre I* présentera l'ensemble des données et les approches méthodologiques utilisées. Ensuite, *le chapitre II* présentera les premiers résultats sur la climatologie du rayonnement solaire dans la région et une évaluation des bases de données satellitaires. *Le chapitre III* se concentre sur la saison sèche de juin à septembre : il examine la variabilité interannuelle du rayonnement solaire, ainsi que les dates de début et de fin de cette saison, déterminées à partir du rayonnement solaire. Enfin, *le chapitre IV* examine les modèles climatiques CMIP6, évaluant leur capacité à simuler la variabilité spatio-temporelle moyenne du rayonnement solaire dans la région et les principaux facteurs de cette variabilité. Chaque chapitre s'appuiera sur différents ensembles de données adaptés à ses objectifs de recherche spécifiques. Enfin, ces travaux seront résumés dans une section finale de *conclusion et perspectives* qui fournira une synthèse des résultats et des orientations potentielles pour les recherches futures.

Chapitre I. Données et Approches méthodologiques

Dans ce chapitre, nous nous penchons sur les particularités des données utilisées dans le cadre de cette étude. Nous explorons en détail leurs caractéristiques, leurs disponibilités et leurs limites. Après cette exploration, nous abordons les méthodes et les approches adoptées tout au long de cette thèse.

Sommaire

1 Données 9
1.1 Les mesures in-situ 9
1.2 Produits satellitaires d'estimation du rayonnement solaire 13
1.3 Les réanalyses ERA5 et les modèles climatiques CMIP6 18
1.4 Autres données auxiliaires 19
2 Approches méthodologiques 22
2.1 Qualité des données 22
2.2 Classification des cycles diurnes 23
2.3 Analyse en composantes principales (ACP) 24
2.4 Méthode des anomalies cumulées : détection des dates de début et de fin de la saison sèche 25
2.5 Autres métriques statistiques 25

1 Données

La rareté des données météorologiques in-situ dans la région d'Afrique Centrale (Figure 0.1) constitue un défi important qui limite de nombreux efforts de recherche (Camberlin et al., 2019 ; Bigot et al., 2016 ; Malhi et al., 2013), en particulier ceux concernant le rayonnement solaire - une variable comparativement peu mesurée et peu étudiée par rapport à d'autres variables climatiques telles que les précipitations et températures.

À l'heure actuelle, la mesure et l'estimation du rayonnement solaire peuvent être réalisées à partir de quatre sources distinctes : les observations in-situ, les estimations satellitaires, les réanalyses et les modèles climatiques. Cette section vise à fournir une explication détaillée de l'ensemble des données utilisées dans cette étude qu'il s'agisse du rayonnement solaire ou d'autres paramètres auxiliaires utilisés.

1.1 Les mesures in-situ

Dans cette étude nous avons utilisé des données in-situ principalement à des fins de validation et d'évaluation des produits satellitaires d'estimation du rayonnement solaire car elles ne permettent pas d'accéder à la variabilité interannuelle. Nous avons utilisé les données FAOCLIM 2 (section 1.1.1), ainsi que les données de 10 stations météorologiques originales (section 1.1.2) dispersées en Afrique Centrale occidentale.

1.1.1 Les données FAOCLIM 2

L'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, Food and Agriculture Organisation) met à disposition une base de données mondiale agro-CLIMatique, appelée "FAOCLIM 2". Cette base de données rassemble des données à long terme sous forme de moyennes mensuelles (c'est-à-dire 12 valeurs mensuelles) pour 14 variables climatiques différentes dont le rayonnement solaire, provenant de 28 100 stations météorologiques réparties dans le monde (FAO, 2001). Parmi ces stations, nous avons extrait des données provenant de 47 stations situées en Afrique Centrale, dont les emplacements sont présentés dans la Figure I.1.

Les moyennes mensuelles à long terme dans FAOCLIM 2 sont calculées sur des périodes de temps qui varient selon les stations. Pour l'Afrique centrale, ces moyennes sont généralement calculées pour la période 1961-1990, c'est-à-dire lorsque le réseau de stations météorologiques était le plus dense et le mieux entretenu. En fait, le rayonnement solaire incident est rarement enregistré dans les stations météorologiques d'Afrique centrale ; c'est la durée d'ensoleillement journalière qui est le plus souvent mesurée avec les enregistreurs d'ensoleillement Campbell Stokes (Voir Annexe A). Par conséquent, dans FAOCLIM 2 et pour l'Afrique centrale, le rayonnement solaire incident à la surface n'est pas une mesure directe mais une estimation indirecte à partir des mesures de la durée d'ensoleillement.

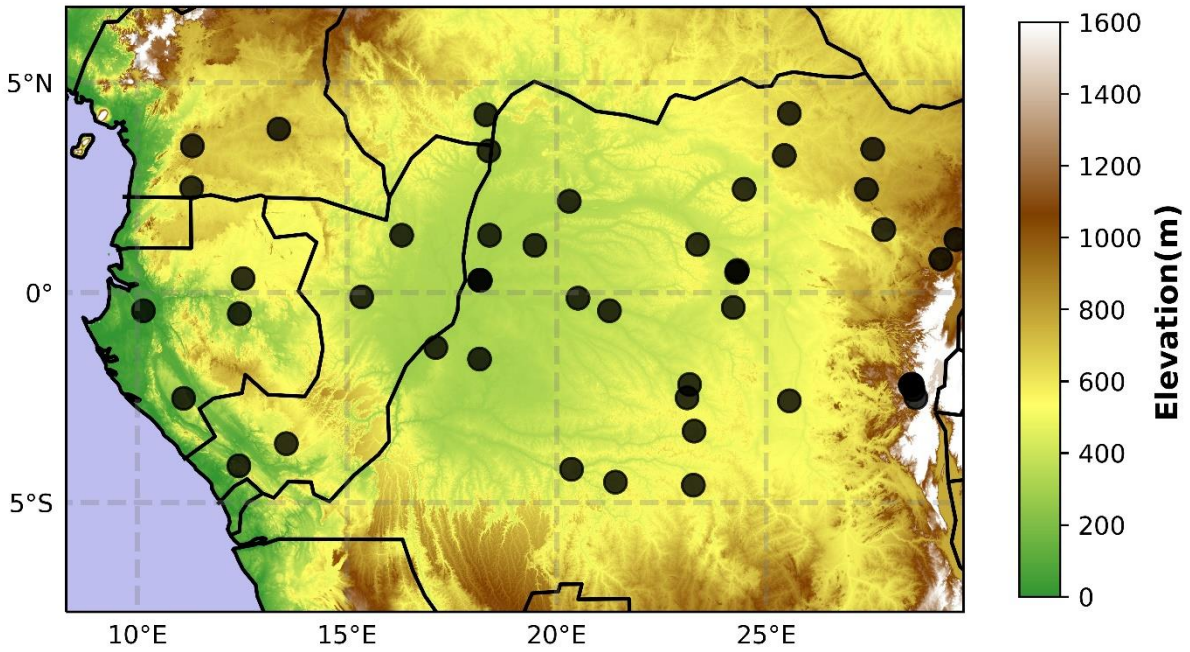

Figure I. 1 - Localisation de 47 stations de la base de données FAOCLIM 2, la topographie de d'Afrique centrale étant présentée en arrière-plan. (Figure extraite de Ouhechou et al., 2023).

L'estimation de rayonnement solaire incident repose sur la formule d'Angström (Equation I.1), qui établit un lien entre le rayonnement solaire incident de surface (R_s), le rayonnement extraterrestre (R_a) et la proportion de la durée d'ensoleillement relative (n/N) (Allen et al., 1998) de la manière suivante :

$$Rs = \left(a_s + b_s \times \left(\frac{n}{N}\right)\right) \times R_a \qquad \text{(Equation I.1)}$$

Dans cette équation, "n" représente la durée actuelle d'ensoleillement issues des mesures in-situ, "N" symbolise la durée maximale possible d'ensoleillement ou d'heures de journée, "R_a" désigne le rayonnement extraterrestre, "a_s" correspond à une constante tenant compte de la fraction de rayonnement diffus, et "b_s" fait référence à la fraction de rayonnement direct (Hinrichsen, 1994). Lorsqu'aucune donnée relative au rayonnement solaire n'est disponible et qu'aucun étalonnage n'a été effectué pour améliorer les coefficients "a_s" et "b_s", ces derniers sont fixés respectivement à 0.25 et 0.50, ce qui est supposé être le cas pour les stations d'Afrique centrale. Initialement fournie en mégajoules par mètre carré par jour (MJ/m^2/jour), la valeur de "R_s" a été convertie en watts par mètre carré (W/m^2), unité utilisée dans l'ensemble des données de rayonnement solaire analysées dans cette étude. De plus amples informations concernant l'incertitude associée à cette base de données sont abordées dans le chapitre II.

1.1.2 Les données des stations météorologiques originales

Plusieurs observatoires et initiatives de recherche en Afrique Centrale Occidentale surveillent le climat grâce à des stations météorologiques. Nous avons eu accès à des données de rayonnement solaire enregistrées dans 10 de ces sites (Figure I.2), répartis au Cameroun, au

Gabon, en République du Congo et en République démocratique du Congo (RDC). Les détails concernant les instruments utilisés, les périodes d'enregistrement et les résolutions temporelles sont fournis dans le tableau I.1. Bien que la plupart des stations fournissent des données à une résolution temporelle élevée, principalement sub-diurne, les périodes d'enregistrement sont souvent courtes (généralement de 2 à 3 ans), et il y a rarement chevauchement complet de ces périodes entre les différentes stations.

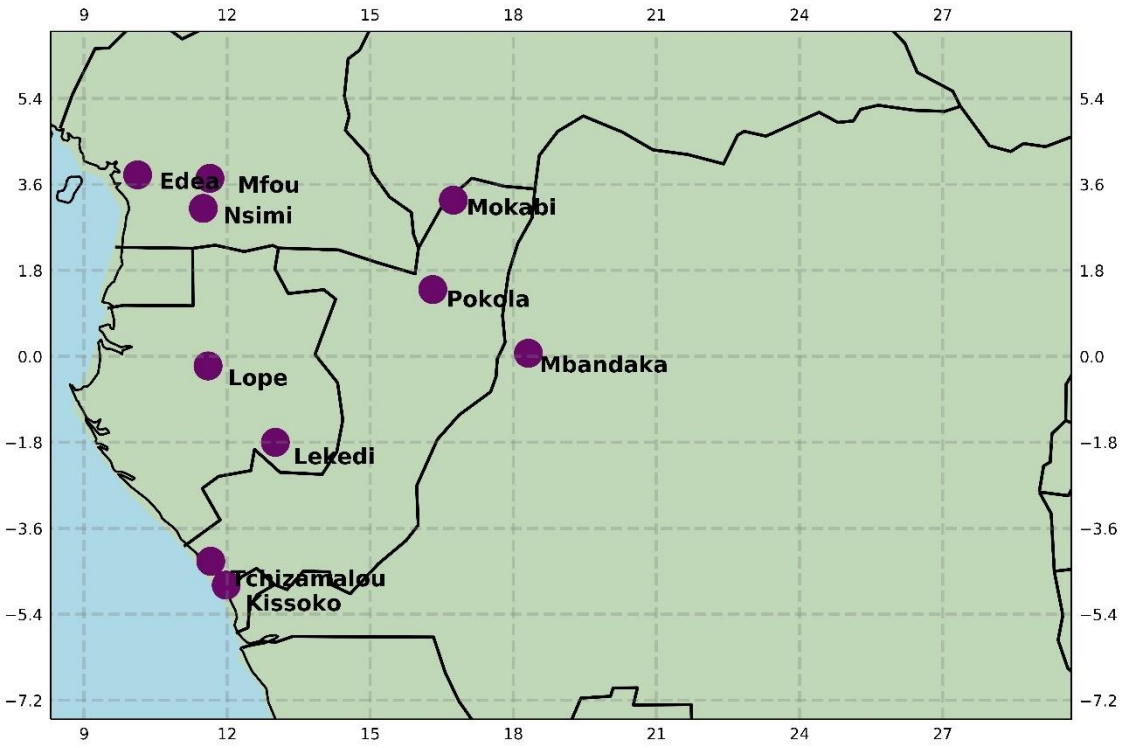

Figure I. 2 - Localisation des 10 stations météorologiques originales utilisées.

Les métadonnées concernant les caractéristiques des sites (comme la forme du terrain, plat ou en pente, les environnements urbains ou ruraux, la proximité des bâtiments ou des arbres) ne sont pas disponibles. De même, les informations sur les pratiques d'entretien des instruments (fréquence d'entretien, étalonnage ou remplacement des capteurs) manquent alors que ces facteurs peuvent potentiellement influencer la précision des données. Dans toute l'Afrique centrale, les mesures du rayonnement solaire de surface peuvent être influencées par des facteurs tels que la rosée/condensation, la poussière et d'autres salissures (fientes d'oiseaux par exemple). La qualité des données issues des pyranomètres dans ces 10 stations météorologiques (examinée dans la section 2.1) est en deçà des normes établies pour les stations du réseau de référence de rayonnement solaire BSRN (Baseline Surface Radiation Network, Driemel et al., 2018). Néanmoins, ces stations demeurent la seule référence possible pour le rayonnement solaire incident à la surface dans la région. Des informations sur les observatoires qui fournissent ces données in-situ sont détaillées dans l'annexe A.

Tableau I. 1 - Caractéristiques des données des stations météorologiques mesurant le rayonnement solaire incident (Ouhechou at al., 2023).

Nom des stations	Pays	Latitude	Longitude	Fournisseur et état des données	Période de disponibilité	Résolution temporelle	Instrument et plage de longueurs d'onde (en nm)
Edea	Cameroun	3.80	10.12	TAHMO ; sur demande	02/2020 – présent	15min	Pyranomètre Apogee (300–1200)
Mfou	Cameroun	3.73	11.64	TAHMO ; sur demande	09/2018 – présent	15min	Pyranomètre Apogee (300–1200)
Mbandaka	RDC	0.07	18.31	TAHMO ; sur demande	11/2019 – présent	15min	Pyranomètre Apogee (300–1200)
Nsimi	Cameroun	3.16	11.83	M_TROPICS ; accès libre	04/2004 – 03/2008	Journalière	Pyranomètre Campbell 4813 (300-2800)
Kissoko	Congo-BZV	-4.79	11.98	F-ORE-T ; sur demande	03/2004 – 06/2006	30min	Pyranomètre SP-LITE Silicon (400-1100)
Tchizamalou	Congo-BZV	-4.29	11.66	F-ORE-T ; sur demande	07/2006 – 12/2009	30min	Pyranomètre SP-LITE Silicon (400-1100)
Lopé	Gabon	-0.20	11.60	ANPN ; accès libre	01/2012 – 10/2015	Journalière	Pyranomètre Davis (400-1100)
Lékédi	Gabon	-1.80	13.01	SEEG-Lékédi ; sur demande	07/2018 – présent	15min	Pyranomètre Davis (400-1100)
Pokola	Congo-BZV	1.4	16.31	CIRAD – IGE ; sur demande	03/2016 – présent	15min	Pyranomètre CS300 Apogee (360-1120)
Mokabi	Congo-BZV	3.27	16.74	CIRAD - IGE ; sur demande	03/2016 – présent	15min	Pyranomètre CS300 Apogee (360-1120)

1.1.3 WorldClim 2

Nous avons également utilisé l'ensemble de données WorldClim 2 qui fournit des moyennes mensuelles pour la période 1970-2000 pour 7 paramètres climatiques à une très haute résolution spatiale (1 km², Fick et al., 2017). WorldClim 2 est largement utilisé dans les études écologiques pour la modélisation de la distribution des espèces, bien que Bedia et al. (2013) aient souligné les lacunes et limitations de ce jeu de données. Les champs en grille sont obtenus à partir de l'interpolation spatiale des données in-situ en utilisant la méthode des splines à plaque mince (TPS, thin-plate splines), ainsi que la topographie (élévation, distance à la côte) et/ou des covariables climatiques. Les données in-situ pour le rayonnement solaire proviennent de 3 bases de données mondiales : FAOCLIM 2 (cf. section 1.1.1), les normales climatologiques de l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1996) et la base GSOD (Global Summary Of the Day) (NCEI, 2015). Cependant, le rayonnement solaire incident en surface est le paramètre pour lequel le nombre de stations disponibles est le plus faible : cette variable est moins souvent enregistrée et les données de haute qualité sont rares, en particulier pour l'Afrique centrale. Les

données sur le rayonnement solaire étant fournies en kJ/m^2/jour, une conversion en W/m^2 a été effectuée.

1.2 Produits satellitaires d'estimation du rayonnement solaire

Dans cette section, nous fournissons une description détaillée des produits satellitaires d'estimation du rayonnement solaire ainsi que des réanalyses qui ont été utilisés. Le Tableau I.2 fournit des informations générales sur les caractéristiques de ces produits, et les sections suivantes abordent ces caractéristiques de manière plus détaillée produit par produit.

Tableau I. 2 - Résumé des caractéristiques générales des produits d'estimation du rayonnement solaire utilisés (Ouhechou et al., 2023).

Produits	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Période de disponibilité	Satellite	Type d'orbite	Référence
CERES-EBAF	1° × 1°	Mensuelle	2000-03 / 2020-12	Terra + Aqua	Orbite héliosynchrone	Kato et al., 2018
CERES-SYN1deg	1° × 1°	Horaire	2000-03 / 2020-12	Terra + Aqua	Orbite héliosynchrone	Doelling et al., 2016
ERA5	0.25° × 0.25°	Horaire	1979-01 / 2020-12	---	---	Hersbach et al., 2019
CMSAF CLARA-A2	0.25° × 0.25°	Journalière - mensuelle	1982-01 / 2019-06	Capteurs AVHRR sur la série de satellites NOAA et METOP	Orbite polaire	Karlsson et al., 2020
CAMS-JADE	0.2° × 0.2°	15min	2005-01 / 2020-12	SEVIRI sur les satellites MSG	Orbite géostationnaire	Qu et al., 2017
CMSAF SARAH-2	0.05° × 0.05°	30min - mensuelle	1983-01 / 2017-12	MVIRI/SEVIRI sur METEOSAT MFG et MSG	Orbite géostationnaire	Pfeifroth et al., 2019
WorldClim 2	1km × 1km	Moyennes mensuelles	---	Interpolation spatiale des données FAOCLIM 2		Fick et al., 2017
TPDC	10km × 10km	3 heures	1983-07 / 2018-12	Combinaison de plusieurs produits		Tang W., 2019

1.2.1 CMSAF CLARA-A2 et CMSAF SARAH-2

Nous avons utilisé la deuxième édition de deux enregistrements de données climatiques (CDR, Climate Data Record en anglais) basées sur des algorithmes provenant du Service d'application des satellites de surveillance climatique d'EUMETSAT (CMSAF, Climate Monitoring Satellite Application Facility, Schulz et al., 2009) : le "Clouds, Albedo and Radiation data set à partir de données AVHRR—Edition 2.1" (désigné par CLARA-A2, Karlsson et al., 2017, 2020) et le "Surface Solar Radiation Data Set-Heliosat–Edition 2.1" (SARAH-2, Pfeifroth et al., 2017, 2019). Les bases de données CMSAF CLARA-A2 et CMSAF SARAH-2 sont disponibles en téléchargement gratuit via l'interface utilisateur Web CMSAF (https://wui.cmsaf.eu/).

La variable du rayonnement solaire global incident à la surface de CMSAF CLARA-A2 est dérivée des capteurs "Advanced Very High-Resolution Radiometer" (AVHRR) à bord des satellites polaires NOAA et METOP. Les données sont disponibles de 1982 à 2019 sur une grille de 0,25° × 0,25° en moyennes journalières et mensuelles (Karlsson et al., 2017, 2020 ; cf. Tableau I.2).

Dans CLARA-A2, l'extraction du rayonnement solaire repose sur une approche de tables de correspondance (LUT, look-up table) hybride basée sur des vecteurs propres (Mueller et al., 2009 ; 2012). Cette approche est utilisée pour calculer la transmittance atmosphérique (et donc le rayonnement solaire en surface) en deux étapes distinctes. En utilisant les informations spectrales des 5 canaux de l'instrument AVHRR au sein du logiciel de traitement des nuages Nowcasting SAF Polar Platform System (Dybbroe et al., 2005), les pixels sont d'abord classés comme nuageux ou pas. Le rayonnement solaire est ensuite calculé séparément pour les pixels sans nuages et pour les pixels nuageux. Pour les pixels sans nuages, le rayonnement en surface est calculé à l'aide du modèle de transfert radiatif en ciel clair MAGIC (Mesoscale Atmospheric Global Irradiance code, http://gnu-magic.sourceforge.net, Mueller et al., 2009). Pour les pixels nuageux, des LUT précalculés sont utilisés pour relier les flux solaires réfléchis à large bande au sommet de l'atmosphère (estimés à l'aide uniquement de la réflectance visible mesurée par l'instrument AVHRR) à la transmittance atmosphérique (Mueller et al., 2009).

Le rayonnement solaire journalier est obtenu en pondérant l'irradiance journalière en ciel clair avec le rapport entre le rayonnement en ciel nuageux + clair et le rayonnement en ciel clair. Les informations supplémentaires nécessaires pour le calcul du rayonnement solaire dans des conditions à la fois claires et nuageuses comprennent une climatologie mensuelle des aérosols provenant d'une version légèrement modifiée de la base de données "Global Aerosol Data Set/Optical Properties of Aerosols and Clouds" (GADS/OPAC) (Hess et al., 1998 ; Mueller and Träger-chatterjee, 2014), une moyenne mensuelle de la vapeur d'eau intégrée et une valeur constante (335 DU) d'ozone intégré verticalement provenant d'ERA-Interim (Dee et al., 2011) ainsi qu'une carte d'albédo de surface constante issue de la base de données Clouds and the Earth's Radiant Energy System/Surface and Atmospheric Radiation Budget (CERES/SARB).

Le rayonnement solaire dans CMSAF SARAH-2 est dérivé des canaux visibles des instruments “Meteosat Visible and Infrared Imager“ (MVIRI) et “Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager“ (SEVIRI) à bord des satellites géostationnaires Meteosat First Generation (MFG) et Meteosat Second Generation (MSG). CMSAF SARAH-2 fournit des valeurs de rayonnement solaire instantanées (toutes les demi-heures), des moyennes journalières et mensuelles de 1983 à 2017 sur une grille régulière de résolution spatiale de 0.05° lat x 0.05° lon couvrant l'Europe et l'Afrique (Pfeifroth et al., 2017, 2019 ; cf. Tableau I.2). La version opérationnelle (Interim) complète les données CMSAF SARAH-2 en incluant la période allant de 2018 au temps quasi-réel (Pfeifroth et al., 2018).

Dans SARAH-2, l’extraction du rayonnement solaire repose sur l'application de l'algorithme MAGICSOL (Posselt et al., 2012), qui associe une version modifiée de l'algorithme Heliosat (Hammer et al., 2003) avec l'algorithme gnu-MAGIC / SPECMAGIC (Mueller et al., 2012), dans une approche en deux étapes. En utilisant les informations provenant des canaux visibles des instruments MVIRI et SEVIRI, l'albédo effectif des nuages est d'abord récupéré à l'aide de l'algorithme Heliosat. Les irradiances en ciel clair sont ensuite dérivées à partir de la transmittance atmosphérique calculée à l'aide de l'approche hybride du vecteur propre (LUT) avec le modèle de ciel clair SPECMAGIC, et une extension du gnu-MAGIC pour tenir compte des informations spectrales (Mueller et al., 2009, 2012). Les irradiances en ciel nuageux + clair

sont ensuite obtenues en combinant l'albédo effectif des nuages récupéré avec les irradiances en ciel clair. Les informations supplémentaires requises pour le calcul du rayonnement solaire dans des conditions claires incluent une climatologie mensuelle des aérosols provenant des réanalyses du “European Centre for Medium-Range Weather Forecast/Monitoring Atmospheric Composition and Climate“ (ECMWF/MACC), des moyennes mensuelles de la vapeur d'eau intégrée et l'ozone issus d'ERA-Interim (Dee et al., 2011) ainsi qu'une carte d'albédo de surface temporellement constante de CERES/SARB. La variable utilisée dans les deux bases de données (CMSAF CLARA-A2 et CMSAF SARAH-2) est appelée “SIS“ (Surface incoming shortwave radiation), qui correspond au rayonnement solaire à courtes longueurs d’ondes. Une toute nouvelle édition des deux produits : CLARA-A3 (Karlsson et al., 2023) et SARAH-3 (Pfeifroth et al., 2023) est disponible depuis mai 2023. Les améliorations principales consistent en l’utilisation d'une nouvelle base de données sur l'albédo de surface, qui inclut maintenant un cycle saisonnier, ainsi que quelques modifications sur les régions couvertes de neige. Cependant, ces changements ont un impact relativement limité sur l'Afrique centrale, ce qui a été vérifié à l'échelle mensuelle et journalière (non montré).

1.2.2 CAMS-JADE

Nous avons également utilisé les données de rayonnement provenant du Service de surveillance de l'atmosphère Copernicus Radiation (CAMS-RAD, Qu et al., 2017). Dans le cadre de CAMS-RAD, le GHI est dérivé en traitant les images acquises par l'instrument SEVIRI à bord des satellites MSG. CAMS-RAD fournit des valeurs GHI instantanées de 15 minutes de 2004 à aujourd'hui, avec une résolution spatiale de 0,2° x 0,2°, couvrant l'Europe et l'Afrique. Le volume de données GHI de CAMS-RAD pour l'Afrique (20°W-54°E/40°N-37°S), désigné sous le nom de CAMS-JADE, est disponible en téléchargement gratuit via le site Web SoDa (http://www.soda-pro.com/help/cams-services/cams-radiation-service/download-africa-volume). La variable d'intérêt dans CAMS-JADE est "l'irradiance horizontale globale". Les valeurs, stockées sous forme d'octets non signés allant de 0 à 255, sont d'abord multipliées par 1,2 pour obtenir l'irradiance horizontale globale de 15 minutes en Wh/m^2, puis divisées par un quart d'heure pour obtenir le GHI en W/m^2. À noter que, contrairement aux autres produits, le GHI de CAMS-JADE est fourni uniquement pour les pixels terrestres.

Tout comme SARAH-2, l'estimation du GHI de CAMS-JADE repose sur une version modifiée de l'algorithme original Heliosat, Heliosat-4 (Qu et al., 2017). La méthode Heliosat-4 est constituée de deux modèles basés sur des LUTs générés avec le RTM (Radiative Transfer Model) libRadtran (Mayer and Kylling, 2005) : le modèle McClear qui calcule l'irradiance en ciel clair (Lefèvre et al., 2013) et le modèle McCloud qui calcule l'indice de ciel clair. Les principaux paramètres d'entrée pour les calculs du RTM sont les propriétés des aérosols et les contenus totaux en vapeur d'eau et en ozone fournis par CAMS toutes les 3 heures (Benedetti et al., 2011 ; Peuch et al., 2009), des cartes mensuelles de paramètres d'albédo au sol dérivés de la base de données MODIS (Blanc et al., 2014) et des propriétés des nuages déduites des images des satellites MSG à leur résolution temporelle de 15 minutes en utilisant un schéma APOLLO (AVHRR Processing scheme Over cLouds, Land and Ocean) adapté (Kriebel et al., 1989, 2003).

1.2.3 CERES-EBAF et CERES-SYN1deg

Nous avons également utilisé deux autres produits d'estimation de rayonnement solaire basés sur des satellites du projet CERES (Wielicki et al., 1996). Nous avons utilisé les flux de rayonnement à ondes courtes incidents en surface (correspondant au GHI) provenant (i) du produit CERES SYNoptic 1° Ed.4.1 (CERES-SYN1deg par la suite, Doelling et al., 2013) et (ii) du produit CERES Energy Budget and Filled Ed4 (CERES-EBAF par la suite, Kato et al., 2018). Au moment de leur utilisation, les produits CERES étaient disponibles pour une période allant de mars 2000 à décembre 2020. La couverture spatiale englobe l'ensemble du globe avec une résolution spatiale de 1° x 1°. Toutes les données CERES sont disponibles en téléchargement via le site Web CERES (https://ceres.larc.nasa.gov/).

Les flux de rayonnement en surface horaires CERES-SYN1deg sont fournis en se basant sur la combinaison d'observations provenant de plusieurs instruments sur plusieurs plateformes, y compris les radiomètres imageurs CERES à bord des satellites géostationnaires (GEO) et le "Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer" (MODIS) à bord des satellites Terra (orbite héliosynchrone descendante traversant l'équateur à 10h30 heure locale) et Aqua (orbite héliosynchrone ascendante, traversant l'équateur à 13h30 heure locale) (Doelling et al., 2013).

Les calculs de flux reposent sur le modèle RTM « Fu-Liou k-corrélé 2/4 stream » (Fu and Liou, 1992). Les données d'entrée pour ce modèle comprennent les données d'imagerie des satellites Terra, Aqua et GEO qui fournissent des informations horaires sur les propriétés des nuages (Doelling et al., 2013) ainsi que des données de réanalyses pour le cycle diurne de la température et de la quantité de vapeur d'eau (Kato et al., 2013).

Les flux horaires de rayonnement en surface de CERES-SYN1deg sont ensuite utilisés dans la production des flux de rayonnement en surface mensuels de CERES-EBAF, qui applique un algorithme ajustant les flux de rayonnement en surface mensuels de CERES-SYN1deg afin d'assurer leur cohérence avec les flux mensuels au sommet de l'atmosphère (TOA) de CERES-EBAF (Kato et al., 2018). Le produit TOA de CERES-EBAF utilise un algorithme de contrainte objectif pour ajuster les flux TOA à ondes courtes et à ondes longues dans leurs plages d'incertitude, afin d'éliminer l'incohérence entre le flux net moyen global au sommet de l'atmosphère et le stockage de chaleur dans le système terre-atmosphère (Loeb et al., 2018).

1.2.4 TPDC

Nous avons également utilisé l'ensemble de données "TPDC" (National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, Tang W., 2019). Cet ensemble de données mondiales à haute résolution couvre une période d'environ 36 ans, de 1983 à 2018, avec une résolution temporelle de 3 heures et une résolution spatiale de 10 km.

L'ensemble de données TPDC a été produit en utilisant une combinaison des produits nuageux du projet "International Satellite Cloud Climatology Project" (ISCCP-HXG), des données de réanalyse ERA5 et des produits d'aérosols et d'albédo MODIS, avec un schéma de paramétrisation physique amélioré. Ensuite, les informations sur la vapeur d'eau, la pression à

la surface et l'ozone ont été recueillies à partir des données de réanalyse ERA5. Les données de rayonnement solaire sont disponibles en téléchargement gratuit via le site Web TPDC (https://data.tpdc.ac.cn).

1.3 Les réanalyses ERA5 et les modèles climatiques CMIP6

1.3.1 Les réanalyses ERA5

ERA5 (Hersbach et al., 2019) est le dernier ensemble de données de réanalyse climatique publié par le Centre Européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). Il présente plusieurs améliorations par rapport à ERA-interim (Dee et al., 2011), notamment en termes de résolutions spatiale (31 km contre 79 km) et temporelle (horaire contre toutes les 3 heures), de nombre de niveaux verticaux (137 contre 60), ainsi que divers ensembles de données nouvellement retraités et instruments récents qui n'étaient pas intégrés dans ERA-Interim. Il repose également sur un nouveau modèle de prévision numérique du temps : le modèle "IFS Cycle 41r2" (Hersbach et al., 2016).

L'ensemble de données ERA5 fournit des estimations horaires pour de nombreux paramètres atmosphériques, des paramètres océaniques et continentaux. La variable de rayonnement solaire ERA5 utilisée dans cette étude est la quantité de rayonnement solaire désignée par "msdwswrf" (mean surface downward short-wave radiation flux), c'est-à-dire le flux moyen de rayonnement à ondes courtes incident à la surface) en W/m^2, avec une résolution spatiale de 0,25° x 0,25° et une résolution horaire, de 1979 à aujourd'hui.

Dans ERA5, le rayonnement solaire, comme de nombreux autres paramètres, n'est pas directement assimilé : il est une sortie du modèle de prévision numérique du temps NWP, et il est obtenu à partir d'un modèle de transfert de rayonnement qui simule l'atténuation par l'atmosphère de l'irradiance depuis le sommet de l'atmosphère (TOA) jusqu'au sol. Typiquement, les réanalyses n'assimilent pas les aérosols, les nuages et la vapeur d'eau, ce qui augmente l'incertitude de l'irradiance en surface estimée (You et al., 2013 ; Zhao et al., 2013).

1.3.2 Les modèles climatiques CMIP6

Dans le cadre de cette étude, nous avons également utilisé des simulations historiques provenant des dernières archives CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Phase 6, Eyring et al., 2016). Eyring et al. (2016), fournit un aperçu complet et détaillé des modèles CMIP6, abordant à la fois la conception expérimentale et l'organisation de l'ensemble des expériences et simulations réalisées. Pour notre étude, nous avons exploité les données de rayonnement solaire incident dérivées de huit modèles climatiques mondiaux (Global Climate Models, GCMs) distincts, dont les spécificités sont résumées dans le tableau I.3. La sélection de ces modèles de l'exercice CMIP6 repose sur leur capacité en matière de simulation du rayonnement solaire et nuages bas comme montré dans des études antérieures (Camberlin et al., 2023 ; Wang et al., 2022 ; Onsum Moseid et al., 2020 ; Julsrud et al., 2022), ainsi que sur la disponibilité de simulations à la fois pour le rayonnement solaire et les nuages bas.

Les simulations historiques sont disponibles de 1850 à 2014, mais dans notre cas, seules les années 1983-2014 qui couvrent l'ère des données satellites ont été utilisées. L'ensemble membre *r1i1p1f1* a été choisi pour tous les modèles sauf pour les deux modèles du CNRM pour lesquels cet ensemble membre n'est pas disponible ; l'ensemble membre *r1i1p1f2* a été employé à la place. Le CNRM explique que la mise en place d'un indice de forçage "*f2*" a été appliquée conformément aux directives du CMIP6. Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement que cette version de forçage diffère des versions de forçage adoptées dans d'autres modèles utilisant l'indice de forçage "*f1*", et n'a pas d'impact sur les analyses effectuées dans notre étude. Les données de ces modèles ont été téléchargées à partir du site web du CMIP6 (https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6). Nous avons spécifiquement téléchargé des données mensuelles relatives au rayonnement solaire, à la couverture nuageuse basse, moyenne, et haute, ainsi que les températures de surface de la mer (SST).

Tableau I. 3 - Informations générales sur les modèles et simulations CMIP6 utilisés.

Modèles	**Institut, pays**	**Référence**	**Ensemble membre (Variant Label)**	**Résolution spatiale (lat,lon)**
CESM2	National Centre for Atmospheric Research (NCAR), USA	Gettelman et al., 2019	*r1i1p1f1*	0.9° x 1.25°
CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques, France	Voldoire et al., 2019	*r1i1p1f2*	1.4° x 1.4°
CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Météorologiques, France	Séférian et al., 2019	*r1i1p1f2*	1.4° x 1.4°
E3SM-1-1	Le projet E3SM (Energy Exascale Earth System model), USA	Golaz et al., 2019	*r1i1p1f1*	1° x 1°
E3SM-2-0	Le projet E3SM, USA	Golaz et al., 2022	*r1i1p1f1*	1° x 1°
GFDL-ESM4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	Dunne et al., 2020	*r1i1p1f1*	1° x 1.25°
IPSL-CM6A LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Bouchet et al., 2020	*r1i1p1f1*	1.27° x 2.5°
MIROC6	Japan Agency for Marine Earth Science and Technology (JAMSTEC), The University of Tokyo, Japan	Tatebe et al., 2019	*r1i1p1f1*	1.4° x 1.4°

1.4 Autres données auxiliaires

Outre le rayonnement solaire, nous avons utilisé des données liées à d'autres paramètres, tels que les nuages, les précipitations, et les aérosols. Ces données ont contribué à la mise en lumière des variations du rayonnement solaire et à enrichir l'interprétation des résultats obtenus.

1.4.1 Les précipitations IMERG

Le produit IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM : Global Precipitation Measurement), est le résultat de la combinaison des estimations micro-ondes et infrarouges de la constellation GPM (Global Precipitation Measurement Mission, Huffman et al., 2017). Dans ce travail, nous avons utilisé la dernière version du produit, IMERG Version-

06B, qui offre une haute résolution spatiale de 0.1° et une résolution temporelle de 30 minutes. Ce jeu de données est utilisé notamment dans le chapitre II, où nous cherchons à appréhender les variations saisonnières du rayonnement solaire et à établir leurs liens avec les précipitations. Notre choix s'est porté sur ce produit en raison de sa disponibilité depuis l'année 2000, ce qui assure un chevauchement avec la période couverte par tous les produits de rayonnement solaire utilisés. En outre, la bonne capacité d'IMERG à estimer les précipitations, a été démontrée dans plusieurs études à la fois pour l'ensemble du continent africain (Dezfuli et al., 2017) et spécifiquement dans le bassin du Congo (Dos Santos et al., 2022 ; Boluwade, 2023). Les données IMERG sont téléchargeables sur le site web d'EARTHDATA (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/).

1.4.2 Les précipitations CHIRPS

Nous avons également utilisé un deuxième produit de précipitations, CHIRPS (The Collaborative High-resolution Precipitation Product, Funk et al., (2015)) qui représente une avancée significative dans l'estimation des précipitations. Développé en collaboration par l'USGS (United States Geological Survey), le CHC (Climate Hazards Center) et soutenu par l'USAID (United States Agency for International Development), la NASA et la NOAA, CHIRPS relève le défi de cartographier avec précision les précipitations dans les régions où les données de surface sont limitées.

CHIRPS fournit un ensemble de données qui s'étend de 1981 à nos jours, ce qui permet d'analyser les tendances historiques et d'évaluer les changements à long terme. Le produit a une résolution spatiale de 0.05° lat/lon et une résolution temporelle journalière et est disponible en quasi-global (50°S-50°N, et toutes les longitudes). CHIRPS a été évalué et validé pour l'Afrique centrale par Camberlin et al. (2019). Ils ont montré qu'il représente correctement la variabilité spatiale et saisonnière des précipitations dans la région et qu'il était plus performant que six autres produits également évalués dans cette étude. Dans ce travail, la version la plus récente, CHIRPS V2.0, a été utilisée. Ce produit est particulièrement pertinent pour le chapitre III de cette étude en raison de sa disponibilité à long terme, contrairement aux données de IMERG.

1.4.3 La nébulosité totale COMET

Le jeu de données de la fraction totale de la couverture nuageuse CMSAF ClOud Fractional Cover from METeosat First and Second Generation (COMET, Stöckli et al., 2017) est dérivé des imageurs MVIRI et SEVIRI à bord des satellites géostationnaires Meteosat (Meteosat First Generation 4 à 7 et Meteosat Second Generation 1 à 3). COMET fournit des données sur la fraction totale de la couverture nuageuse (Cloud Fractional Cover, CFC) à haute résolution temporelle (1 heure) et spatiale (0.05° × 0.05°) pour la période 1991-2015. L'algorithme de détection des nuages employé par COMET utilise de manière optimale les informations provenant de deux canaux spécifiques (le visible à large bande et l'infrarouge thermique) acquises par des capteurs géostationnaires. Cet algorithme, décrit par Bojanowski et al. (2018) adopte une génération cyclique de champs de ciel clair, utilise des scores de nuages continus et incorpore une estimation bayésienne naïve de la fraction de nuages qui prend en compte à la fois l'état et la variabilité des nuages. L'un des principaux atouts de cet algorithme

est qu'il s'appuie sur des radiances infrarouges (IR) et des réflectances visibles (VIS) bien caractérisées, extraites des données climatiques fondamentales (FCDR) de Meteosat, fourni par EUMETSAT. COMET n'a pas été validé spécifiquement pour l'Afrique centrale, mais a été utilisé dans plusieurs régions du monde (Pfeifroth et al., 2018 ; Bojanowski et al., 2018 ; Stöckli et al., 2019). Dans cette étude, nous avons utilisé des données mensuelles de COMET édition 1.0.

1.4.4 Les nuages bas ERA5

Les données de nuages bas issues des réanalyses ERA5 (cf. section 1.2.5, Hersbach et al., 2019) ont également été utilisées dans plusieurs parties de ce travail, car comme déjà indiqué au début, les nuages bas sont le premier facteur expliquant les variations de rayonnement solaire dans la région.

La variable des nuages bas fournie par ERA5 représente la proportion d'une grille couverte par des nuages se produisant dans les niveaux inférieurs de la troposphère. Les nuages bas ERA5 sont calculés à partir des nuages se produisant sur les niveaux du modèle dont la pression est supérieure à 0.8 fois la pression de surface. Ainsi, si la pression de surface est de 1000 hPa, les nuages bas seront calculés à partir des niveaux dont la pression est supérieure à 800 hPa (soit en-dessous d'environ 2 km en supposant une "atmosphère standard"). Cette variable est donnée sous forme de valeurs comprises entre 0 (pas de nuages bas) et 1 (couverture totale en nuages bas) ; ces valeurs ont été converties en pourcentage par la suite. Les nuages bas ERA5 ont été validés pour l'Afrique Centrale par Dommo et al. (2022) et Moron et al. (2023). Leurs résultats ont montré que ERA5 reproduit bien le cycle diurne et la variabilité interannuelle des nuages bas dans la région. Pour notre étude, nous avons utilisé des données journalières ou mensuelles selon notre besoin.

1.4.5 AOD des réanalyses CAMS

Nous avons également utilisé des données sur les aérosols AOD (Aerosol Optical Depth) issues du projet de réanalyses CAMS (Bellouin et al., 2020). Le modèle d'aérosol utilisé dans CAMS est un schéma hybride appelé « bulk-bin » avec 12 indicateurs ou marqueurs pour indiquer la taille des particules et les répartir en cinq groupes : poussière minérale, sel marin, sulfate, la suie et matière organique.

Le modèle génère l'AOD total, ainsi que ses composantes pour 17 longueurs d'onde allant de 0.34 à 2.13 µm. Dans notre étude, nous avons spécifiquement utilisé l'AOD total à une longueur d'onde de 550 nm couramment utilisée dans la littérature. En Afrique Centrale, on s'attend à plusieurs types d'aérosols, les aérosols de poussière (Laurent et al., 2008), la suie (Konzelmann et al., 1996), des aérosols marins (Chakraborty et al., 2022), des aérosols issus de la combustion de la biomasse (Mallet et al., 2021 ; Miller, 2021), ainsi des particules atmosphériques en suspension (Ruellan et al., 1999). L'AOD total comprend tous les types d'aérosols présents dans l'atmosphère. Les données sur les aérosols AOD CAMS sont disponibles sur une période allant de 2003 à 2017, avec une échelle temporelle journalière, pour des grilles de 1° x 1°. Les données mensuelles de la version CAMS 1.5 ont été utilisées.

2 Approches méthodologiques

2.1 Qualité des données

Dans cette section, nous décrivons les tests effectués pour évaluer la qualité des données in-situ de rayonnement solaire utilisées, notamment celle des 10 stations météorologiques (cf. section 1.1.2).

Les données in-situ se révèlent indispensables pour évaluer avec précision la quantité de rayonnement solaire reçue à un emplacement géographique spécifique. Néanmoins, il peut arriver que ces mesures contiennent des erreurs qui entachent leur qualité. C'est pourquoi il s'avère nécessaire de soumettre ces données in-situ à une vérification rigoureuse de leur qualité. Dans cette optique, toutes les données horaires de rayonnement solaire (GHI) ont été soumises à deux tests largement utilisés dans la littérature (Long et al., 2008 ; Yang et al., 2018). L'objectif de ces tests est d'éliminer toute donnée aberrante.

Le premier test (Equation I.2) élimine les mesures de GHI qui se situent en dehors des limites physiquement possibles. Le deuxième test (Equation I.3) rejette les mesures de GHI qui dépassent des limites extrêmement rares.

-Limites physiquement possibles : $-4 < GHI < 1.5E_{0n}Z + 100$ (Equation I.2)

-Limites extrêmement rares : $-2 < GHI < 1.2E_{0n}Z + 50$ (Equation I.3)

Où Z représente l'angle zénithal et E_{0n} l'irradiance extraterrestre sur une surface normale au rayonnement solaire.

Les données horaires in-situ de GHI qui ne franchissent pas avec succès ces contrôles de qualité ont été écartées, ce qui représente seulement 5 plages horaires sur les 7563 disponibles. Il convient de noter que, pour la base de données BSRN, ces contrôles de qualité sont appliqués aux données à 1 minute de résolution, une résolution temporelle qui n'est pas disponible dans notre réseau de stations.

Ces deux tests sont les plus fondamentaux et n'éliminent pas les valeurs erronées qui restent dans les limites de ce qui est physiquement possible ou associé à un décalage du capteur. Dans des études menées par Urraca et al. (2017) et Tang et al. (2010), des méthodes sont proposées pour détecter de telles erreurs dans les séries temporelles. Ces méthodes reposent sur le calcul d'intervalles de confiance pour la première étude et sur des modèles hybrides pour la deuxième. Cependant, ces méthodes requièrent de larges échantillons de données (afin que les intervalles de confiance soient solides à la fois dans le temps et dans l'espace) et/ou des variables additionnelles telles que la durée d'ensoleillement, deux conditions que nous ne pouvons pas remplir avec les données dont nous disposons.

D'autres tests ont été conduits pour repérer les éventuelles valeurs aberrantes qui pourraient subsister dans les données. La figure I.3 illustre le contrôle visuel bidimensionnel des données horaires provenant des stations de Pokola au nord et de Tchizamalou au sud-ouest du Congo (cf. Figure I.2 montrant la localisation des stations). Cette méthode de visualisation bidimensionnelle (figure I.3) présente sur l'axe horizontal les jours de l'année et sur l'axe vertical les heures de la journée. Les pixels représentent les valeurs du rayonnement solaire global à

chaque heure. L'atout de cette méthode réside dans sa capacité à rendre visible chaque donnée horaire individuelle, permettant ainsi l'observation des tendances infra-journalières et saisonnières. Cette méthode s'avère particulièrement utile pour identifier les éventuels décalages horaires, les données manquantes ainsi que les heures où le capteur est ombragé.

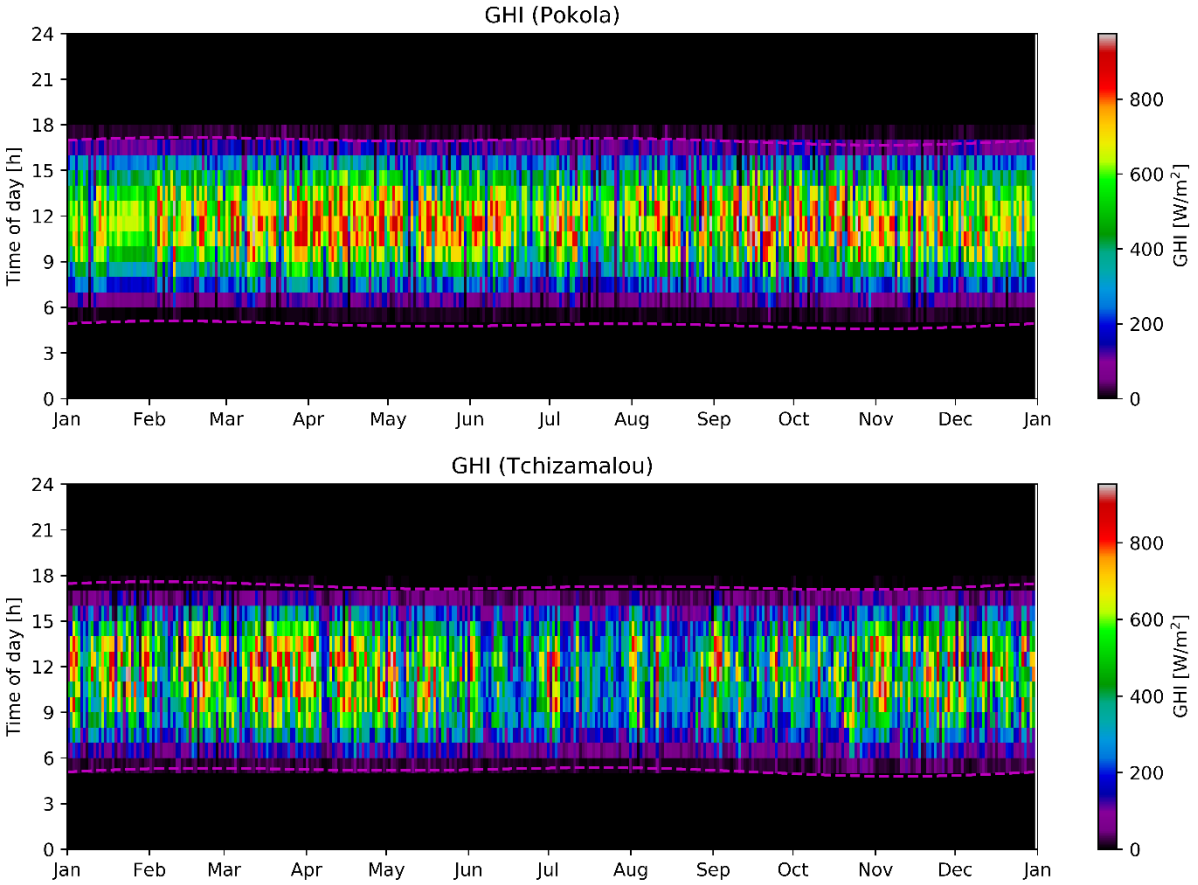

Figure I. 3 - Contrôle visuel bidimensionnel pour les stations de Pokola (année 2020) et Tchizamalou (année 2009). Les lignes en pointillé indiquent les heures de lever et de coucher de soleil correspondantes aux coordonnées géographiques de ces deux stations.

2.2 Classification des cycles diurnes

Pour évaluer la précision et la performance des produits à l'échelle diurne et de la station, une approche de classification des cycles diurnes a été faite. Conformément à Philippon et al. (2019), les quatre principaux cycles diurnes du rayonnement solaire, qui représentent les jours lumineux, obscurs le matin (obscure AM), obscurs l'après-midi (obscure PM) et obscurs, ont été extraits pour les 8 stations fournissant des données à une échelle de temps infra-journalière (cf. tableau I.1) et du pixel correspondant dans les produits, à l'aide de deux classifications K-means distinctes. Cette approche permet tout d'abord de se débarrasser en partie des biais et, de manière plus intéressante, d'évaluer les capacités des produits à l'échelle synoptique, c'est-à-dire leur aptitude à détecter les bonnes conditions météorologiques/niveaux de couverture nuageuse. Deuxièmement, elle permet également de prendre en compte les interactions à l'échelle temporelle entre les cycles diurnes et saisonniers. En effet, les variations dans le cycle saisonnier du rayonnement solaire sont généralement perçues comme des

variations dans les niveaux journaliers du rayonnement solaire. Avec une telle approche, elles peuvent également être reliées à des variations dans la fréquence de comportements diurnes typiques (c'est-à-dire des types de conditions météorologiques), par exemple une diminution des niveaux de rayonnement expliquée par une diminution de la fréquence des jours lumineux.

La classification K-means figure parmi les algorithmes de classification existants les plus largement utilisés. Son objectif est de répartir un ensemble de points en k groupes (souvent appelés clusters, dans notre cas 4), de manière à minimiser la somme des carrés des distances entre un point et le centre du cluster. Dans notre cas, nous avons effectué 200 exécutions avec 4 ensembles de points initiaux différents, tout en fixant à 300 le nombre maximal d'itérations pour que l'algorithme K-means puisse répartir les jours/stations ou jours/pixels dans les k (4) groupes et définir les k (4) centres.

Avant d'appliquer la classification K-means, les données horaires ont été lissées à l'aide d'un filtre Savitzky-Golay (Annexe A) afin d'éliminer une partie des variations à haute fréquence contenues dans le cycle diurne et liées aux changements rapides dans les conditions du ciel, notamment dans les mesures in-situ, et qui apportent du bruit. Toutes les données ont été normalisées en soustrayant à chaque station (ou pixel) la moyenne quotidienne, de manière à ce que toutes les stations (pixels) aient un poids comparable.

2.3 Analyse en composantes principales (ACP)

L'Analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique utilisée pour simplifier la complexité des données multidimensionnelles. L'ACP transforme un ensemble de variables corrélées en un nouvel ensemble de variables non corrélées appelées composantes principales ; il permet donc de réduire la dimensionnalité du jeu de données. Ces composantes principales capturent la variance la plus importante des données, permettant de révéler les tendances cachées. L'ACP est largement utilisée dans les sciences du climat (Ehrendorfer, 1987, Tadić et al., 2019).

Dans notre étude, nous avons utilisé l'ACP pour mettre en évidence des modes de variabilité interannuelle du rayonnement solaire, le principe consistant à condenser les informations de tous les pixels de la région d'Afrique Centrale occidentale en un seul vecteur, représenté par la première composante de l'ACP (ou bien le 1er mode de variabilité de rayonnement solaire comme nous l'avons nommé dans le chapitre III). Cette méthode a été appliquée aux anomalies mensuelles standardisées de rayonnement solaire pour chaque mois de manière indépendante. Des tests d'ACP étendue ont été effectués en prenant les données de tous les mois, et ont montré que la variabilité interannuelle du rayonnement solaire sur la région montrait une faible cohérence inter-mois, c'est à dire une faible persistance. En général, notre analyse d'ACP visait essentiellement à extraire des modes de variabilité, qu'ils présentent ou non des tendances, que nous avons testé à l'aide d'une régression linéaire avec le temps.

2.4 Méthode des anomalies cumulées : détection des dates de début et de fin de la saison sèche

Dans la majorité des études, la détection des dates de début et de fin des saisons est principalement concentrée sur les pluies. Actuellement, diverses méthodes sont disponibles, notamment celles basées sur les seuils de pluie ou le nombre de jours secs (Luković et al., 2021 ; Marteau et al., 2009), les anomalies cumulées de pluie (Liebmann and Marengo, 2001 ; Liebmann et al., 2008 ; Dunning et al., 2016 ; Liebmann et al., 2017), l'Analyse en Composantes Principales (Camberlin and Diop, 2003 ; Boyard-Micheau et al., 2013 ; Laux et al., 2008), et d'autres qui intègrent la dynamique atmosphérique (Omotosho, 1990, 1992). Ces différentes méthodes abordent différents aspects du processus de changement saisonnier.

Dans notre étude, nous avons choisi d'employer la méthode des anomalies cumulées (Accumulated Anomalies, "AA", Liebmann and Marengo, 2001), une méthode qui repose sur la somme cumulée des anomalies journalières, année par année, afin de détecter les dates de début et de fin de la saison sèche.

Bien que cette approche ait été conçue à l'origine pour les précipitations en Amazonie (Liebmann and Marengo, 2001), les précipitations étant une variable discrète, elle s'est également avérée adaptée au rayonnement solaire, qui est une variable continue. Comme on le sait, le rayonnement solaire diminue dans la région pendant la saison sèche. L'approche consiste donc à déterminer avec précision le moment où le rayonnement solaire commence à diminuer. L'évaluation des anomalies donne un aperçu des jours où les niveaux de rayonnement solaire sont inférieurs ou supérieurs à la moyenne journalière pluriannuelle. En effet, la somme cumulée de ces anomalies montre des inflexions et changements de signe : une somme cumulative qui tend à augmenter signifie une succession de jours avec des anomalies positives et inversement. Dans le contexte d'Afrique centrale, le pic de cette somme cumulée des anomalies de rayonnement solaire doit correspondre au début de la saison sèche, tandis que le minimum à sa fin. Un exemple est donné au chapitre III lors de l'application de la méthode.

2.5 Autres métriques statistiques

Plusieurs métriques ont été utilisées pour évaluer la précision des produits et des modèles climatiques tout au long de ce travail, à savoir :

- **Le coefficient de corrélation de Pearson,** qui mesure la force de la relation linéaire entre deux variables et est calculé selon la formule suivante (Equation I.4) :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}} \qquad \text{(Équation I.4)}$$

Où x_i et y_i représentent la ième valeur des vecteurs x et y, respectivement, et $\overline{x}$ et $\overline{y}$ sont leurs moyennes respectives.

- **Le Biais moyen** qui mesure la distance entre les valeurs observées et estimées et qui est calculé en utilisant la formule suivante (Equation I.5) :

$$\boldsymbol{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{esti} - x_{obsi})}{n} \qquad \text{(Equation I.5)}$$

  Où $x_{obs\ i}$ représente la ième observation dans l'ensemble de données d'observation, $x_{est\ i}$ est la valeur estimée correspondante, et n est le nombre total d'observations. Plus le biais est faible (proche de 0), meilleure est l'estimation.

- **La Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (Root Mean Square Error, RMSE)**, qui est l'une des mesures les plus largement utilisées pour caractériser l'étendue des écarts entre les valeurs estimées et observées (contrairement au biais qui ne nous renseigne pas sur l'amplitude de ces écarts) ; la RMSE est calculée en utilisant la formule suivante (Equation I.6) :

$$\boldsymbol{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_{esti} - x_{obsi})^2} \qquad \text{(Equation I.6)}$$

  Où n est le nombre d'observations et ($x_{est\ i}$-$x_{obs\ i}$) est la différence entre la ième observation et sa valeur estimée correspondante.

- **Le coefficient d'asymétrie** indique le degré d'asymétrie d'une distribution. Pour des données qui suivent une distribution normale, il devrait être proche de zéro. S'il est supérieur à zéro, cela signifie que la queue de la distribution se trouve du côté droit et la distribution est considérée comme étant asymétrique à droite. Si le coefficient est négatif, la queue se trouve du côté gauche de la distribution et la distribution est dite asymétrique à gauche. En d'autres termes, le coefficient d'asymétrie mesure la tendance de la distribution à s'étirer davantage d'un côté que de l'autre. Cela nous aide à comprendre comment les données sont réparties.

Chapitre II. Analyse comparative et validation des estimations satellitaires du rayonnement solaire incident pour l'Afrique centrale : des moyennes annuelles aux cycles diurnes

Dans ce premier chapitre de résultats, une évaluation et validation des produits d'estimation de rayonnement solaire par rapport aux mesures in-situ a été faite de l'échelle annuelle à l'échelle diurne. Ce chapitre s'articule autour d'un article publié dans *Atmospheric research*. Les résultats principaux sont synthétisés en français dans un résumé étendu. Puis vient l'article lui même.

Sommaire

1 Publication: Inter-comparison and validation against in-situ measurements of satellite estimates of incoming solar radiation for Central Africa: from the annual means to the diurnal cycles.....29

1 Publication: Inter-comparison and validation against in-situ measurements of satellite estimates of incoming solar radiation for Central Africa: from the annual means to the diurnal cycles

Amine Ouhechou[1], Nathalie Philippon[1], Béatrice Morel[2], Jörg Trentmann[3], Alexandre Graillet[2], Armand Mariscal[1] and Yann Nouvellon[4,5]

[1] Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, 38000 Grenoble, France.
[2] Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés (LE2P) – Energy lab, Université de La Réunion, 15 avenue René Cassin, CS 92003, 97744 Saint Denis CEDEX 9.
[3] Deutscher Wetterdienst, Frankfurter Str. 135, 63067, Offenbach, Germany.
[4] CIRAD, UMR Eco&Sols, F-34398 Montpellier, France.
[5] Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAe, IRD, Montpellier, SupAgro, F-34398 Montpellier, France.
Corresponding author: Amine Ouhechou (amine.ouhechou@univ-grenoble-alpes.fr)

Article publié dans *Atmospheric Research* (07/03/2023)

Résumé étendu

Le présent article se penche sur l'évaluation de huit produits d'estimation de rayonnement solaire en Afrique Centrale, à savoir, CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2, CAMS-JADE, WorldClim 2 et les réanalyses ERA5. L'objectif est double : d'abord, comprendre les variations spatio-temporelles moyennes du rayonnement solaire dans la région ; ensuite, évaluer la capacité des produits à reproduire ces variations. La comparaison et l'évaluation des produits ont été menées sur la base des stations FAOCLIM 2, ainsi que les mesures in-situ provenant de dix stations météorologiques en Afrique centrale occidentale. L'analyse a été menée sur diverses échelles temporelles, allant de l'échelle l'annuelle au cycle diurne.

Les analyses ont révélé des différences importantes entre les produits dans l'estimation du rayonnement solaire en Afrique centrale. À l'échelle annuelle, les champs spatiaux moyens du rayonnement solaire sont cohérents entre tous les produits. La façade atlantique d'Afrique centrale reçoit le moins de rayonnement solaire, quelle que soit le produit. Cependant, les niveaux moyens de rayonnement solaire varient considérablement entre les produits, allant de 140 W/m² pour les deux produits CERES et ERA5 à 230 W/m² pour les deux produits CMSAF et CAMS-JADE. Le produit TPDC montre le champ moyen annuel de rayonnement solaire le plus réaliste, avec des niveaux faibles de rayonnement solaire à l'ouest de la région et des niveaux modérés au centre. En revanche, WorldClim 2 montre des niveaux de rayonnement solaire irréalistes, en moyenne inférieurs de 40 W/m² par rapport à tous autres produits.

Les cycles annuels moyens de rayonnement solaire pour six sous-régions d'Afrique Centrale (cf. figure B.1) montrent un maximum en février-mars et un minimum en juillet-août. Les divergences les plus marquées sont dans les régions du Centre et du Sud de la République

Démocratique du Congo (RDC), avec des amplitudes du cycle annuel moyen faibles. Les deux produits CMSAF montrent des niveaux de rayonnement solaire plus élevés, tandis que les produits CERES montrent des niveaux plus faibles.

A l'échelle journalière, l'évaluation des produits a été faite sur la base des données des dix stations météorologiques de la façade Atlantique. Les quatre produits utilisés à cette échelle (CMSAF SARAH-2, CERES-SYN1deg, CAMS-JADE et ERA5) montrent une bonne corrélation avec ces données in-situ (souvent supérieures à 0.7), avec les corrélations les plus élevées pour CMSAF SARAH-2 et CAMS- JADE, Cependant, tous surestiment les niveaux de rayonnement solaire tout au long du cycle annuel. Les surestimations les plus fortes sont particulièrement prononcées en juin-septembre dans les stations du Gabon et du sud de la République du Congo. CMSAF SARAH-2 présente les surestimations les plus élevées. ERA5 montre également des biais importants et des erreurs dans la reproduction de la variabilité saisonnière.

À l'échelle diurne, la performance des produits a été évaluée en tenant compte des quatre types de cycles diurnes de rayonnement solaire, à savoir les jours obscurs, obscurs le matin (Obs. AM), obscurs l'après-midi (Obs. PM) et lumineux. Les produits parviennent à reproduire correctement la forme des quatre types de cycles diurnes, mais leur amplitude est généralement trop élevée en particulier pour les jours obscurs AM et obscurs PM. La fréquence des quatre types de jours varie selon les stations : les stations au nord de la république du Congo enregistrent plus de jours lumineux, tandis que les stations au Gabon et au sud de la république du Congo enregistrent davantage de jours obscurs AM ou obscurs, ce qui est cohérent avec les niveaux annuels moyens.

Les variations du rayonnement solaire sont principalement causées par les nuages et les aérosols, et la qualité des estimations dépend de la détection précise de ces éléments. Les nuages bas, en particulier, posent un défi majeur en Afrique centrale, car ils sont difficiles à détecter et sont surmontés par des aérosols pendant la saison sèche. Les produits basés sur la climatologie mensuelle des aérosols (CMSAF SARAH-2 et CLARA-A2) montrent les niveaux les plus élevés et les surestimations les plus importantes.

En conclusion, cette étude approfondie évalue la précision de plusieurs produits de rayonnement solaire en Afrique centrale. Bien que ces produits montrent une bonne corrélation avec les données in situ, des biais systématiques sont observés, notamment des surestimations tout au long de l'année. Les résultats mettent en évidence la nécessité d'améliorer la qualité des données de rayonnement solaire pour mieux comprendre le fonctionnement des forêts et les effets du changement climatique dans la région.

Abstract

This study pictures for the first time incoming solar radiation mean evolution in Central Africa, intercomparing 8 gridded products (namely CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2, CAMS-JADE satellite products, as well as ERA5 reanalysis and WorldClim 2 interpolated measurements) and station- based estimations (FAOCLIM 2) or measurements. At the mean annual scale, all products picture low levels of global horizontal irradiance (GHI) to the west (SW Cameroon to SW Republic of Congo) and higher levels to- wards the north and south margins of the region. However, GHI levels in the CMSAF products are much higher than in CERES and TPDC. The mean annual cycles of GHI extracted for 6 sub-regions are bimodal, with two maxima during the two rainy seasons (March–May and September–November) and two minima during the two dry seasons (December–February and June–August). These seasonal cycles are well reproduced by most products except their amplitude which is dampened in TPDC. At the daily and sub-daily time-scales, products were compared with in-situ measurements from ten meteorological stations located in the western part of Central Africa. The products' performance is assessed through scores as bias and RMSE but also by considering the diurnal cycles' shape, amplitude and frequency of occurrence along the annual cycle. The products properly reproduce the shape of the four types of diurnal cycles with nonetheless noticeable differences in the cycle's frequencies of occurrence.

KEYWORDS: Solar radiation - Central Africa - Satellite estimates - Diurnal cycles

1. Introduction

Solar radiation reaching the Earth's surface is an important parameter of the surface radiation budget (Gupta et al., 1999; Liang et al., 2010), the primary source of energy for the biosphere (Jiang et al., 2020) and a key variable in many fields (e.g., renewable energy production (Crook et al., 2011), vegetation productivity (Muchow et al., 1990), atmospheric circulation (Wild et al., 1995) and hydrological cycles (Ramanathan et al., 2001)). However, long-term reliable in-situ measurements of surface solar radiation are rare: for instance, the Baseline Solar radiation Network (BSRN, Driemel et al., 2018) which is the largest high-quality network of solar radiation measurements, comprises about 60 stations only across the world, with no station in Central Africa, a region of critical importance for the global climate due to the large carbon stock contained in its forests and peatlands (Lewis et al., 2009; Saatchi et al., 2011; Verhegghen et al., 2012), and the CO2 sink they represent (Hubau et al., 2020).

Due to the scarcity of in-situ measurements, the climate of Central Africa has been less studied than that of the neighboring semi-arid African regions (Malhi et al., 2013). Camberlin et al. (2019) and Bigot et al. (2016) explain this fact by a loose network of stations as well as by regular or long interruptions in service (up to several years) at some stations. For example, in the early 2010s, the Global Telecommunications System (GTS) did not receive any station reports from most of the Democratic Republic of Congo (DRC), which covers more than 2 million km^2 (Camberlin et al., 2019). But even in the few stations of the Central Africa national weather service actively reporting to GTS, in-situ measurements of incoming surface solar radiation are seldom: most stations record sunshine duration instead. In that respect,

gridded solar radiation products, either issued from satellite images or weather forecast models used in a reanalysis mode, are for many regions and Central Africa especially, the only means to evaluate the levels of incoming surface solar radiation entering the surface at high spatial and temporal resolution.

As remote sensing technology has advanced rapidly over the past decades, satellite estimates of incoming solar radiation have also improved. They represent the second-best option after the ground measurements (Polo et al., 2016; 2019). However, it is necessary and important to validate and compare them to understand their characteristics and differences. To date, many studies have compared and validated incoming solar radiation products on global and regional scales. For example, Yang & Bright (2020) recently performed a worldwide validation of six satellite-derived and two reanalysis incoming solar radiation products with measurements from 57 BSRN stations for the period 1992–2018. Zhang et al. (2015) evaluated four satellite-derived products using comprehensive ground measurements at several stations around the world. They found that satellite estimates match well with in-situ measurements at monthly and daily time-scales and can capture the incoming solar radiation seasonal variation with an overestimation of 10W/m^2. They also found that the CERES-EBAF product shows the best accuracy among the four datasets used. Babar et al. (2019) also compared four products over Norway and found a Mean Absolute Deviation (MAD) of 5.6W/m^2, 5W/m^2, and 6.8W/m^2 for CMSAF CLARA-A2, SARAH-2, and ERA5, respectively. In addition, many other studies have compared and validated satellite estimates and reanalysis over different regions (e.g., Yu et al., 2019; Boilley and Wald, 2015; Trolliet et al., 2018; Zhang et al., 2020; Wang et al., 2018; Buffat and Grassi, 2016) but Central Africa.

In order to correctly describe the spatial and temporal variations of incoming surface solar radiation in Central Africa, the use of satellite products and reanalysis is primordial. Using hourly Direct Normal Irradiance data from the CMSAF SARAH-2 database, Philippon et al. (2019) drew the first regionalization of Central Africa based on solar radiation. They pointed to the singularity of the western part of Central Africa, with very low incoming surface solar radiation levels. They also showed that the densest evergreen forests are located in Western Central Africa as the low radiation levels imply lower temperatures and evapotranspiration rates. However, in their study, Philippon et al. (2019) did not assess the accuracy of the solar radiation levels provided by CMSAF SARAH-2 against in-situ measurements, nor compare them to levels provided by other satellite estimates or reanalysis.

Therefore, this study was motivated by the lack of knowledge on incoming surface solar radiation in Central Africa, from either in-situ measurements or estimates. The questions we aim to address are: What is the ground truth for solar radiation in Central Africa? When, where, and in what order are the main differences between satellite estimates and in-situ measurements? Especially what is the performance of CMSAF SARAH-2? Indeed, given its high spatial (0.05° lat and lon) and temporal (30min) resolutions, and its long recording period (from 1983 onwards), this product should theoretically be the best suited for analyzing long-term incoming surface solar radiation evolution at a fine scale over the region.

Hence, the objectives of this study were twofold: (1) picture the mean spatial and temporal variations (i.e. annual field, seasonal cycle) of incoming surface solar radiation in

Central Africa, and (2) assess the coherency and accuracy of six state-of-the-art solar radiation estimates.

This was made possible by the compilation of a set of 30min resolution in-situ measurements acquired in the framework of different observatories and research initiatives developed in Western Central Africa in the field of ecology, and that have implemented weather stations equipped with pyranometers.

The six satellite-derived products selected for inter-comparison and validation are: CERES-SYN1deg edition 4a, CERES-EBAF edition 4.1, TPDC, CAMS-JADE, CMSAF SARAH-2 edition 2.1 and CLARA-A2 edition 2.1, plus ERA5 reanalysis, and WorldClim 2 interpolated measurements.

This paper is organized as follows. The incoming surface solar radiation ground-based measurements and gridded products are briefly described in Section 2. The various validation metrics and the methods applied (clustering analysis of solar radiation diurnal cycles) are described in Section 3. Section 4 presents and discusses the main results (especially the biases of solar radiation estimates). Finally, results are summarized and discussed in the discussion and conclusion section.

2. Data

2.1. In-situ measurements of incoming surface solar radiation

As said in the introduction, there is no BSRN station in Central Africa. The only indirect estimates or direct measurements derived from in-situ measurements available for the region are the ones provided in the FAOCLIM 2 database and the ones that we collected from a few observatories in ecology.

2.1.1. FAOCLIM 2

The Food and Agriculture Organisation makes available a global agro-CLIMatic database, the so-called 'FAOCLIM 2'(https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1028000/). It compiles long-term monthly averages (i.e. 12 monthly values) for 14 climatic variables, including incoming surface solar radiation from up to 28100 stations across the world depending on the variable. We extracted data for 47 stations in Central Africa, whose locations are provided in figure II.1b. The long-term monthly averages in FAOCLIM 2 are computed over time periods which vary across stations. For Central Africa, these averages are generally computed for the period 1961-1990, i.e., when the weather stations network was the densest and the best maintained.

Actually, incoming surface solar radiation is rarely recorded at Central African weather stations; it is the daily sunshine duration that is mostly measured with Campbell Stokes sunshine recorders. Therefore, in FAOCLIM 2 and for Central Africa, incoming surface sunshine radiation is not a direct measure but an indirect estimation from sunshine duration measurements.

The estimation relies on the Angstrom formula (Eq II.1), which relates R_s (i.e., incoming surface radiation) to extraterrestrial radiation (R_a) and relative sunshine duration (n/N) (Allen et al., 1998) as follows:

$$R_s = \left(a_s + b_s \times \left(\frac{n}{N}\right)\right) \times R_a \qquad \text{(Eq II.1)}$$

where n is the actual duration of sunshine, N is the maximum possible duration of sunshine or daylight hours, R_a the extraterrestrial radiation, a_s is a constant that accounts for the fraction of diffuse radiation, and b_s for the fraction of direct radiation (Hinrichsen et al., 1994). When no solar radiation data are available and no calibration has been carried out to improve the a_s and b_s coefficients, values are set to 0.25 and 0.50 respectively (which is assumed for Central Africa stations). Provided in MJ/m²/day, R_s was converted into W/m² as this is the unit used in all the other datasets analyzed.

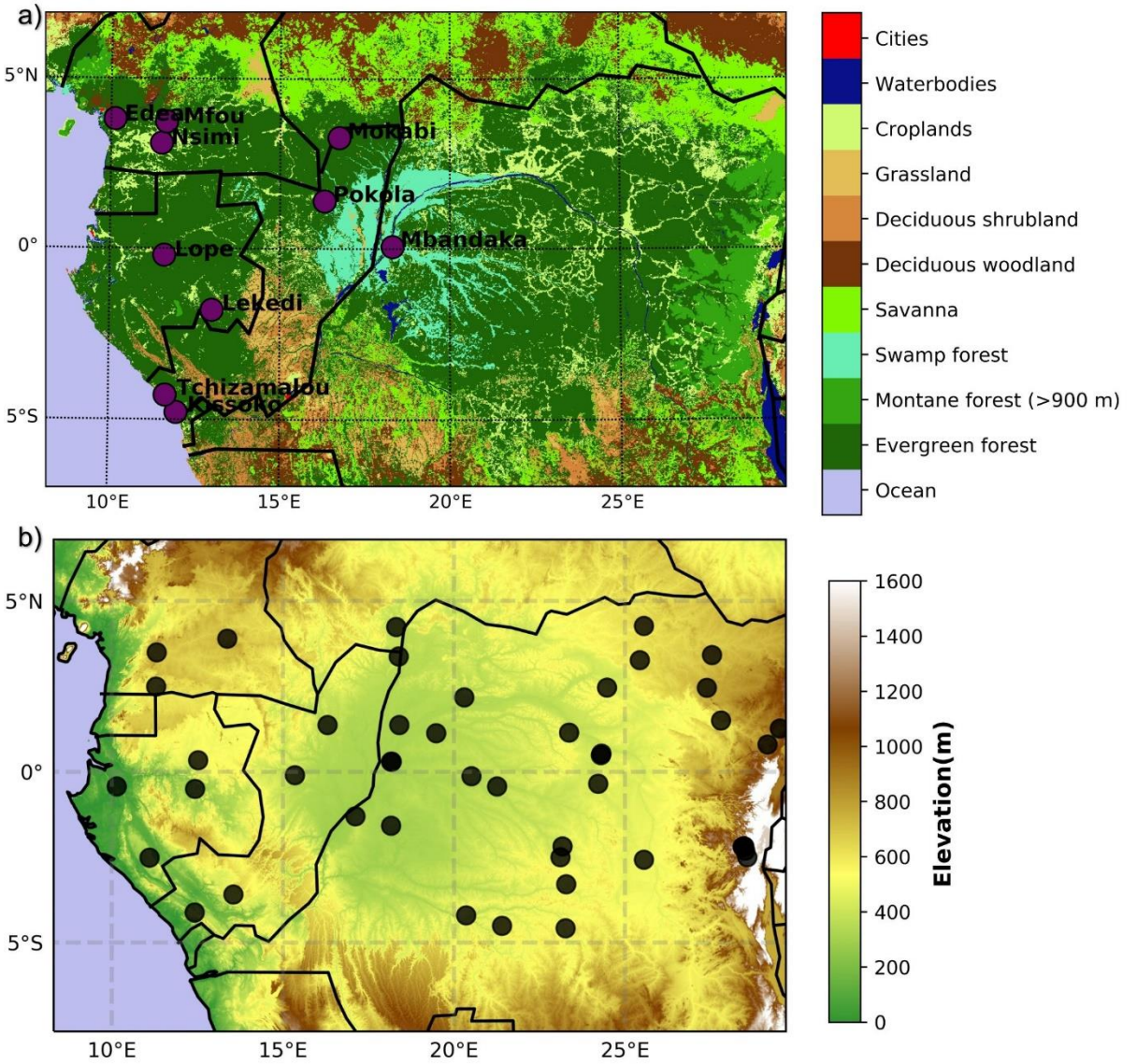

Figure II. 1 - Location of solar radiation in-situ measurements extracted from a) 10 original meteorological stations (purpol dots) and b) FAOCLIM 2 database (black dots). Central Africa land-cover (from GLC 2000, https://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php) and topography (from GTOPO30, https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30) are respectively provided as back ground in a) and b) . Black lines are the country boundaries.

The fact that solar radiation in FAOCLIM 2 is estimated using the Angstrom formula (Eq II.1) constitutes a large source of uncertainty. First, the Angstrom formula is based on sunshine duration only, and does not account for all factors that affect solar radiation, such as atmospheric conditions, sun's position in the sky, surface albedo. Not taking these factors into account introduces errors in the solar radiation estimation. Second, the coefficients of the Angstrom formula are location-specific and may change over time. Setting the a_s and b_s coefficients to default values as in the case of Central Africa, accounts for another source of uncertainty.

Therefore, in this study, FAOCLIM 2 was not considered as the ground-truth reference dataset. It was set at the same level as the other products, and used in the inter-comparison of the mean annual fields and of the mean seasonal cycles, to check their consistency.

2.1.2. Original meteorological stations

Several observatories and research initiatives in Western Central Africa (WCA hereafter) monitor climate thanks to weather stations. We had access to global incoming surface solar radiation data recorded at 10 of these sites (Figure II.1a) distributed in Cameroon, Gabon, the Republic of Congo, and the Democratic Republic of Congo (DRC). The instruments used as well as the recording periods and temporal resolutions of data are provided in Table II.1. Most stations provide data at high temporal resolution, sub-daily mostly, but with short recording periods (2-3 years in most cases) which do not always overlap between stations.

We do not have any precise information (i.e. metadata) on the sites' characteristics (flat/sloping, urban/rural, proximity of building/trees) nor on how the instruments are maintained (maintenance frequency, sensors' calibration or replacement …), which may affect the accuracy of the data. In Central Africa, surface solar radiation measurements can be disturbed by dew/condensation, dust and other soiling (e.g. birds droppings). Data quality issued from the pyranometers at these 10 weather stations (which is examined in section 3.1) is far from reaching the standards of data quality issued from the BSRN stations (Driemel et al., 2018). However, they are undoubtedly the only ground-truth source for incoming surface solar radiation for the region. That is why they are used as a benchmark reference for the gridded estimates.

Table II. 1 - Incoming surface solar radiation in-situ measurements characteristics: station name and location, provider and data status, recording period, temporal resolution, and instrument type and wavelength range.

Name	Country	Latitude	Longitude	Provider and data status	Recording period	Temporal resolution	Instrument and wavelength range (in nm)
Edea	Cameroon	3.80	10.12	TAHMO; on request	02/2020 –12/2020	15min	Pyranometer Apogee (300–1200)
Mfou	Cameroon	3.73	11.64	TAHMO; on request	09/2018 –12/2020	15min	Pyranometer Apogee (300–1200)
Mbandaka	DRC	0.07	18.31	TAHMO; on request	11/2019 –12/2020	15min	Pyranometer Apogee (300–1200)
Nsimi	Cameroon	3.16	11.83	M_TROPICS; open-access	04/2004 –03/2008	daily	Pyranometer Campbell 4813 (300-2800)
Kissoko	Congo-BZV	-4.79	11.98	F-ORE-T; on request	03/2004 –06/2006	30min	SP-LITE Silicon Pyranometer (400-1100)
Tchizamalou	Congo-BZV	-4.29	11.66	F-ORE-T; on request	07/2006 –12/2009	30min	SP-LITE Silicon Pyranometer (400-1100)
Lopé	Gabon	-0.20	11.60	ANPN; open access	01/2012 –10/2015	daily	Pyranometer Davis (400-1100)
Lékédi	Gabon	-1.80	13.01	SEEG-Lékédi	07/2018 –07/2019	15min	Pyranometer Davis (400-1100)
Pokola	Congo-BZV	1.4	16.31	CIRAD - IGE	03/2016 –12/2020	15min	Pyranometer CS300 Apogee (360-1120)
Mokabi	Congo-BZV	3.27	16.74	CIRAD - IGE	03/2016 –12/2020	15min	Pyranometer CS300 Apogee (360-1120)

2.2. Satellite and reanalysis derived estimates of incoming surface solar radiation

In this work, we evaluated the accuracy of six satellite-derived products (CMSAF CLARA-A2 edition 2.1, CMSAF SARAH-2 edition 2.1, TPDC, CAMS-JADE, CERES EBAF edition 4.1 and CERES SYN1deg edition 4a), one reanalysis product (ERA5) and WorldClim 2 to estimate incoming surface solar radiation. Therefore, the variable of interest in this study is the global horizontal component of the incoming surface solar radiation, namely the global horizontal irradiance (GHI) expressed in W/m^2. In the rest of the paper, we refer to incoming surface solar radiation as “GHI”.

This section and table II.2 provide only the main characteristics of the products. Detailed information about the respective gridded datasets is given in Chapter I of the manuscript. The gridded products have different spatial and temporal resolutions, and temporal coverages. It should be noticed that we considered the period 2005-2015, common to all the products, as the study period when inter-comparing them at the mean annual and monthly time-scales. When comparing the products to the 10 stations on daily and sub-daily scales, the study period corresponds to the period of available records and therefore differs from station to station (Cf. Table II.1).

2.2.1. CMSAF CLARA-A2 and CMSAF SARAH-2

We used the latest edition of two satellite-based Climate Data Records (CDRs) from the EUMETSAT Climate Monitoring Satellite Application Facility (CMSAF, Schulz et al., 2009): the "Clouds, Albedo and Radiation data set from AVHRR data—Edition 2.1" (CLARA-A2 hereafter, Karlsson et al., 2017; 2020) and the "Surface Solar Radiation Data Set-Heliosat–Edition 2.1" (Pfeifroth et al., 2017; 2019). CMSAF CLARA-A2 and CMSAF SARAH-2 CDRs are freely available for downloading through the CMSAF Web User Interface (https://wui.cmsaf.eu/).

CMSAF CLARA-A2 GHI is derived from the Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) sensors onboard the polar-orbiting NOAA and METOP satellites. Data are available from 1982 to 2019 on a 0.25° × 0.25° global grid as daily and monthly means (Karlsson et al., 2017; 2020; Table II.2). As previously stated, monthly GHI means were validated for the period 2005–2015 and daily GHI means for the period over which ground-based measurements over the study area were available. Analyses exclude the period before 1992, for which only one satellite in orbit was available, avoiding the effect from a large number of missing data on the validation results (Pfeifroth et al., 2018).

CMSAF SARAH-2 GHI is derived from the visible channels of the Meteosat Visible and Infrared Imager (MVIRI) and the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) instruments onboard the geostationary-orbiting Meteosat First Generation (MFG) and Meteosat Second Generation (MSG) satellites. The CMSAF SARAH-2 CDR provides half-hourly instantaneous, daily mean and monthly mean GHI values from 1983 to 2017 on a regular latitude/longitude grid with a spatial resolution of 0.05° x 0.05° covering Europe and Africa (Pfeifroth et al., 2017; 2019; Table II.2). The CMSAF SARAH-2 CDR is extended with the Interim CDR based on CMSAF SARAH-2 methods to include the time period from 2018 to near-real time (Pfeifroth et al., 2018).

Table II. 2 - Summary of the general characteristics of the gridded products used in this study. Dataset name, data spatial and temporal resolution and temporal range, satellite names and orbit type, reference paper.

Dataset	Spatial res.	Temporal res.	Temporal range	Satellite	Orbit type	Reference
CERES-EBAF	1° × 1°	Monthly	2000-03 / 2020-12	Terra + Aqua	heliosynchronous orbit	Kato et al., 2018
CERES-SYN1deg	1° × 1°	Hourly	2000-03 / 2020-12	Terra + Aqua	heliosynchronous orbit	Doelling et al., 2016
ERA5	0.25° × 0.25°	Hourly	1979-01 / 2020-12	---	---	Hersbach et al., 2019
CMSAF CLARA-A2	0.25° × 0.25°	Daily - monthly	1982-01 / 2019-06	AVHRR sensors on series of NOAA satellites and METOP satellites	polar orbit	Karlsson et al., 2020
CAMS-JADE	0.2° × 0.2°	15min	2005-01 / 2020-12	SEVIRI on MSG satellites	geostationary orbit	Qu et al., 2017
CMSAF SARAH-2	0.05° × 0.05°	30min - monthly	1983-01 / 2017-12	MVIRI/SEVIRI on METEOSAT MFG and MSG	geostationary orbit	Pfeifroth et al., 2019
WorldClim 2	1km × 1km	Monthly means	---	Spatial interpolation of FAO data		Fick et al., 2017
TPDC	10km × 10km	3-hourly	1983-07 / 2018-12	combination of many products (section 2.2.4)		Tang W., 2019

2.2.2. CAMS-JADE

We also used the satellite-based GHI data from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service Radiation Service (CAMS-RAD, Qu et al., 2017). In CAMS-RAD, GHI is derived by processing the images acquired by the SEVIRI instrument onboard the MSG satellites. CAMS-RAD provides 15-min instantaneous GHI values from 2004 to present at 0.2° x 0.2° spatial resolution over Europe and Africa. The volume of CAMS-RAD GHI data for Africa (20°W-54°E/40°N-37°S), called and referred to as CAMS-JADE hereafter, is freely available for downloading through the SoDa website (http://www.soda-pro.com/help/cams-services/cams-radiation-service/download-africa-volume). The variable of interest in CAMS-JADE is the "global horizontal irradiation". Values which are stored as unsigned bytes ranging from 0 to 255, are first multiplied by 1.2 to get the 15-min global horizontal irradiation in Wh/m^2, and then divided by a quarter of an hour to get the GHI in W/m^2. Note that unlike the other products, GHI is provided for land-pixels only.

2.2.3. CERES-EBAF and CERES-SYN1deg

We also examined two coarser-grained satellite-based GHI products from the CERES project (Wielicki et al., 1996). We used shortwave downwelling surface fluxes (corresponding to the GHI) from (1) the hourly CERES SYNoptic 1° Ed.4.1 product (CERES-SYN1deg hereafter, Doelling et al., 2013) and (2) the monthly CERES Energy Budget and Filled Ed4 product (CERES-EBAF hereafter, Kato et al., 2018). The temporal coverage of CERES products is 03/2000-12/2020. The spatial coverage is the entire globe with a spatial

resolution of 1° × 1°. All CERES data are made available for downloading via the CERES website.

The hourly CERES-SYN1deg surface fluxes are provided based on the combination of observations from several instruments on multiple platforms including CERES imaging radiometers on geostationary (GEO) satellites and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on Terra (descending sun-synchronous orbit with an equator crossing-time at 10.30 AM local time) and Aqua (ascending sun-synchronous orbit with an equator crossing-time at 1.30 PM local time) satellites (Doelling et al., 2013).

2.2.4. TPDC

We also used the "TPDC" dataset (National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, Tang W., 2019). This high-resolution global dataset covers a period of nearly 36 years from 1983 to 2018, with a temporal resolution of 3 hours and a spatial resolution of 10 km.

The TPDC dataset was produced using a combination of the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP-HXG) cloud products, ERA5 reanalysis data and MODIS aerosol and albedo products, with an improved physical parameterization scheme. The main inputs used to provide GHI are the cloud optical depth obtained from the ISCCP-HXG cloud products. Secondly, information on water vapor, surface pressure, and ozone was gathered from the ERA5 reanalysis data. Lastly, albedo and aerosol data were obtained from MODIS products.

GHI data are freely available for downloading through the TPDC website (https://data.tpdc.ac.cn).

2.2.5. ERA5 climate reanalysis

ERA5 (Hersbach et al., 2019) is the latest climate reanalysis dataset released by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). It includes several improvements compared to ERA-interim (Dee et al., 2011) especially in terms of spatial (31 km vs. 79 km) and temporal (hourly vs. 3-hourly) resolutions, number of vertical levels (137 vs. 60), and various newly reprocessed datasets and recent instruments that could not be ingested in ERA-Interim. It also relies on a new Numerical Weather Prediction model: the NWP "IFS Cycle 41r2" (Hersbach et al., 2016).

The ERA5 dataset provides hourly estimates for many atmospheric parameters, ocean-wave and land-surface quantities. The ERA5 solar radiation variable used in this study is the amount of solar radiation denoted by "msdwswrf" (mean surface downward short-wave radiation flux) in W/m^2 with a spatial resolution of 0.25° × 0.25° for each hour of the day from 1979 to present.

In ERA5, the incoming shortwave radiation like many other parameters, is not directly observed: it is an output of the NWP model, and it is obtained from a radiation transfer model that simulates the attenuation of the irradiance from the top of the atmosphere (TOA) to the ground by the atmosphere. Typically, reanalyses do not assimilate aerosols, clouds and

water vapor, which causes an increase in the uncertainty of the estimated surface irradiance (You at al., 2013; Zhao et al., 2013).

2.2.6. WorldClim 2

The WorldClim 2 dataset provides gridded monthly averages for the period 1970-2000 (i.e. 12 values per grid-point) for 7 parameters at a very high spatial resolution (1km^2) for global land areas (Fick et al., 2017). It is widely used in ecological studies for species distribution modeling, although Bedia et al. (2013) pointed out deficiencies and limitations. The gridded fields are obtained from the spatial interpolation of in-situ data using thin-plate splines plus topography (elevation, distance to coastline) and/or climatic covariates. In-situ data for solar radiation are sourced from 3 global databases: FAOCLIM 2 (Cf. section 2.1.1 above), the climatological normals from the World Meteorological Organisation (WMO, 1996) and the Global Summary Of the Day (NCEI, 2015). However, incoming surface solar radiation is the parameter for which the number of stations available is the lowest: this variable is less often recorded and high-quality data are scarce, especially for Central Africa.

To document Central Africa, we extracted grid-points documenting the area 8°S–7°N/8–30°E. We also converted values provided in kJ/m2/day to W/m^2.

2.3. Auxiliary datasets

To understand variations in GHI at the mean annual and seasonal time-scales, variations in cloudiness or rainfall at those time-scales were assessed using two additional products.

2.3.1. COMET cloud fractional cover

The CMSAF ClOud Fractional Cover dataset from METeosat First and Second Generation (COMET, Stöckli et al., 2017) is derived from the MVIRI and SEVIRI imagers aboard geostationary Meteosat satellites (Meteosat First Generation 4 to 7 and Meteosat Second Generation 1 to 3). COMET provides Cloud Fractional Cover (CFC) in high temporal (1 hour) and spatial (0.05◦ × 0.05◦) resolution covering the period 1991–2015. In this study, we used the monthly CFC from COMET edition 1.0 extracted over the period 2005–2015

2.3.2. IMERG rainfall

The Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) product combines microwave and infrared estimates from the GPM constellation (Huffman et al., 2017). This study used the latest IMERG Version-06B, which is currently available with 0.1° spatial resolution and 30min temporal resolution. The monthly datasets used cover the same period as the GHI products, i.e., between January 2005 and December 2015, and they can be downloaded from the EARTHDATA website (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/).

3. Methods

3.1. Data quality check for GHI at the 10 weather stations

In-situ measurements are essential to evaluate precisely the quantity of solar radiation received at a specific geographical location. But it may happen that the quality of these measurements is not sufficient to be reliably used. That is why in-situ measurements must be quality checked. To that end, all GHI hourly data were passed through two tests commonly used in the literature (Long et al., 2008; Yang et al., 2018). The aim is to eliminate spurious data.

The first test (Eq II.2) discards GHI measurements which are outside the physically possible limits. The second test (Eq II.3) rejects GHI measurements which are beyond extremely rare limits.

-Physically-possible limits: $-4 < GHI < 1.5\, E_{0n}\, Z + 100$ (Eq II.2)

-Extremely-rare limits: $-2 < GHI < 1.2\, E_{0n}\, Z + 50$ (Eq II.3)

with Z denoting the zenith angle and E0n the extraterrestrial irradiance on a surface normal to the solar ray.

All hourly GHI in-situ data that failed to pass these quality checks were eliminated, which represents only 5 slots out of the 7563 slots available in total. Note that for the BSRN database, these quality checks are applied for 1min data, a temporal resolution not available within our station network.

These two tests are the most basic ones and do not rule out values that are erroneous but within the limits of what is physically possible or associated with sensor decalibration. In the studies by Urraca et al. (2017) and Tang et al. (2010), methods are proposed to detect such errors in the time series. These methods rely on the computation of confidence intervals for the former and hybrid models for the later. However, these methods require large samples of data (so that confidence intervals are robust in both time and space) and/or additional variables such as sunshine duration, two conditions that we cannot meet with the data we currently have. Therefore, it must be kept in mind through the whole paper that the in-situ data used as reference have several limitations and uncertainties.

3.2. Data pre-processing

Regarding analyses done at the monthly time-scale and for the whole Central Africa, neither FAOCLIM 2 nor the gridded products for the period 2005-2015 have any missing values.

For analyses done at the daily time-scale using data from the 10 stations in WCA, we considered at least 20 hourly observations within a day to calculate the GHI daily averages for each station, and in the case of less than 20 hourly values available, the day in question was discarded. Any day discarded from the in-situ measurements was also discarded from the gridded products.

GHI in-situ measurements or satellite estimates provided at 30min or 15min resolution (i.e. CMSAF SARAH-2 and CAMS-JADE) were upscaled to the hourly resolution to match with the hourly resolution of CERES-SYN1deg and ERA5. To calculate hourly GHI average for in-situ measurements, we took only the days with at most 8 missing values for 30min resolution data and 10 missing values for 15min resolution data. In addition, if a day meets the first condition but the missing values are consecutive, the day is discarded. If both conditions are met, the missing values are replaced with the average of the previous and the next time-slot. This approach was applied to GHI in-situ measurements and the gridded products provided at 30min or 15min resolution.

To avoid errors due to data misalignment when comparing GHI diurnal cycles, a verification of the gridded products' timestamps was made. Among the 4 products available at the hourly time-scale, only CERES-SYN1deg uses the half-hours as a timestamp, namely, 00:30, 01:30, 02:30, ... , 22:30, 23:30 (e.g., GHI during 11:00-12:00 is given with a timestamp of 11:30). Thus, to obtain the solar radiation at full hours (i.e. 00:00, 01:00, ..., 23:00) as in the other products and following the approach adopted by Yang & Bright (2020), we have calculated the average between two consecutive values: for example, the value of GHI at 11:00 is obtained by averaging those at 10:30 and 11:30. Due to this averaging, it is to be expected that the results obtained for CERES-SYN1deg will be slightly worse compared to its initial accuracy. However, as hourly values were mainly used for extracting typical diurnal cycles (Cf. section 3.4 below), this loss of accuracy is not an issue in this study. We also changed all the local time in-situ measurements to UTC. Note however that there is less than one hour difference between local time and UTC for Western Central Africa.

3.3. Measures of accuracy

Several metrics were used to evaluate the accuracy of the gridded GHI products against the in-situ measurements, namely:

- The Pearson correlation coefficient which measures the strength of the linear relationship between two variables.
- The Bias (taken as the mean error) which measures the distance between the observed and estimated values.
- The Root Mean Square Error (RMSE) which is one of the most widely used metrics for characterizing the extent of the deviations between estimated and observed values (in contrast to the bias which does not give information about the amplitude of these deviations). We also used the Bias-corrected RMSE which captures only the part of the RMSE that is not influenced by the systematic error of Bias.
- The skewness coefficient indicates the degree of skewness of a distribution. For
- normally distributed data, it should be close to zero. If it is greater than zero, it means that the tail is on the right side of the distribution and the distribution is said to be skewed to the right. If it is negative, the tail is on the left side of the distribution and the distribution is said to be skewed to the left.

3.4. Diurnal cycles' classification

Products accuracy and performance at the station scale were also assessed considering the diurnal scale. Following Philippon et al. (2019), the four main diurnal cycles of GHI which depict bright, obscure in the morning (obscure AM), obscure in the afternoon (obscure PM) and obscure days, were extracted from the 8 stations providing data at an infra-daily time-scale and from the corresponding pixel from the gridded products, using two separate K-means clusterings. This approach allows first to partly get rid of biases and more interestingly, assesses the products' capabilities at the synoptic scale, i.e. whether they detect the right weather/cloudiness conditions. Second, it also allows the time-scale interactions between the diurnal and the seasonal cycles to be taken into account. Indeed, variations in the seasonal cycle of GHI are usually seen as variations in the daily levels of GHI. With such an approach, they can also be related to and explained by variations in the frequency of typical diurnal behaviors (i.e. kind of weather types), e.g. decrease in GHI levels explained by a decrease in the frequency of bright days.

K-means is one of the existing clustering algorithms which is widely used in many applications. Its goal is to allocate a set of points into k groups (often called clusters, 4 in our case), in such a way as to minimize the sum of squares of distances from a point to the cluster. In our case, 200 runs with 4 different centroid seeds were launched and we fixed to 300 the maximum number of iterations for the K-means algorithm to allocate the day/station or day/pixel into the k (4) groups and to define the k (4) centroids.

Before applying the K-means clustering, hourly data were smoothed using a Savitsky-Golay filter to remove part of the high frequency variations contained in the diurnal cycle and linked to quick changes in the sky conditions, especially in the in-situ measurements. All data were normalized by subtracting from each station (or pixel) the daily average so that all stations (pixels) have a comparable weight.

Differences in the amplitude and phase of the four types of diurnal cycles between in-situ measurements and satellite estimates were analyzed. We also looked at the differences in the yearly frequency of the four types of diurnal cycles as well as in their frequency along the seasonal cycle.

4. Results

4.1. Products' inter-comparison for the whole Central Africa at the mean annual and mean monthly time-scales

The mean annual fields of GHI over Central Africa for FAOCLIM 2, and the 8 gridded products are presented in figure II.2 while figure II.3 provides the corresponding boxplots, allowing a better comparison of the range of GHI values between all the gridded products.

The mean annual field of GHI over Central Africa as depicted from FAOCLIM 2, (period 1961-1990, Figure II.2a) is characterized by moderate levels (~200W/m^2). It mainly pictures a marked (~40W/m^2) east-west gradient with a sharp transition by 15°E: the western

part of Central Africa is the least bright region of Central Africa, receiving less than 200W/m^2 on average. GHI levels are also slightly higher at the northernmost stations than at the southernmost ones.

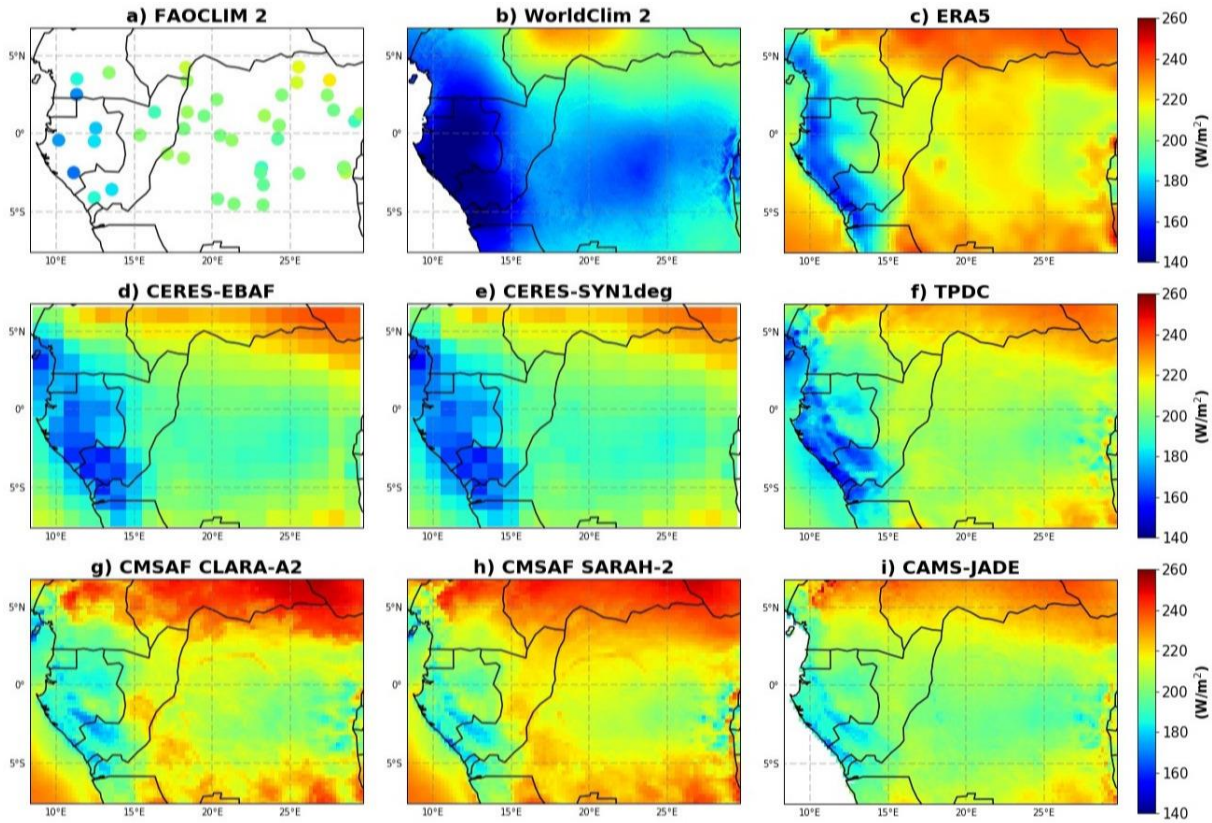

Figure II. 2 - Mean annual fields of GHI (in W/m^2) for a) FAOCLIM 2 (47 stations available) and the eight gridded products (b-i). Fields were computed for different periods according to data availability: 2005-2015 for the 6 satellite estimates plus ERA-5, 1970-2000 for WorldClim 2 and 1961-1990 for FAOCLIM 2.

WorldClim 2 (Figure II.2b) stands out with the lowest GHI levels (<180W/m^2), in particular much lower than those of FAOCLIM 2 although these latter data are used in WorldClim 2 interpolation model (Cf. section 2.1.2). Such large differences in mean annual levels cannot be only attributed to the different recording periods between the two products (1961-1990 against 1970-2000) and the effect of potential trends in GHI. The covariates used in the interpolation model as topography and average cloud cover from MODIS could also explain the biases obtained if too much weight is given to them.

Then figures II.2c-i provide GHI mean annual fields for the six satellite estimates and ERA5 reanalysis. These mean annual fields were derived for each product, by averaging the multiannual monthly data over the common period 2005-2015.

In all the six gridded products, the western part of Central Africa (SW Cameroon to SW Congo) is the least bright region of Central Africa, receiving less than 200W/m^2 on average. However, GHI levels over this region seem more realistic in CERES, TPDC and ERA5 with values mostly below 180W/m^2, than in CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2 and CAMS-

JADE, where levels are much higher, between 180 and 210W/m^2. The sharp transition to higher GHI levels by 15°E is also a feature common to all the products.

The CMSAF products display higher GHI levels in the center of the region than other products. They also picture strong meridional gradients between the center and the margins, up to 60W/m^2 with the northern margins. ERA-5 pictures both low GHI levels over WCA and strong gradients between the center and the margins. GHI levels are also higher in the center than in the other products. According to figure II.3, these latter products have the highest GHI levels, around 215-220W/m^2 on average over the whole region but also the smallest ranges, with 50% of the values (from the 25th to the 75th percentile) comprised in a 25W/m^2 range, against 40W/m^2 for the other products, CERES in particular. TDPC stands out with a mean annual field which seems the most realistic - low levels to the west as in CERES products and ERA5, moderate to higher ones to the center and the northern and southern margins as in CAMS-JADE and FAOCLIM 2 - but the largest range of values according to figure II.3.

The mean annual field of GHI can be partly explained by those of cloud fractional cover (from COMET) and rainfall (from IMERG) provided in figure II.4a-c. The low GHI levels to the west and the east match with the highest total cloud fraction (70%) and rainfall amounts (>1800mm/yr) while the high GHI levels to the north are associated with quick decreases in total cloud fraction and rainfall. However, some discrepancies are noteworthy: while total cloud fraction or rainfall levels are similar between the western and eastern parts of Central Africa, GHI levels are far lower to the west than to the east. This suggests that either the type of cloud (more opaque to the west) or the timing of cloud formation during the diurnal cycle are different between the two regions.

We also see clear topographic effects in GHI mean annual fields for the products with the highest spatial resolutions (e.g. TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2 and JADE) over the westernmost and easternmost areas:

- To the west, the NW-SE stretching bands of low GHI levels between Gabon and the Republic of Congo correspond to the windward slopes of Mount Chaillu and of the Mayombe (Figure II.1b). Philippon et al. (2022) have shown that sunshine duration is systematically dampened on these slopes as cloudiness is larger, probably due to orographic lifting.
- To the east, low GHI levels at the border with Rwanda, Burundi, Uganda correspond to the slopes of the East African rift (Figure II.1b) where deep convection preferentially develops as shown by Camberlin et al. (2019) or Soula et al. (2016). It is interesting to see that ERA5 pictures too high GHI levels suggesting that it does not capture cloudiness and convection well there.

Land cover signatures are also visible in the center of the Republic of Congo in these products: the NW/SE stretching band of high GHI levels corresponds to the Plateaux Batéké which are a large shrubland encroachment into the rainforest (Figure II.1a).

The picture of GHI at the annual scale does not inform about the evolution of GHI during the mean annual cycle. To that aim, we first computed the latitude-month evolution of GHI averaged over longitudes 8-30°E, and to understand the seasonal variations of GHI, the

corresponding latitude-month evolutions for rainfall and total cloud fractional cover. The resulting diagrams are provided in figures II.4b-d and 5.

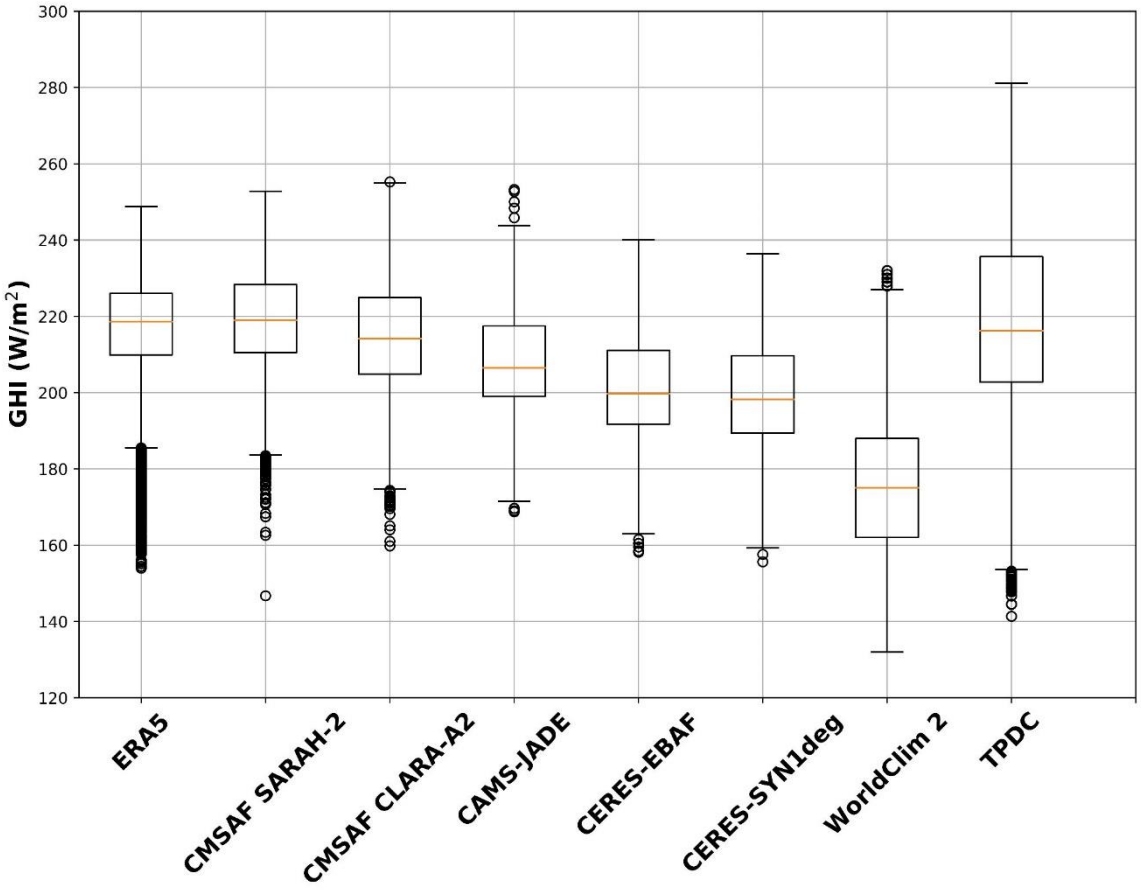

Figure II. 3 - Boxplots of the mean annual values of GHI in W/m² across Central Africa for the 8 gridded products.

Given its equatorial location, radiation maxima received at the top of the atmosphere over Central Africa are during the equinoxes, i.e. the 21st of March and 21st of September. Conversely, radiation minima received at the top of the atmosphere are during the two solstices, i.e. the 21st of June and 21st of December.

Cloudiness and rainfall mean seasonal evolution in Central Africa is driven by the annual south-north and north-south migration of the tropical rain belt (maxima in figure II.4b-d moving from 5°S to 5°N then 5°N to 5°S). Two rainy seasons, in March-May and September-November, and two dry seasons, in December-February and June-August, are recorded (Camberlin et al., 2019). They respectively correspond to the highest and lowest total cloud fraction levels although levels are lower during the March-May rainy season (60%) than during the September-November one (80%, figure II.4d).

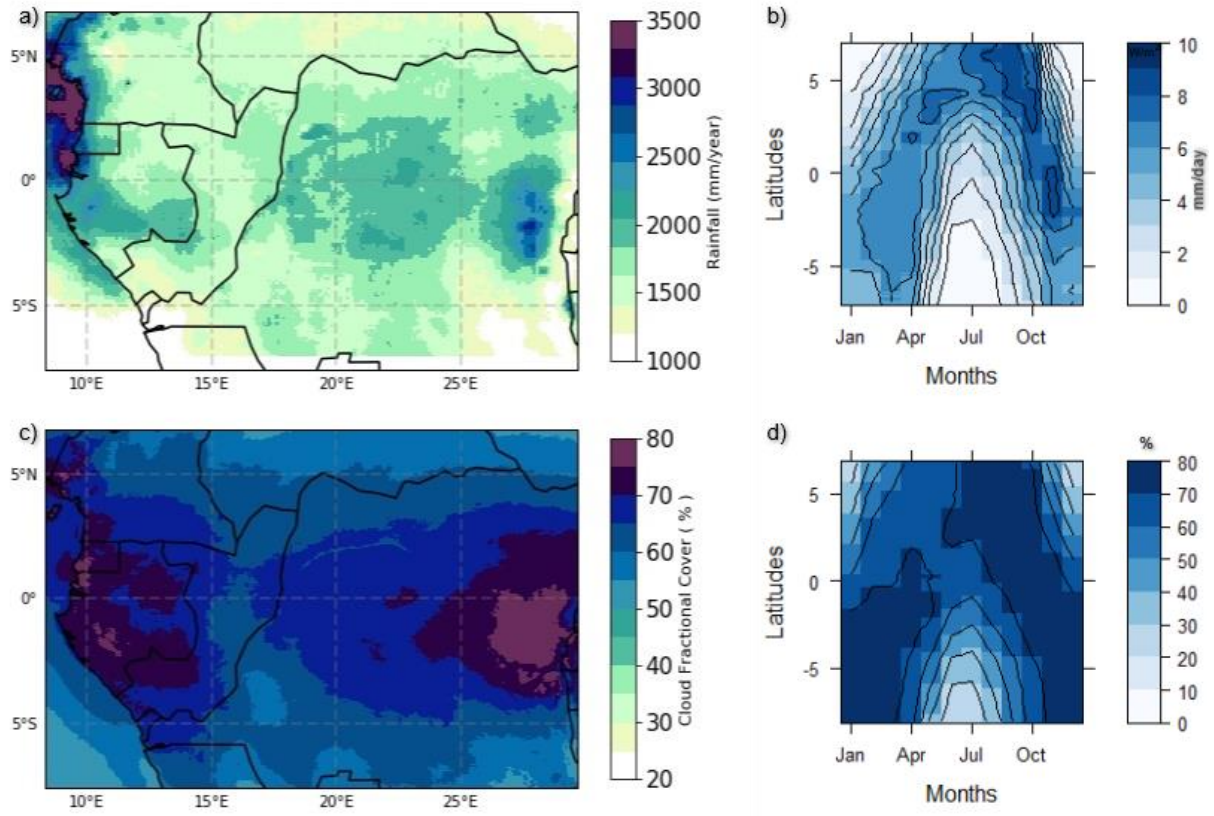

Figure II. 4 - a) Mean annual rainfall amount (in mm/year) over Central Africa and in the period 2005-2015 (from IMERG). c) Same as a) but for the cloud fractional cover (from COMET). b) Month-latitude mean evolution of rainfall computed over longitudes 8-30°E cons considering land and ocean pixels in the period 2005-2015. d) Same as b) but for cloud fractional cover.

Interestingly, whatever the product, the lowest GHI levels are not recorded during the two rainy seasons, March-May and September-November (compare figure II.5 and figure II.4b), but during the June-August dry season: GHI levels vary between 160W/m^2 for CERES products and 200W/m^2 for ERA5. Consequently, there is a disconnection between rainfall on one side, and cloudiness and GHI on the other side. Actually, the GHI minimum in June-August mainly comes from WCA (i.e. Cameroon, Gabon, Republic of Congo west of 15°E): a large non-rain-bearing low-level cloud cover develops there during this season (Dommo et al., 2018). These strato-cumulus form a compact cover (octas range generally between 6 and 8) which lasts all day and filters incoming solar radiation more strongly than rain-bearing clouds such as cumulonimbus, which are more intermittent in space and time (and also more easily detected by satellites).

Conversely, the highest GHI levels (>240W/m^2) are recorded in December-February north of 3°N, beyond the rainforest area (Figure II.1). It corresponds to the main dry season there, with daily rainfall values below 3 mm and a total cloud fractional cover below 40%. Differences observed in figure II.2 between the mean annual GHI in CERES and CMSAF products mainly originate from large differences during the December-February and June-August dry seasons: they are much brighter in CMSAF SARAH-2 and CLARA-A2 than in the CERES products (by about 20W/m^2).

Secondly, GHI mean seasonal cycles were calculated for 6 eco-climatic regions: the SW Gabon, Cameroon, the West and East margins, the North, Center and South DRC (locations provided in figure B.1). These 6 regions documenting forested areas of Central Africa only (roughly located between 4.5°S and 3.5°N) were shown by Philippon et al. (2019) to have distinct GHI seasonal cycles and to host forests with distinct traits. These mean seasonal cycles are computed from FAOCLIM 2 by averaging the stations falling within each sub-region. For the 8 gridded products, they are computed by averaging the grid-points corresponding to FAOCLIM 2 stations for each sub-region. They are displayed in figure II.6. Note that, as previously discussed for figures II.2 and II.5, the time period used to compute the mean seasonal cycles in FAOCLIM 2 and WorldClim 2 do not overlap with the gridded products.

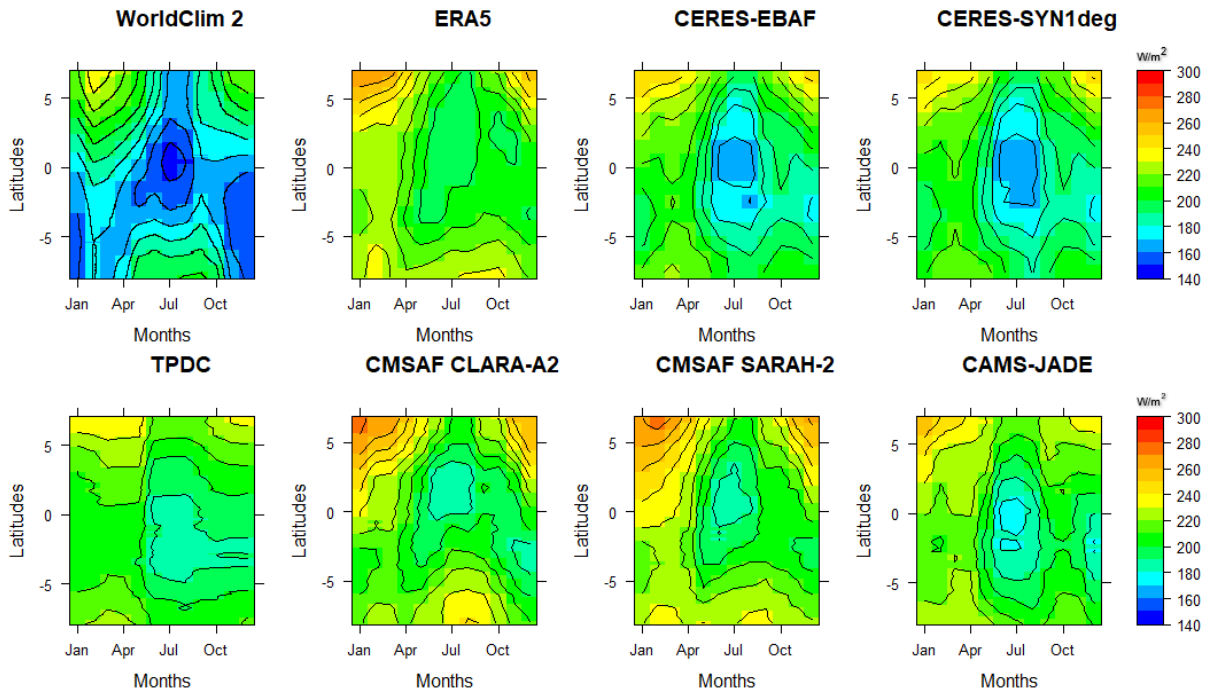

Figure II. 5 - Mean evolution of GHI (in W/m^2) across latitudes (8°S-7°N, y-axis) and months (January to December, x-axis) for the 6 satellite estimates plus ERA-5 (2005-2015) and WorldClim 2 (1970-2019). Data are averaged over the longitudes 8°-30°E considering land and ocean pixels for all products but JADE and WorldClim 2.

Secondly, GHI mean seasonal cycles were calculated for 6 eco-climatic regions: the SW Gabon, Cameroon, the West and East margins, the North, Center and South DRC (locations provided in figure B.1). These 6 regions documenting forested areas of Central Africa only (roughly located between 4.5°S and 3.5°N) were shown by Philippon et al. (2019) to have distinct GHI seasonal cycles and to host forests with distinct traits. These mean seasonal cycles are computed from FAOCLIM 2 by averaging the stations falling within each sub-region. For the 8 gridded products, they are computed by averaging the grid-points corresponding to FAOCLIM 2 stations for each sub-region. They are displayed in figure II.6. Note that, as previously discussed for figures II.2 and II.5, the time period used to compute the mean seasonal cycles in FAOCLIM 2 and WorldClim 2 do not overlap with the gridded products.

Consistently with figure II.5 (from 4.5°S to 3.5°N), most sub-regions picture a bimodal seasonal cycle in most products. The two GHI maxima are in March-May and September-November, corresponding to the two rainy seasons. The main GHI minimum is in June-August and the secondary one is in December-January; both correspond to the two dry seasons. The Cameroon and SW Gabon sub-regions to the west have seasonal cycles of larger amplitude (>40W/m^2) than the 4 other sub-regions. For South DRC, there are discrepancies in the phase of the GHI minimum: it occurs in May in FAOCLIM 2, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2 and ERA5, in August in CERES products and CAMS-JADE and in December in WorldClim 2 and TPDC. This latter product shows a cycle that is mostly flat with a relatively small amplitude of ~13W/m^2.

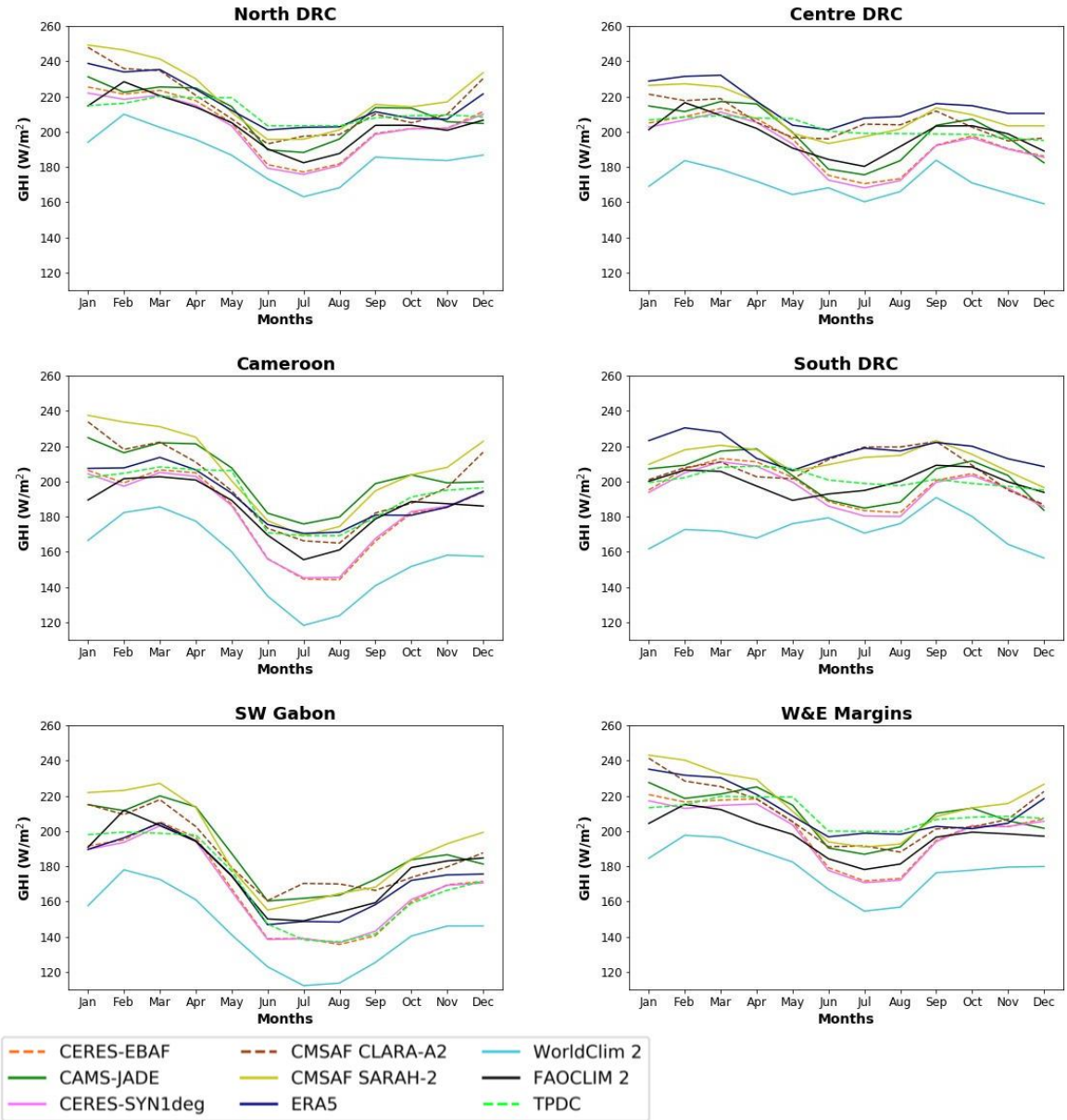

Figure II. 6 - Mean seasonal cycles of GHI for 6 eco-climatic regions (locations provided in figure B.1) computed from FAOCLIM 2 and the eight gridded products. The periods retained for computation are 2005-2015 for the 6 satellite estimates plus ERA5, 1961-1990 for FAOCLIM 2 and 1971-2000 for WorldClim 2.

4.2. Products' validation and inter-comparison for Western Central Africa

The focus is now put on Western Central Africa (WCA) which is the densest populated area of Central Africa and where solar energy supply might be of importance for remote / off-grid locations. It is also the one which shelters the densest evergreen forests of Central Africa because of a cloudy June-August dry season which limits GHI and thus evapotranspiration (Philippon et al., 2019). Thanks to different initiatives (Cf section 2.1.2) we had access to a few in-situ measurements of GHI at either daily or sub-daily resolution for 10 stations located in Cameroon, Gabon, the Republic of Congo and the Democratic Republic of Congo (Figure II.1a). They fall within the "Cameroon", "SW Gabon", and "East and West margins" eco-climatic regions analyzed in the previous section (figure II.6 and figure B1). These measurements are used to validate and inter-compare CERES-SYN1deg, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2, CAMS-JADE and ERA5 which are the 5 products providing data for the recent years documented by stations. Note that given CERES-SYN1deg 1°× 1° coarse spatial resolution, the stations of Mfou and Edea which are close to each other fall within the same pixel for that product. However, the two stations were not operating at the same time periods, so that results are not redundant. Remember also that the 10 stations have different recording periods (Cf. Table II.1, e.g. 2004-2008 for Nsimi, 2020 only for Edea …) so that for some stations we barely sample a full annual cycle, which makes the results less robust.

4.2.1. Daily time-scale and mean seasonal cycles

As a first step towards the validation and inter-comparison of products for Western Central Africa, we computed the frequency distribution of daily GHI data for each of the ten stations and compared them with distributions computed from each gridded product. These distributions are presented in figure II.7 for each station separately and for all the stations together in figure B2. The corresponding skewness coefficients of the distributions are provided in table II.3. Note that the number of days used for computation differs for each station, from 337 days at Edea (less than a full year of data) to 1760 days at Mokabi (almost 5 years of data).

For the in-situ measurements (gray bars), we observe that the distributions of GHI daily values depict subtle differences across stations, which illustrates the North-East / South-West gradient observed in the mean annual fields of GHI in figure II.2.

Tchizamalou and Kissoko in the South of the Republic of Congo have the broadest distributions: most daily GHI levels fall within the range 70-190W/m^2. All the products strongly underestimate the frequency of days with GHI levels below 100W/m^2. CERES and ERA5 in particular picture too narrow distributions. Lekedi and Lopé in Gabon also picture broad and flat distributions that are not well reproduced by most products: ERA5 depicts too narrow distributions while CMSAF SARAH-2 and CLARA-A2 picture too many high GHI days. These 4 stations (Nsimi excluded) are the "darkest" of the 10 stations analyzed.

To the opposite are Pokola, Mokabi and Mbandaka with distributions slightly skewed to the left in in-situ measurements (peak of frequency for bins 160-220W/m^2) indicating that they are the brightest. The products also show the same distribution at the latter three stations: CMSAF SARAH-2 and CAMS-JADE have skewness coefficients ranging from -1.02 to 0.05,

-0.72 to 0.12 and from -0.97 to 0.15, respectively. However, products give too many high GHI days (>220W/m^2), especially CMSAF SARAH-2 and CLARA-A2.

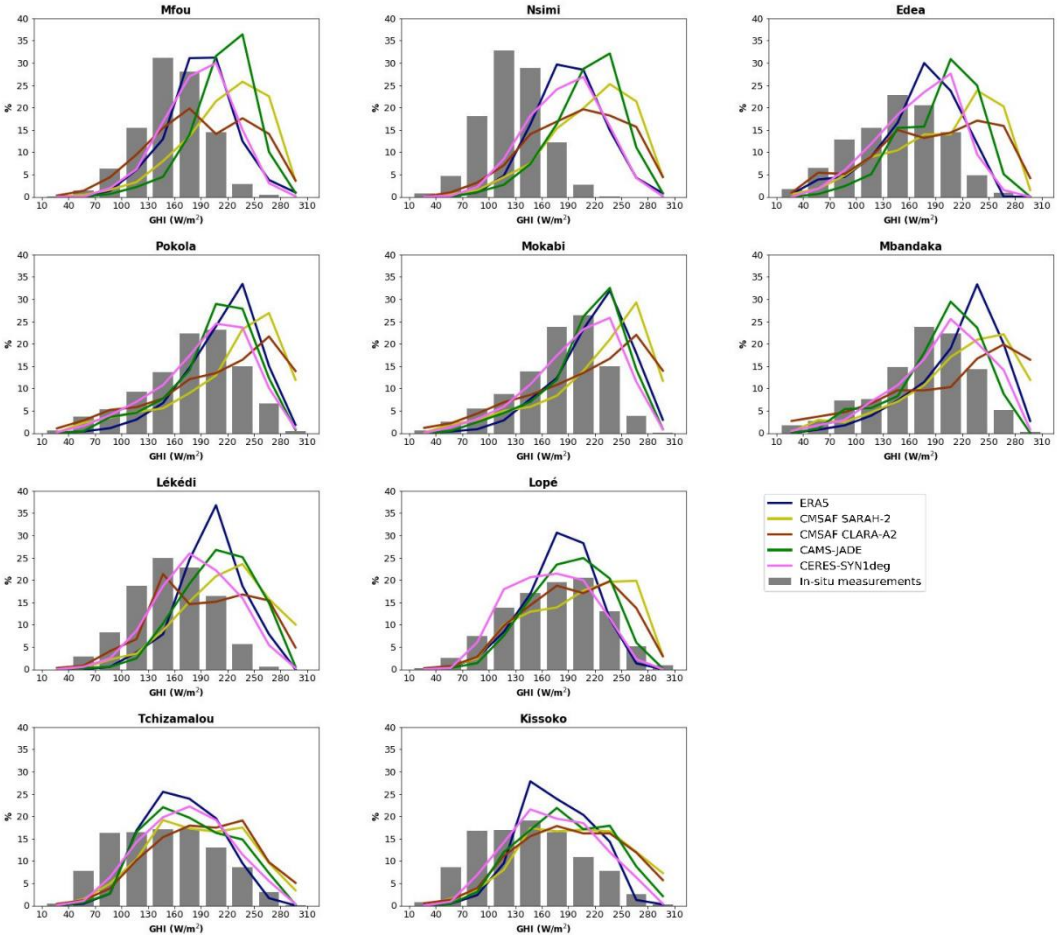

Figure II. 7 - Frequency distributions of daily GHI values at the 10 stations (gray bars) and the corresponding pixel in the 5 gridded products retained (colored curves). Note that the days used for computations are not strictly the same between the 5 products as they have different recording periods (Cf Table II.2). The y-axis represents the percentage of days. The x-axis represents GHI bins from 10 to 310W/m^2 with a 30W/m^2 step. Skewness coefficients for the gridded products are provided in table II.3.

Cameroonian stations picture narrower distributions and most products overestimate daily GHI levels as pictured by large differences in skewness coefficients with stations: Edea and Mfou have skewness coefficients varying from -0.83 to -0.35 and from -0.88 to -0.18, respectively.

Nsimi, and compared to these two latter stations, stands out with the distribution the most strongly skewed to the right (peak of frequency for bin 110-130W/m^2). The skewness coefficient at this station is 0.01 in in-situ measurements and between -0.72 and -0.02 in the products. Actually, this station is located in a steep and forested watershed. Such low GHI levels suggest a potential shading of the station by trees and topography.

To refine the previous assessment and check for potential variations in performance over the annual cycle, we examined the average seasonal cycles of GHI as observed at the ten

stations and as estimated by the five gridded products (not shown). In agreement with results presented in section 4.1 for the "SW Gabon", "Cameroon" and "West and East margins" eco-climatic regions, all stations picture a bimodal cycle with GHI maxima in March-April (the highest) and November, and GHI minima in July-August (the lowest) and December-January. On average GHI varies between 120 and 200W/m^2. The Gabonese stations (Lopé and Lékédi) have the seasonal cycles with the largest amplitude. The quite low GHI levels for Nsimi pointed out in figure II.7, appear clearly, especially when compared to the two other Cameroonian stations.

Table II. 3 - Skewness coefficients for in-situ measurements and the gridded products at the 10 stations.

	In-situ measurements	CAMS-JADE	CERES-SYN1deg	CMSAF SARAH-2	ERA5	CMSAF CLARA-A2
Edea	-0.16	-0.73	-0.37	-0.65	-0.83	-0.35
Kissoko	0.21	0.05	0.04	-0.05	0	-0.12
Lekedi	-0.03	-0.42	-0.13	-0.39	-0.37	-0.17
Mbandaka	-0.59	-0.79	-0.73	-0.88	-1.01	-0.72
Mfou	-0.2	-0.88	-0.33	-0.71	-0.29	-0.18
Mokabi	-0.65	-0.97	-0.68	-1.02	-0.8	-0.7
Pokola	-0.53	-0.88	-0.65	-1.02	-0.87	-0.71
Tchizamalou	0.14	0.15	-0.01	-0.06	0.07	-0.17
Nsimi	0.01	-0.72	-0.21	-0.68	-0.02	-0.31
Lope	-0.11	-0.28	0.02	-0.41	-0.49	-0.28

Generally, the 5 products overestimate GHI levels throughout the whole seasonal cycle at the stations (Figure II.8 and Table 4II.): most biases are positive, varying between ~20 and 60W/m^2 on average. An exception is CERES-SYN1deg for Lopé with a negative bias of -3W/m^2 on average (Table II.4). GHI underestimation reaches 25W/m^2 during the September-November rainy season. As observed for the 6 eco-climatic regions (Figure II.6), CMSAF SARAH-2 and CLARA-A2 overestimate the most GHI, with biases almost always above 30W/m^2. Overestimations are particularly large in June-September for stations in Gabon and the southwest Republic of Congo (40-70W/m^2), and in December-February for stations in Cameroon and the northern Republic of Congo (70-100W/m^2).

In terms of correlations (Table II.4), ERA5 shows the worst ones, always below 0.43. The seasonal cycles in this product are too flat due to an overestimation of June-August GHI levels (Figure II.8). The overestimation of GHI in June-August, also apparent at a larger scale in figures II.4 and II.5 might indicate that the low-level clouds which are observed over WCA during that season are not well reproduced in ERA5 which translates into too high GHI levels. For CMSAF CLARA-A2 most correlations are below 0.7 except for Lopé, Tchizamalou and Kissoko. For all the other products (CMSAF SARAH-2, CAMS-JADE and CERES-SYN1deg), most correlations are above 0.8, independently to the sample size.

4.2.2. Products' ability to reproduce the diurnal cycles of GHI

Due to the significant variations of GHI during the day, it is important to evaluate the performance of products on a sub-day time-scale, and assess their ability to reproduce GHI diurnal cycles. To that aim, we retained CERES-SYN1deg, CMSAF-SARAH-2, JADE and ERA5 gridded products, and the stations of Mfou, Edea, Pokola, Mokabi, Lékédi, Mandaka, Tchizamalou and Kissoko which are the only products / stations to provide GHI data at sub-daily time-scale. GHI data from these four products and eight stations were up-scaled, when necessary, to the common hourly time-resolution (see section 3.2). As for the analyses at the daily time-scale, we also ensured that the in-situ records and the satellite estimates for each station/pixel cover the same time period.

The diurnal cycles obtained from the two K-means clusterings (Cf. section 3.4) applied respectively to the stations and the gridded products are given in figure II.9. The four types of diurnal cycles extracted depict obscure days ('Obscure'), days obscure in the morning ('Obs. AM'), days obscure in the afternoon ('Obs. PM') and bright days ('Bright'), in agreement with the diurnal cycles obtained by Philippon et al. (2019) for the whole Central Africa. These four types of days respectively represent 23.1, 28.2, 19.8 and 28.9% of the days at the stations, and 21.8, 31.3, 15.3 and 31.7% of the days in the gridded products. They are represented as black curves for stations (with the 1 std envelope as shading) and as colored curves for the gridded products (with the same colors as in figures II.6-8).

Consistently with results at the annual and daily time-scales, the positive bias observed in products is transcribed at the sub-daily scale as a bias in the amplitude of the diurnal cycles. It is noticeable that Obscure and Obs. PM days are the ones for which products display the largest biases (>100W/m^2) with GHI levels out of the range of variation of the in-situ measurements between 10AM and 1PM. The 4 types of days have very close shapes between products, except the Obscure type for which CMSAF SARAH-2 stands out, being closer to in-situ measurements. The good performance of CMSAF SARAH-2 for low GHI levels was not obvious in daily GHI levels distributions presented in figure II.7. Conversely, CMSAF SARAH-2 is the product displaying the largest biases for the Bright days. Lastly, the products strongly overestimate GHI levels for the Obs. AM days before 1PM so that this type is more like a modulation in amplitude of the Bright type than a type potentially associated with morning cloudiness (either deep convective or stratiform clouds as encountered over the region).

Figure II.10 shows the yearly frequency of occurrence (in percentage) of the four types of days for each of the eight stations and the four products retained. It is obvious from this figure that the eight stations evolve under different climates in terms of diurnal cycles of GHI and that some products somewhat struggle to properly represent the frequency of the 4 types of days.

Table II. 4 - Skill scores of daily GHI at the 10 meteorological stations. Correlation coefficient (R), mean Bias and the Bias-corrected Root Mean Square Error (RMSE). All correlations are significant at 0.05 level. The Skill scores of hourly GHI are provided in table B.1).

	CAMS-JADE	CERES-SYN1deg	CMSAF SARAH-2	ERA5	CMSAF CLARA-A2
R					
Edea	0.88	0.83	0.88	0.37	0.68
Kissoko	0.87	0.84	0.9	0.42	0.86
Lekedi	0.9	0.86	0.92	0.37	0.61
Mbandaka	0.92	0.88	0.91	0.37	0.65
Mfou	0.84	0.65	0.82	0.32	0.59
Mokabi	0.92	0.89	0.92	0.41	0.76
Pokola	0.9	0.89	0.88	0.43	0.72
Tchizamalou	0.87	0.56	0.92	0.39	0.82
Nsimi	0.75	0.75	0.73	0.24	0.69
Lope	0.86	0.86	0.89	0.33	0.81
Bias (W/m^2)					
Edea	48.1	25.3	53.1	25.6	41.2
Kissoko	33.5	29.4	53.5	31.8	48.5
Lekedi	52.8	29.1	60.3	45.2	40
Mbandaka	19.9	22.4	41.5	40.4	32.5
Mfou	58	29.6	59.9	33.1	35.9
Mokabi	31.9	20.9	45.7	38.2	34.1
Pokola	26.6	16.7	43.7	35.2	32.3
Tchizamalou	28.6	24.1	38.2	20.1	40.7
Nsimi	85	60.4	90.6	65.2	76.1
Lope	19.7	-3	31.7	7.4	24.9
Bias-corrected RMSE (W/m^2)					
Edea	24.2	28.3	27.5	53.6	48.3
Kissoko	28.1	30.5	25.9	53.2	30.7
Lekedi	19.4	23.1	20.0	44.6	45.5
Mbandaka	20.7	26.2	24.6	56.4	56.0
Mfou	20.1	31.0	26.6	43.2	45.9
Mokabi	19.4	23.2	23.4	50.2	42.7
Pokola	23.2	24.7	28.4	51.1	47.0
Tchizamalou	27.2	49.6	22.9	54.8	33.5
Nsimi	25.9	27.5	32.7	44.3	39.1
Lope	27.0	26.8	25.3	53.6	33.1

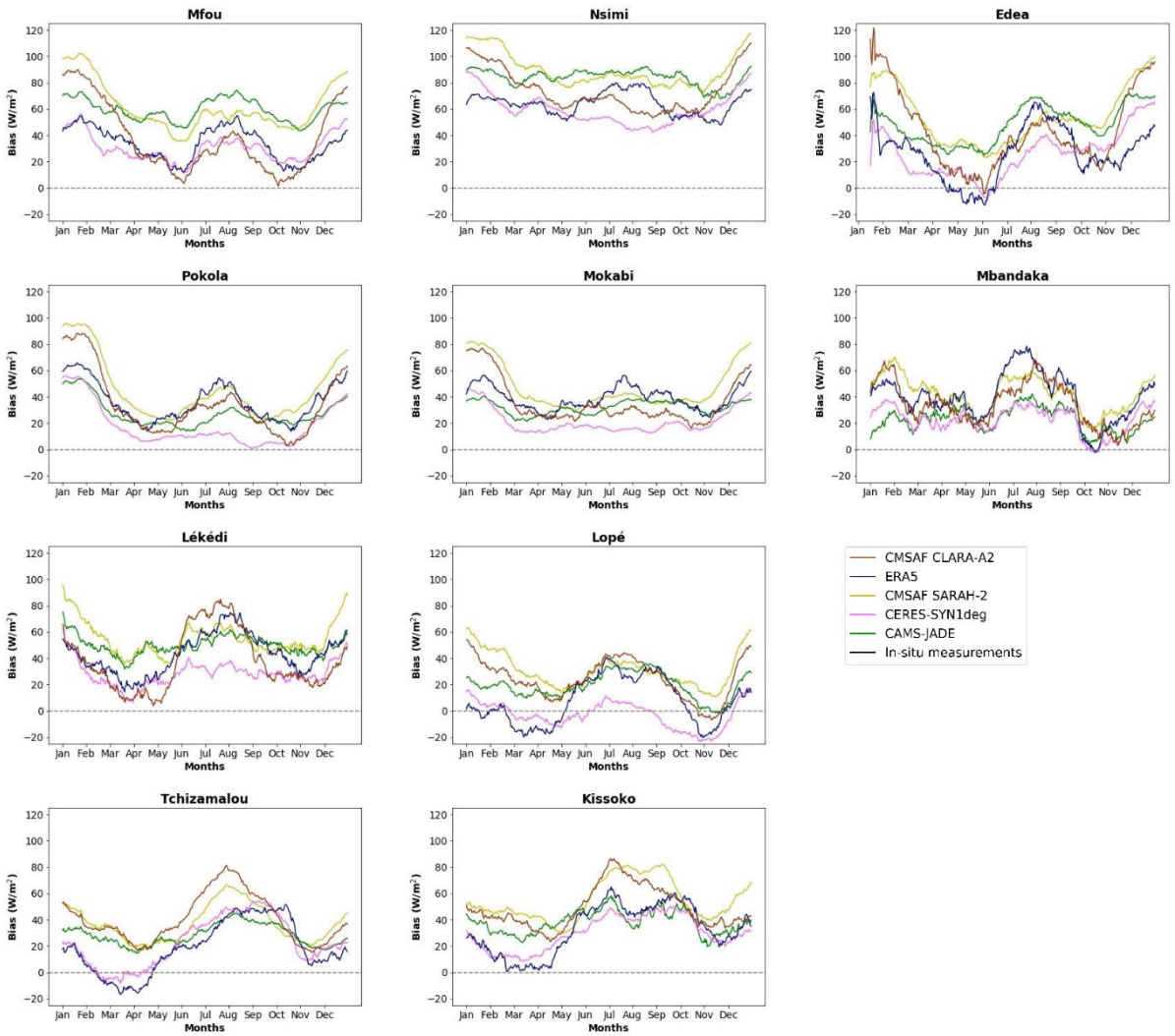

Figure II. 8 - Mean annual cycle of GHI mean bias at the ten stations (black curves, ordered from Cameroon to the South Republic of Congo) and for the respective pixels from the five gridded products retained (same color as in figure II.6) computed from mean daily values. A 30-day running average is applied to filter out high frequency variations.

At Mfou and Edea (Cameroon), Lékédi (Gabon) Mbandaka (DRC) and Tchizamalou (south of the Republic of Congo, Figure II.10), Obs. AM days are the most frequent (35% - 65%). Most products, except CMSAF SARAH-2 and CAMS-JADE to a lesser extent, detect too many of these days at Mfou, Edea and Tchizamalou. Conversely, for these 5 stations the satellite estimates strongly overestimate the frequency of Bright days, especially CMSAF SARAH-2. This is coherent with the negatively skewed distribution of GHI daily values pictured in figure II.7.

At Pokola and Mokabi in the north of the Republic of Congo, Bright (~45%) and Obs. PM days (~28%) dominate, while in the south (Kissoko), it is the Obscure days (~40%). Satellite estimates reproduce these occurrences well, especially for Mokabi and Kissoko.

ERA5 is the product depicting the greatest disagreement with stations. This suggests that the cloud cover temporality along the diurnal cycle is partly incorrect in ERA5.

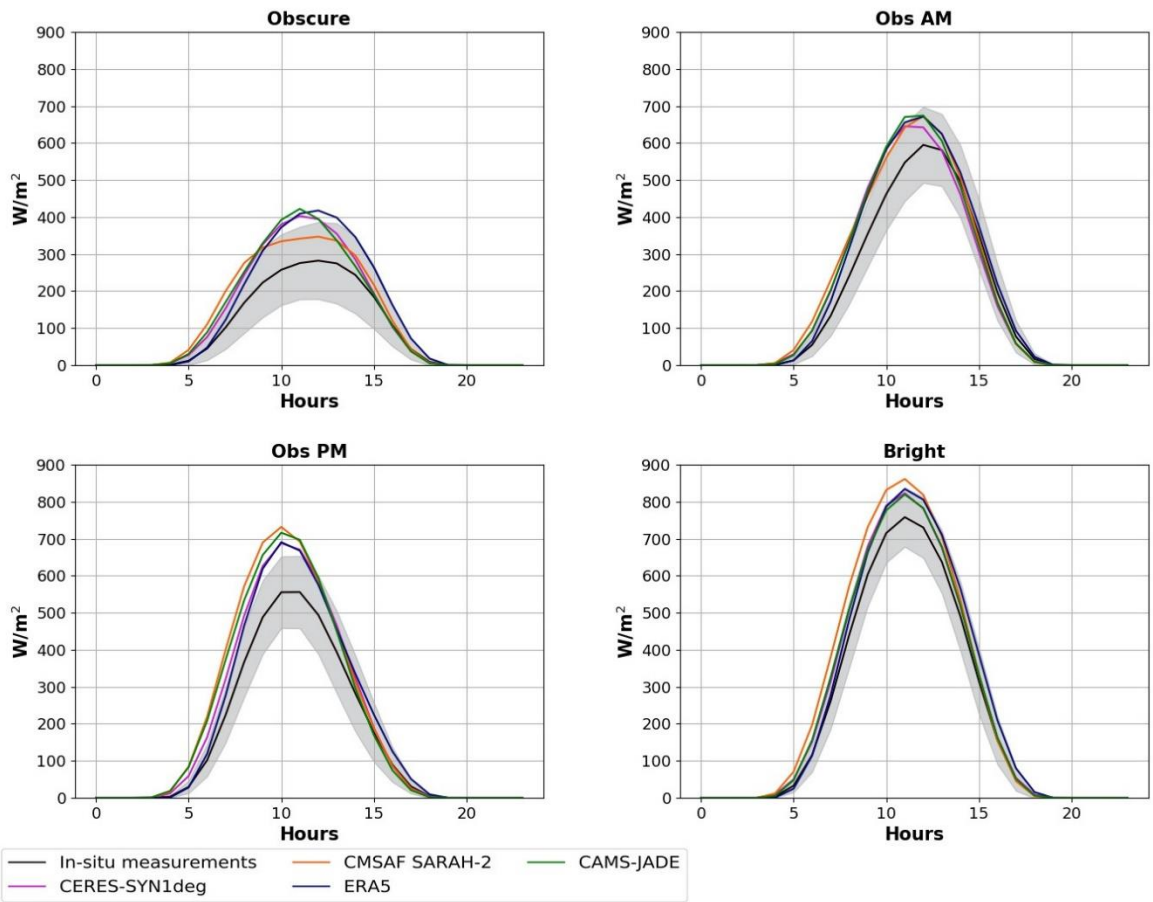

Figure II. 9 - Comparison between the four types of diurnal cycles of GHI (Obscure, Obs AM, Obs PM and Bright) extracted thanks to two K-means clusterings applied separately to the eight stations retained (black curves) and the 4 gridded products (colored curves) retained. The gray shading corresponds to the variance envelope (+/- 1 std) of the measurements at the stations.

Figure II.11 is an illustration of the evolution of the frequency of occurrence of the four types of days in the course of the year for two stations having different "GHI climates": Mokabi and Kissoko in northern and southern Congo respectively (Figure II.1a). This latter figure was constructed as follows: for each station and each day, we calculated the frequency of occurrence of each type of day over all the available years within the interval [x-5 days; x+4 days], i.e. a 10-day moving window. The total frequency of the 4 types of days for a given day equals 100%. Correlations between these frequencies of occurrence shown by in-situ measurements and those of the gridded products are provided in table B.2.

At Mokabi (Figure II.11, left top panel), the months of December-March are the most sunny (60% of Bright days). Then in May-June, the Obs. PM days frequency steadily increases as well as the Obscure days one (but to a lesser extent), so that "cloudy" days dominate in July-August (~70%). Then their frequency slowly decreases till January.

CAMS-JADE is the product that best reproduces this behavior. CMSAF SARAH-2 shows a too late and too rapid decrease of Obs. PM days in November, and too many Bright days in December-February. CERES displays too many Obscure and Obs. AM days in June-

August. Lastly, whereas the temporality of Bright and Obscure days is correct in ERA5, nor the temporality and frequencies of Obs. AM and Obs. PM days are realistic. This agrees with the low correlations obtained for that product in table II.4.

Kissoko (Figure II.11, right top panel) is far less sunny than Mokabi (figures II.6-7). This is because the station experiences a few Bright days, whereas Obscure and Obs. AM days represent between 40% (in March) and 80% of the days (in May-October).

Again, CAMS-JADE best reproduces the seasonal evolution of the four types of days. CMSAF SARAH-2 has too many Bright days in December-March. CERES has too many Obs. AM days and too few Obscure days in May-October, the cloudy dry season. ERA5 which underestimates the frequency of the Bright and the Obs. PM days for this station, is conversely the best product at reproducing the temporality of the Obscure days.

5. Discussion

Surface Solar Radiation data from 6 satellite estimates, including CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2 and CAMS-JADE, as well as WorldClim 2 and ERA5 reanalyses, were analyzed for the first time for Central Africa. The aim was to provide useful information on (i) global horizontal irradiance (GHI) mean spatial and temporal variations over the region and (ii) the products' ability to reproduce these variations.

To achieve the aforementioned objectives, these products were first compared between them and with the FAOCLIM 2 station-based estimations (47 stations available for Central Africa), then to original GHI in-situ measurements issued from ten weather stations located in the western part of Central Africa. Comparisons were made at different time-scales, spanning from the annual to diurnal time-scales according to the temporal resolution and recording period of each product.

The analysis revealed important differences across the products in the estimation of GHI over the region. At the annual time-scale, the mean spatial patterns of GHI are consistent across all the products. The Atlantic coast of Central Africa receives the least amount of solar radiation whatever the product. However, mean GHI levels for this sub-region can vary from 140W/m^2 for the two CERES products and ERA5, to 230W/m^2 for the two CMSAF products and CAMS-JADE. The TPDC product displays the most realistic mean annual GHI pattern with both low levels (comparable to ERA5 and CERES products) to the west and moderate levels (comparable to CAMS-JADE and CMSAF products) to the center. WorldClim 2 displays unrealistic low GHI levels, on average 40W/m^2 lower than the other products.

The mean annual cycles of GHI computed for six representative sub-regions, from FAOCLIM 2 and the gridded products, display a maximum in February-March and a minimum in July-August. The least agreement between products is for the Center and South DRC regions where the amplitude of the annual cycle is less. The CMSAF estimates consistently show higher GHI levels compared to the other products, especially in December-February, the boreal sunny dry season, and for the subregions located north of the equator. Conversely, the CERES

products tend to have lower GHI levels, especially in July-August, the austral cloudy dry season.

Comparisons with measurements available at ten weather stations in the western part of Central Africa are used to assess the performance of the products from daily to sub-daily time-scales.

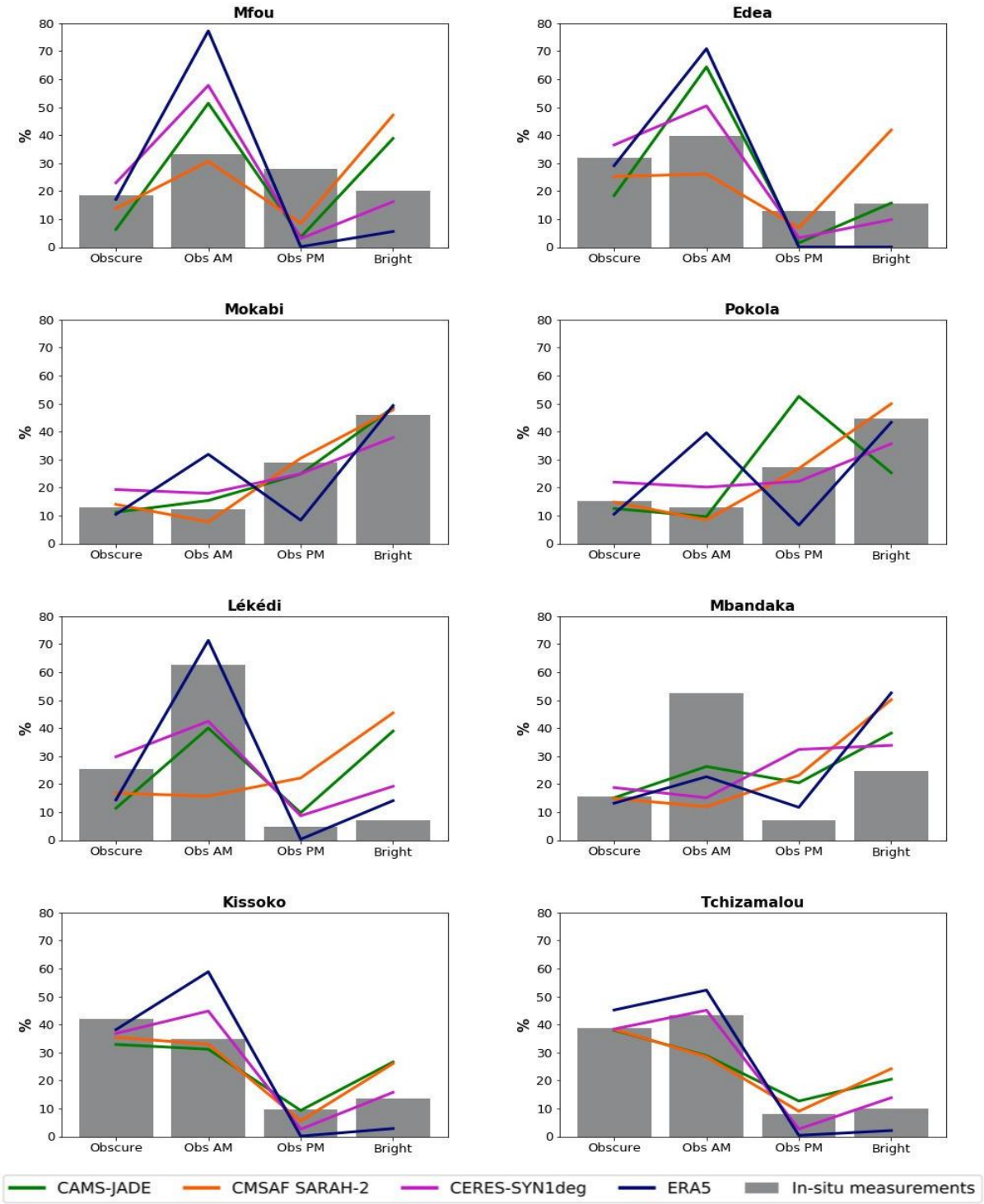

Figure II. 10 - Frequency of occurrence (in percentage) of the four types of days for both in-situ measurements (gray bars) and products (colored curves).

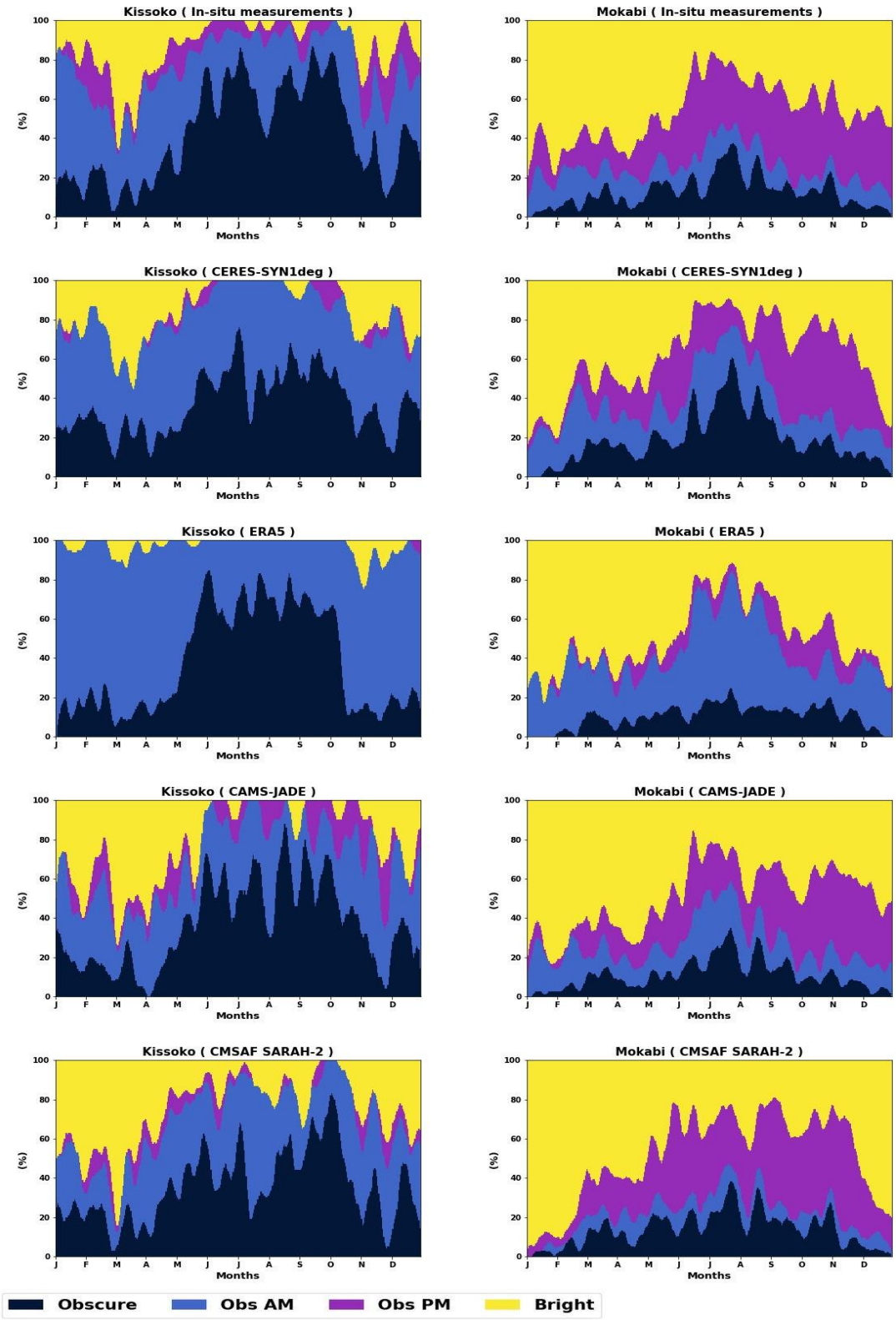

Figure II. 11 - Daily frequency of occurrence (in percentage) of the 4 types of days (Obscure, Obs. AM, Obs. PM and Bright) across the annual cycle at Mokabi (1760 days available; left column) and Kissoko (803 days available; right column). The total frequency of the 4 types of days for a given day equals 100%.

The 4 satellite estimates available reproduce well the mean annual cycle of GHI at the ten stations: correlations are significant, most often above 0.7, with the highest correlations for CMSAF SARAH-2 and CAMS-JADE. However, they all overestimate GHI levels throughout the whole annual cycle. Accordingly with results obtained at the monthly time-scale, the largest overestimations are in June-September at stations in Gabon and the southwestern Republic of Congo, and in December-February at stations in Cameroon and the northern Republic of Congo. In CMSAF SARAH-2, biases are almost always above 30W/m^2.

The biases observed, especially in CMSAF SARAH-2, do not necessarily indicate a poor performance of the products themselves. Rather, they may also be partly due to the quality of the in-situ measurements. The small number of stations, the brevity of recordings, the lack of exhaustive information on the sensors' monitoring prevent the application of state-of-the-art data quality checks. While it's not possible to attribute the observed biases solely to the performance of CMSAF SARAH-2, they can provide valuable insight into its performance compared to other products. For instance, from the annual to the daily time-scale, CMSAF SARAH-2 showed higher GHI levels than the other products.

ERA5 struggles to reproduce GHI seasonality at the ten stations: the mean annual cycles picture a too weak amplitude, with GHI levels strongly overestimated during the June-September dry cloudy season. Such a poor performance is also observed when the inter- and intra-annual variations of daily GHI are considered for each month independently.

The overestimations observed come from a twofold problem in all the satellite estimates, however less acute in CERES-SYN1deg: there are too many days with high GHI and not enough days with low GHI.

The product's performance at the sub-daily time-scale was then assessed for eight stations considering the four main types of GHI diurnal cycle, depicting Obscure, Obscure AM, Obscure PM and Bright days. The products properly reproduce the shape of the four types of diurnal cycles, but their amplitude is generally too large, especially for the Obscure AM and Obscure PM days. The frequency of the four types of days varies at each station: stations in the North of the Republic of Congo record more Bright days while stations in Gabon and in the South of the Republic of Congo record more Obscure AM or Obscure days, in agreement with the mean annual levels. However, disparities across stations in the 4 types of day frequencies are not well captured by the products: in ERA5 for instance, there are too many Obscure AM days. Lastly, the frequency of the four types of days in the course of the year in both observations and the products is shown for two stations, Mokabi and Kissoko. CAMS-JADE best reproduces the frequencies' evolution observed at the two stations.

From the long (annual) to the short (sub-daily and daily) time-scales, cloud variations are a main driver of variations in surface solar radiation. We can see the consistency between the mean annual fields of cloud fraction (COMET 2005-2015, Figure II.3c) and GHI (notably with CMSAF SARAH-2 as the two products are derived from the same imaging sensors; Figure II.2h). We can also see the consistency in the seasonal cycles (figure II.4d vs. figure II.5).

In all the satellite-derived products described in this paper, the accuracy of the retrieved GHI then depends on the accuracy of the cloud detection and discrimination. In

addition, sampling errors can occur in the estimation of daily GHI due to the orbits of the different satellites. In CMSAF SARAH-2, CAMS-JADE, cloudiness information is derived at high (30-min or 1-hr) frequency from observations made by geostationary-orbiting satellites. In contrast, CMSAF CLARA-A2 daily GHI can be subject to errors originating from the under-sampling of the cloudiness diurnal cycle due to the limited number of observations within a day in polar (morning and afternoon) orbits (even if the use of two observations of approximately 12 hours apart, can substantially reduce the bias in the daily cloud fraction cover estimate according to Bojanowski and Musiał (2020)).

Because of its high spatial resolution, up to 1km, WorldClim 2 is one of the most commonly used datasets in biogeography and ecological studies (Ocon et al., 2021). GHI in particular is a key component for computing evapotranspiration, and with rainfall a key parameter for tropical forests functioning (Yang et al., 2021). Our study suggests that GHI data from WorldClim 2 should not be used for Central Africa as they would lead to a large underestimation of the water demand and light availability for forests.

The ERA5 reanalysis are less well correlated with in-situ measurements as compared to satellite estimates. They also strongly overestimate the frequency of obscure AM days suggesting that the phase of cloudiness in ERA5 during the diurnal cycle is not realistic for the region. These findings are in line with the results by Yang & Bright (2020) at global scale. These authors also observe that satellite products perform better than reanalysis. Trolliet et al. (2018), who also inter-compared gridded products to in-situ measurements for the Equatorial Atlantic, noticed that ERA5 often reports cloud-free conditions while the actual conditions are cloudy and conversely, leading to GHI over- and underestimations which are compensated by low biases. These authors also found that an important part of the variability in the optical state of the atmosphere is not captured by the reanalysis. That is somewhat expected because GHI in ERA5 is computed from a Radiative Transfer Model (RTM) simulating the atmospheric attenuation of solar radiation, therefore less reliable because it does not include other atmospheric information (cf section 2.2.5).

The positive biases observed in CMSAF SARAH-2 GHI are consistent with those observed by Philippon et al. (2022) for the same region and CMSAF SARAH-2 sunshine duration. These overestimations might be related to aerosols and cloud properties (cloud cover and optical depth), and their representation in the CMSAF algorithm. During the June-August dry season, the overestimation might be caused by the large low-level cloud cover which is not properly detected by the Meteosat satellites. The study by Dommo et al. (2018) suggests that the low-level cloud frequency of occurrence is underestimated in Meteosat retrievals. During the December-February dry season (under clear-sky conditions), the GHI overestimation in CMSAF (as compared to CERES) might be related to an inappropriate estimation of the aerosol load and properties. Indeed, CMSAF SARAH-2 and CLARA-A2 algorithms are based on a monthly aerosol climatology while CERES-SYN1deg uses hourly diurnal information on aerosol properties (and water vapor quantity). For instance, Drame et al. (2015) have shown for the same season and two stations located in West Africa that the larger the inaccuracy in the representation of aerosols, the larger the bias in GHI estimation: by taking into account daily variations in aerosol load and composition, they could decrease bias by ~50% as compared to

using static aerosol properties. At coastal stations (e.g. Kissoko and Tchizamalou), the GHI estimation might also be affected by sea-salt aerosols from the close Atlantic Ocean.

6. Conclusion

This study evaluated for the first time for Central Africa the performance of 8 gridded solar radiation products against in-situ measurements, in order to understand the mean spatial and temporal variations of solar radiation in the region and evaluate the ability of the 8 products to reproduce them. Furthermore, in addition to the fact that no other study on the validation of gridded solar radiation data in Western Central Africa (WCA) is available in the literature, the analysis of hourly data, especially the clustering of diurnal cycles to assess the satellite estimates quality, is new and unique in our study

Our analyses revealed substantial differences. While all products except WorldClim 2 were able to reproduce the mean pattern of GHI at the annual time-scale and show that the Atlantic coast of Central Africa receives the least amount of solar radiation, the agreement between the products was less in the Center and South DRC regions.

The performance of the products was further assessed by comparing them with measurements available at ten weather stations in the western part of Central Africa. The assessments were conducted from daily to sub-daily time-scale. At the daily time-scale, correlations were mostly above 0.7, indicating good agreement between the four satellite estimates used at this time-scale and the ten stations. However, they all overestimate GHI levels throughout the whole annual cycle. At the sub-daily time-scale, the analysis of the diurnal cycle of GHI from the different satellite products revealed that although the shape of the four types of diurnal cycles was properly reproduced, the amplitude was generally too large.

Clouds and aerosols are the main drivers of these variations in surface solar radiation, and the accuracy of the GHI estimates depends on the accuracy of cloud and aerosols detection. Low-level clouds, in particular, pose a big challenge in WCA as they are difficult to detect and are topped with aerosols during the dry season. The satellite-based products using monthly aerosol climatology (for instance, CMSAF SARAH-2 and CLARA-A2) are those presenting the highest GHI levels and overestimations.

Finally, one of the challenges in studying solar radiation over Central Africa is the lack of sufficient good quality in-situ measurements. This lack of in-situ data hinders the evaluation of satellite estimates and reanalyses. It also makes it difficult to assess long-term trends of GHI in the region. Moreover, this raises questions about which datasets or satellite products can be used to assess climate models projections of solar radiation in Central Africa, both in the past and future. These projections are particularly important given that GHI is a key parameter for forest functioning. Therefore, there is a need to improve the existing gridded products to enhance the accuracy and reliability of solar radiation data. It is worth noting that a new edition of CMSAF data records (so-called SARAH-3 and CLARA-A3) is expected to be released soon, which could greatly help in obtaining more accurate estimates of GHI. Ultimately, improving the quality of GHI data will allow us to better understand forest functioning and climate change.

Acknowledgments

Authors acknowledge S. Audry from GET Toulouse for his help and advice on uploading and analysing the CZO M-TROPICS (Nsimi). They also acknowledge M. Charpentier for giving access to SEEG-Lekedi data. We thank the Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (TAHMO) for the provision of meteorological data. Interested parties may contact info@tahmo.orgfor these data.

CRediT authorship contribution statement

Amine Ouhechou: Conceptualization, methodology, writing- original draft preparation, writing- review and editing. **Nathalie Philippon:** Conceptualization, methodology, writing- original draft preparation, writing- review and editing. **Béatrice Morel:** Conceptualization, methodology, writing- original draft preparation, writing- review and editing. **Jörg Trentmann:** data curation, writing- review and editing. **Alexandre Graillet:** methodology, writing- review and editing. **Armand Mariscal:** data curation. **Yann Nouvellon:** data curation, writing- review and editing.

Funding

This study is part of the project DYVALOCCA (https://dyvalocca. osug.fr/) funded by ANR and DFG under contract ANR-19-CE01-0021 and DFG FI 786/5-1, and to the International Joint Laboratory “Dy- namics of land ecosystems in Central Africa in a context of globalchanges” of the Institut de Recherche pour le Développement (LMI DYCOFAC IRD).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Supplementary materials

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106711. and in Appendix B (Annexe B) of this thesis manuscript.

Chapitre III. Analyse de la variabilité interannuelle du rayonnement solaire et détection des dates de début et de fin

Ce chapitre est divisé en deux grandes parties. La première partie est consacrée à l'étude de la variabilité interannuelle et des tendances du rayonnement solaire pendant la grande saison sèche nuageuse, tandis que la deuxième partie porte sur l'identification des dates de début et de fin de cette saison à partir des données de rayonnement solaire.

Sommaire

1 Variabilité interannuelle du rayonnement solaire : Contexte et exploration préliminaire 67
2 Tendances et modes de variabilité interannuelle du rayonnement solaire au cours de la saison sèche 68
3 Le rôle des nuages et des aérosols dans la variabilité interannuelle du rayonnement solaire 74
3.1 Lien avec la couverture nuageuse.....74
3.2 Lien avec les aérosols.....79
4 Définition et détection des dates de début et de fin de la saison sèche.....82
4.1 Contexte et définitions.....82
4.2 Détection des dates de début et de fin de la saison sèche.....83
5 Variabilité interannuelle des dates de début et de fin.....86
5.1 À partir du rayonnement solaire SARAH-2.....86
5.2 À partir d'autres variables.....88
5.3 Typologie de la saison sèche : une classification des années.....90
5.4 Lien avec les cycles diurnes de rayonnement solaire.....92
6 Liens avec les températures de surface de la mer 96
7 Conclusion du chapitre 99

1 Variabilité interannuelle du rayonnement solaire : Contexte et exploration préliminaire

L'étude de la variabilité interannuelle du rayonnement solaire est essentielle pour comprendre ses variations dans le temps, en particulier, d'une année à l'autre. Cette étude fournit des informations importantes pour améliorer notre compréhension du rayonnement solaire, une source d'énergie essentielle à la vie sur Terre. Les variations des niveaux de rayonnement solaire ont un impact direct sur la production d'énergie solaire, affectant la viabilité économique et l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques. En Afrique centrale, notamment dans le parc de la Lékédi au Gabon, où les panneaux solaires constituent la principale source d'électricité, les habitants comptent sur ces panneaux pour s'alimenter en électricité toute l'année, sauf pendant la saison sèche où les panneaux ne suffisent pas à répondre à leurs besoins en électricité, ils passent donc à l'utilisation de groupe électrogènes au pétrole. En outre, la variabilité du rayonnement solaire a une influence considérable sur la photosynthèse, un processus fondamental pour la croissance des plantes et notamment des arbres tropicaux. Comme mentionné, la longue saison sèche en Afrique Centrale est associée à une réduction des niveaux de rayonnement solaire, ce qui détermine en partie la présence de certaines espèces plutôt que d'autres et leur phénologie. Les niveaux de rayonnement solaire influencent également la température, une couverture nuageuse minimale entraînant un rayonnement solaire élevé et, par conséquent, des températures plus élevées.

Dans ce contexte, il est primordial d'étudier la variabilité interannuelle du rayonnement solaire pour comprendre ces phénomènes et contribuer à l'anticipation et à l'atténuation des changements environnementaux dans la région d'Afrique centrale. À ce jour, aucune étude n'a été réalisée pour évaluer la variabilité interannuelle et les tendances du rayonnement solaire dans cette région, tandis que seules quelques-unes ont été menées dans d'autres région de l'Afrique, comme en Afrique de l'Ouest (Neher et al., 2020), en Afrique du sud (Power and Mills, 2004), ou en Afrique du nord (Magdy et al., 2010). Les limites de ce type d'étude sont principalement dues au manque d'observations à long terme du rayonnement solaire comme cela a été discuté dans le chapitre I.

D'après les résultats obtenus dans le chapitre II sur l'inter-comparaison des produits satellitaires, nous avons choisi deux produits pour étudier la variabilité interannuelle du rayonnement solaire dans ce chapitre, à savoir SARAH-2, et les réanalyses ERA5. Malgré sa surestimation du rayonnement solaire pour la région, SARAH-2 reste le produit satellitaire le plus approprié - il fournit des données couvrant l'ensemble de la période d'étude historique avec une haute résolution spatiale (Cf. tableau I.1) - et montre de bonnes compétences en cycle saisonnier. Parallèlement, ERA5, malgré des corrélations modestes, reproduit assez bien le cycle saisonnier du rayonnement solaire (Chapitre II) et est reconnu comme l'une des meilleures réanalyses (Sianturi et al., 2020 ; Wu et al., 2023) notamment utilisée pour forcer les modèles climatiques.

L'objectif de cette première partie du chapitre est de répondre aux questions suivantes :

- Quelles informations ces produits peuvent-ils fournir sur la variabilité interannuelle du rayonnement solaire ?
- La couverture nuageuse et les aérosols peuvent-ils expliquer cette variabilité interannuelle du rayonnement solaire ?

2 Tendances et modes de variabilité interannuelle du rayonnement solaire au cours de la saison sèche

Les tendances et la variabilité interannuelle du rayonnement solaire ont été étudiées en utilisant des données mensuelles de rayonnement solaire SARAH-2 et ERA5 de 1983 à 2020, période commune entre les deux produits et de mai à octobre. Ces données sont extraites sur une large fenêtre couvrant l'ensemble du bassin d'Afrique Centrale (15°S-15°N, 5°E-30°E) afin d'obtenir une vision globale et complète des variations de rayonnement solaire autour de notre région d'intérêt, l'Afrique Centrale occidentale (Gabon-Congo ; 6°S-3°N, 8°-18°E).

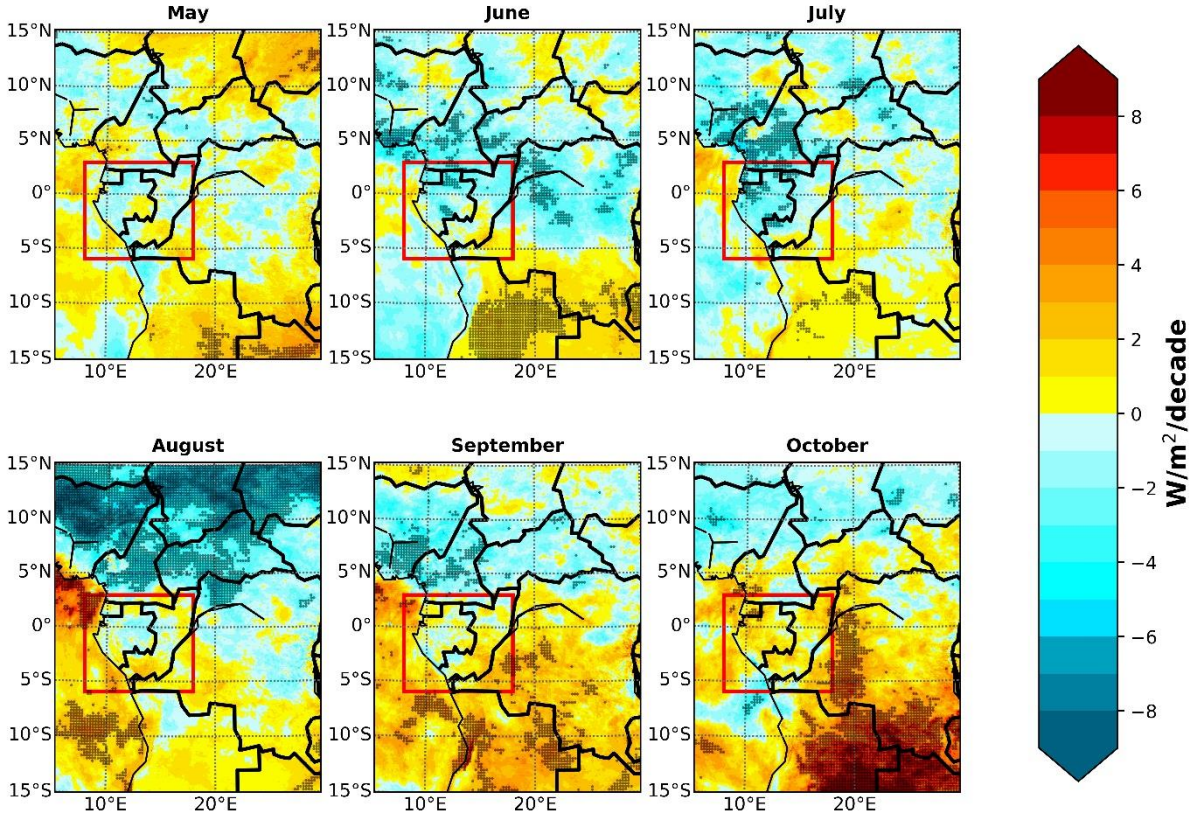

Figure III. 1 - Tendances des moyennes mensuelles de rayonnement solaire d'après SARAH-2 durant la saison sèche de mai à octobre pour la période 1983-2020 (unité : W/m^2 par décennie). Le cadre rouge montre la région d'intérêt Gabon-Congo. Les points noirs indiquent les pixels présentant des tendances significatives à un niveau de confiance de 95 % selon le test de tendance de Mann-Kendall.

Les premiers résultats de cette partie mettent en évidence les champs spatiaux des tendances moyennes mensuelles du rayonnement solaire pendant la saison sèche, illustrés par les figures III.1 et III.2 pour les produits SARAH-2 et ERA5 respectivement. SARAH-2 montre une tendance à la baisse du rayonnement solaire en Afrique Centrale occidentale surtout en juin et juillet. Cette tendance est généralement non significative sur toute la région, à l'exception au sud du Cameroun pendant les mois de juillet et d'août. Cette tendance à la baisse est de l'ordre de 1 à 4 W/m^2 par décennie. En août et octobre une tendance non significative à la hausse est observée dans le sud-est du Congo. Sur les autres régions du bassin, le signe des tendances varie. On remarque une tendance positive et significative marquée dans le Golfe de Guinée en août-septembre, avec une augmentation du rayonnement solaire de 4 à 8 W/m^2 par décennie, et qui contraste avec la forte tendance significative à la baisse observée à la même période au nord de l'Afrique Centrale, aux latitudes supérieures à 6°N. En octobre, une forte tendance positive et significative est également observée sur le sud de la République Démocratique du Congo (RDC) et l'Angola, notamment entre les latitudes 5° et 15°S.

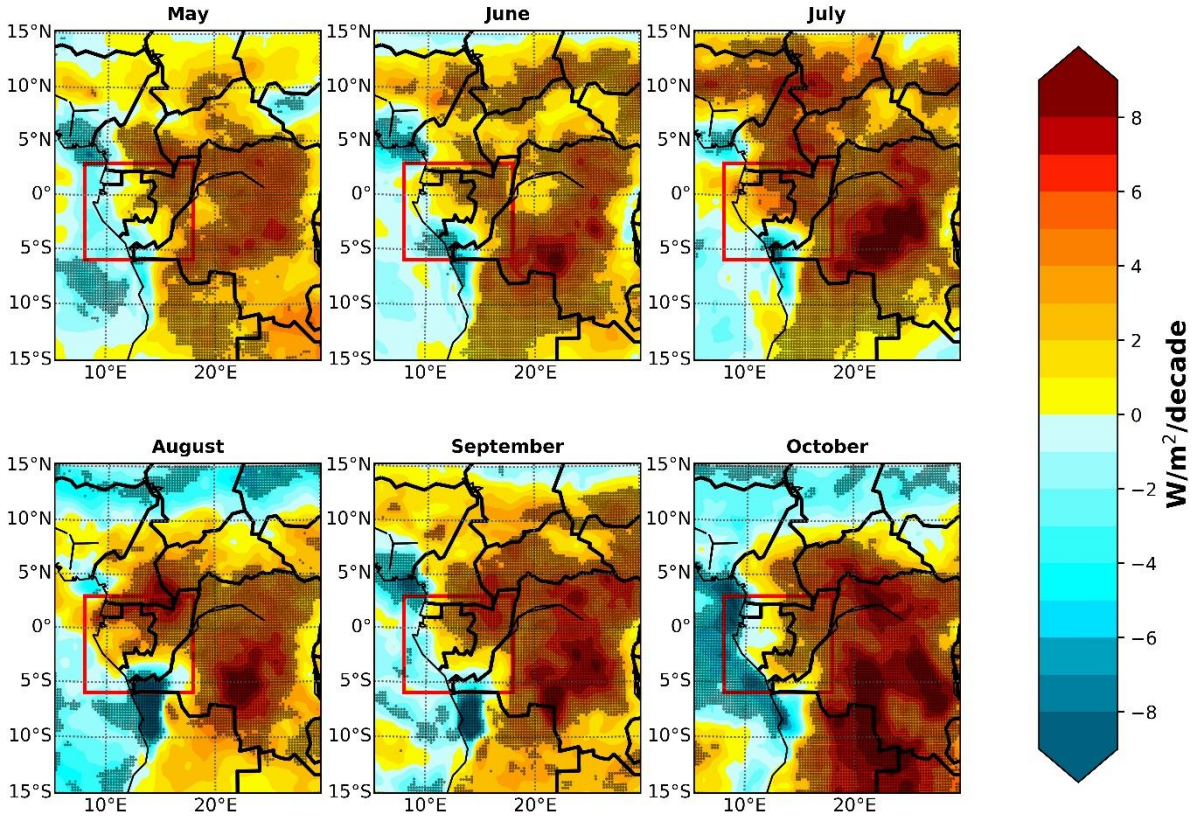

Figure III. 2 - Identique à la figure III.1, mais pour ERA5.

En regardant également ces tendances spatiales dans les réanalyses ERA5 (Figure III.2), elles montrent des tendances que ce soit à la hausse ou à la baisse plus fortes et significatives que celles observées dans SARAH-2, mais également plus persistantes d'un mois à l'autre et spatialement plus cohérentes. Ainsi une tendance positive et significative est observée sur tous les mois sur l'ensemble de la région, et elle devient plus prononcée en fin de saison sèche, notamment en septembre et octobre (atteignant plus de 8 W/m^2 dans certaines

régions du bassin d'Afrique centrale). À l'inverse, une tendance à la baisse est observée dans tous les mois sur l'océan (significative uniquement en octobre). Une zone spécifique dans le sud-ouest du Congo, le long de la façade Atlantique jusqu'à 10°S, présente une tendance significative à la baisse plus marquée, surtout en août et septembre, avec une tendance à la baisse de plus de 8 W/m^2 par décennie.

En comparaison avec d'autres recherches menées en Afrique, Medvigy et al. (2012) ont identifié des augmentations notables et statistiquement significatives du rayonnement solaire en Afrique tropicale pour la période allant de 1984 à 2007, en utilisant des données provenant du produit satellite ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project). À l'inverse, en Afrique de l'Ouest (plus précisément au Togo), Patchali et al. (2020) ont détecté des tendances à la baisse du rayonnement solaire, même si elles ne sont pas statistiquement significatives, variant de 2.25 à 5.67 W/m² par décennie sur la période allant de 1976 à 2005. Parallèlement, en Afrique du Sud, Power and Mills (2005) ont rapporté une tendance à la baisse du rayonnement solaire, caractérisée par une diminution moyenne de 5.4 W/m² par décennie au cours de la période 1960 à 1990.

Dans plusieurs études, les tendances du rayonnement solaire sont associées à divers facteurs climatiques (Wild, 2009 ; Liang and Xia, 2005 ; Medvigy et al., 2012 ; Power, 2003 ; Kazadzis et al.,2018 ; Soni et al., 2012). Le principal de ces facteurs est la couverture nuageuse, influençant considérablement la variabilité du rayonnement solaire. En outre, les aérosols, ainsi que la manière dont les produits satellitaires les détectent ou dont ils sont simulés dans les réanalyses, peuvent jouer un rôle dans l'évolution de ces tendances. Il convient de noter que SARAH-2 s'appuie sur une constante climatologique fixe pour les aérosols (Posselt et al., 2012), ce qui pourrait contribuer aux différences de tendances par rapport à ERA5. Cela correspond aux conclusions de Pfeifroth et al. (2018) dans leur étude des tendances de rayonnement solaire en Europe. En outre, SARAH-2 possède une résolution spatiale plus fine (0.05°), contrairement à la résolution d'ERA5 (0.25°). Cette résolution plus fine permet à SARAH-2 de capturer les variations locales au sein de la région, ce qui se traduit potentiellement par des tendances moins homogènes que ERA5.

Même si, en général, les tendances observées dans SARAH-2 ne sont pas statistiquement significatives par rapport à ERA5, il est important de noter que cela n'indique pas nécessairement que ERA5 est meilleure que SARAH-2. Cette affirmation est renforcée par les résultats du chapitre II, qui portait sur l'inter-comparaison des produits, où ERA5 a du mal à reproduire avec précision la variabilité saisonnière du rayonnement solaire, tandis que SARAH-2 l'a bien reproduit même avec une surestimation, ainsi qu'il a montré la plus forte corrélation avec les mesures in-situ parmi tous les produits examinés.

Étant donné l'absence de mesures in-situ à long terme dans la région, il est difficile de tirer des conclusions sur la pertinence d'un produit par rapport à l'autre. Néanmoins, la différence des tendances entre SARAH-2 et ERA5 souligne la nécessité d'approfondir l'étude en examinant la variabilité interannuelle du rayonnement solaire au cours de cette période sous l'angle des modes de variabilité.

Afin de décrire ces modes de variabilité de rayonnement solaire, nous avons appliqué une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur chacun des mois de mai à octobre séparément et sur une petite zone centrée sur le Gabon-Congo (6°S-3°N, 8°-18°E, cadre rouge dans la figure III.1 et III.2), puis nous avons projeté les résultats sur tous les pixels de la grande fenêtre couvrant tout le bassin. La période de mai à octobre a été spécifiquement choisie pour englober l'intégralité de la saison sèche nuageuse. Le 1er mode de variabilité de l'ACP du rayonnement solaire (c'est-à-dire la première composante de l'ACP, PC1 ci-après) est ainsi corrélé avec la série temporelle de rayonnement solaire de chaque pixel de la région pour SARAH-2 (Figure III.3) et ERA5 (Figure III.4). Les corrélations présentées dans ces figures sont toutes significatives à 95%.

Il convient de mentionner que les deuxièmes modes de variabilité de l'ACP du rayonnement solaire (PC2) ont été également calculés, mais ils n'ont pas montré des pourcentages importants de variance expliqués (résultats non présentés).

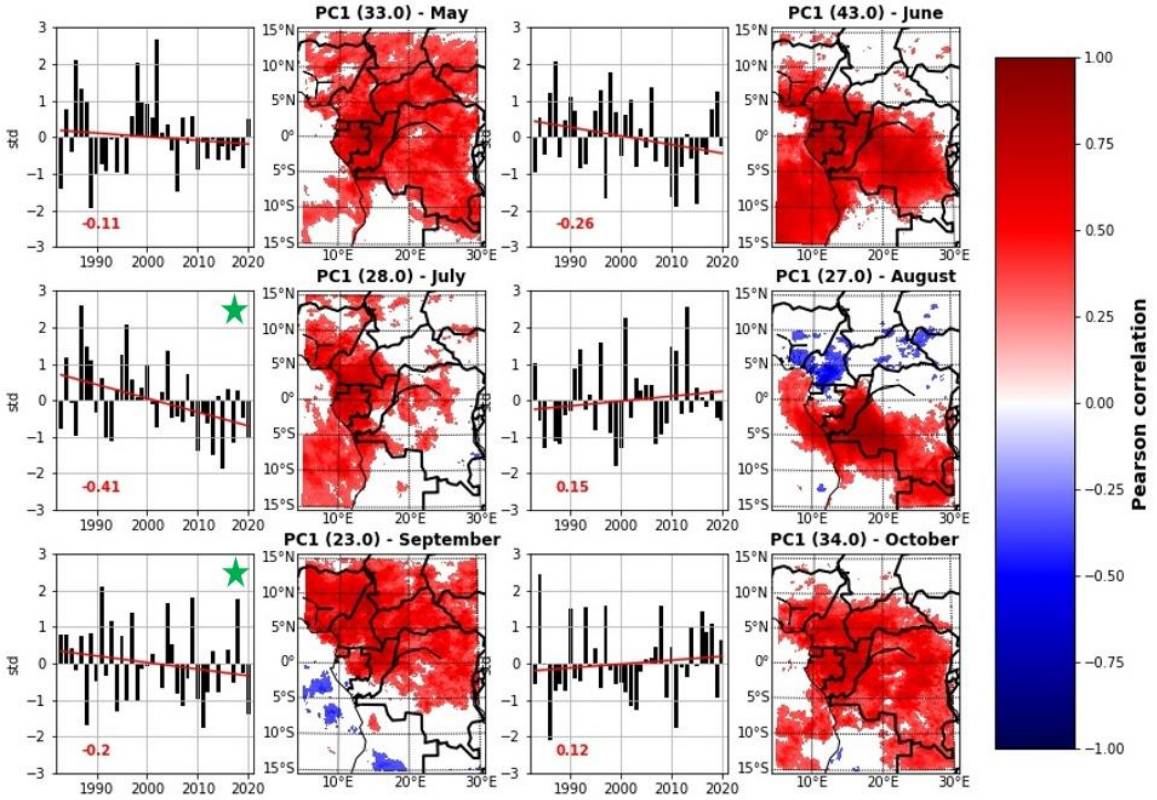

Figure III. 3 - Cartes de corrélation entre le 1er mode de variabilité de l'ACP et le rayonnement solaire SARAH-2 sur les 6 mois de mai à octobre (2e et 4e colonnes ; le pourcentage de variance expliquée par le 1er mode de l'ACP est donné au-dessus de chaque carte) et pour chacune des cartes, la série temporelle du 1er mode de l'ACP correspondante (1ere et 3e colonnes). Les valeurs en rouge représentent les corrélations entre les 1ers modes de l'ACP et le temps (les années), et les lignes rouges présentent les tendances. Les étoiles vertes indiquent que la tendance est significative au niveau de confiance 95% par le test Mann-Kendall.

Pour SARAH-2 (Figure III.3), les résultats montrent une cohérence spatiale plus forte en mai, juin et octobre avec un pourcentage de variance expliquée par le 1er mode de 33%, 43% et 34% respectivement. Nous remarquons que le signal temporel s'étend sur l'océan en juin et juillet, alors qu'il se déplace vers le nord de la région en mai et septembre. Généralement, un signal est systématiquement observé dans la région Gabon-Congo, à deux exceptions près : le mois d'août dans le nord du Congo et le mois de septembre au sud-ouest le long de la façade atlantique. Ce résultat est attendu car notre analyse en composantes principales (ACP) est centrée sur cette région spécifique et, par conception, la première composante de l'ACP caractérise toujours une partie importante de la variabilité spatiale de l'espace analysé.

Outre les champs spatiaux de corrélation, la figure III.3 représente également des séries temporelles du 1er mode de l'ACP. Celles-ci montrent pour SARAH-2 une tendance à la baisse de mai à juillet (1ère partie de la saison sèche) et septembre (plus forte en juillet, corrélation avec les années R = -0.41), et une faible tendance à la hausse en août (R = 0.15) qui concerne principalement le Congo, le sud du Gabon et de la République Démocratique du Congo (RDC). En octobre également, une tendance légèrement à la hausse (R = 0.12) est observée sur tout le bassin. Ces tendances sont significatives uniquement en juillet et septembre.

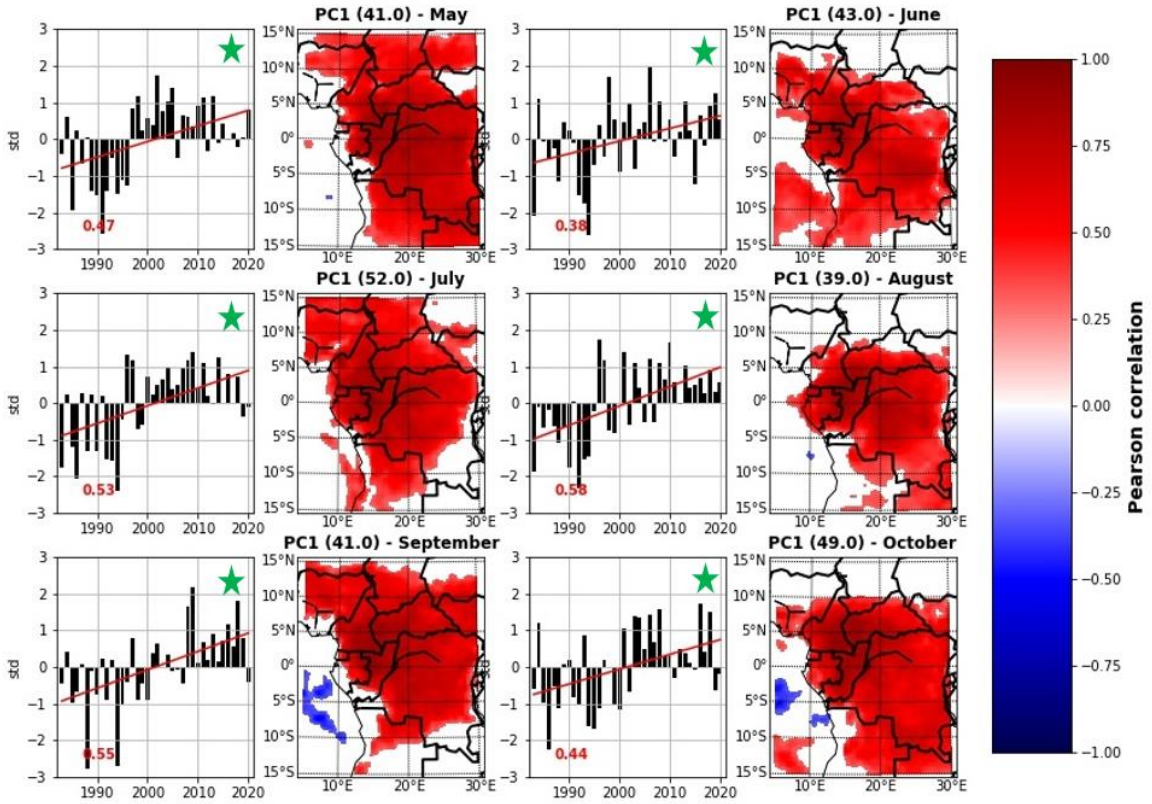

Figure III. 4 - Identique à la figure III.3, mais pour ERA5.

Ensuite, pour ERA5 (Figure III.4), les résultats montrent une cohérence spatiale plus forte en juillet et en octobre avec des pourcentages de variance expliquée par le 1er mode de 52% et 49% respectivement. Dans l'ensemble du bassin d'Afrique Centrale, un signal positif est observé pour tous les mois. Cependant, en mai et septembre, ce signal n'est pas présent dans le

sud-ouest de la région, le long de la façade Atlantique. Il semble que ERA5 présente une variabilité de rayonnement solaire le long de la côte atlantique distincte de celle des régions intérieures. Cette spécificité qu'on ne voit pas dans SARAH-2 soulève la question duquel de ces deux produits fournit la variabilité la plus exacte. Dans le cas des réanalyses ERA5, il est évident qu'elles intègrent une couverture nuageuse et une dynamique atmosphérique spécifiques. Dans leur étude, Wu et al. (2023), ont observé qu'ERA5 présentait une moyenne annuelle de la couverture nuageuse totale la plus élevée sur les zones océaniques par rapport aux autres réanalyses, ce qui pourrait expliquer les disparités observées entre les deux produits. Toutefois, nous ne nous savons toujours pas lequel des deux produits est le plus réaliste en termes de variabilité interannuelle de rayonnement solaire. En général, ERA5 montre des corrélations plus fortes et un signal cohérent sur l'ensemble du bassin, comparativement à SARAH-2.

En ce qui concerne ERA5, les résultats révèlent une tendance significative à la hausse pour tous les mois, avec une rupture notable au milieu de la décennie 1990. En effet, les années antérieures à 1995 montrent des niveaux de rayonnement solaire systématiquement plus faibles par rapport aux années postérieures. Dans l'ensemble, ERA5 montre une tendance à la hausse du rayonnement solaire dans la région. Ceci est en contradiction avec SARAH-2 qui présente une tendance opposée, c'est à dire plutôt une baisse de rayonnement solaire avec un assombrissement dans les années 2010, principalement pour les mois de juillet et septembre.

Cette rupture dans les années 90s dans ERA5 ne semble pas réaliste, étant donné que les réanalyses peuvent être influencées par la quantité de données assimilées. Pour accélérer la production des réanalyses ERA5, de multiples expériences parallèles sont réalisées, chacune couvrant une période distincte, et ces résultats sont ensuite combinés pour former le produit final. Cette approche présente toutefois un inconvénient, comme le souligne le Wiki de l'ECMWF (https://confluence.ecmwf.int) : des discontinuités peuvent apparaître dans le produit final aux points de transition entre ces différentes expériences. Ainsi, au début des années 1990, ERA5 n'a pas réussi à capturer correctement le réchauffement de la basse stratosphère à la suite de l'éruption du mont Pinatubo (Shepherd et al., 2018). En outre, Hersbach et al., 2020 indiquent que les variations des précipitations à long terme dans ERA5 présentent des décalages par rapport à GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) et GPCP (Global Precipitation Climatology Project), notamment autour de l'année 2000 dans plusieurs régions, y compris le bassin du Congo. Bien que ces transitions puissent potentiellement expliquer la discontinuité observée, nous ne sommes actuellement pas en mesure de confirmer définitivement cette hypothèse.

Par la suite, afin de mieux cerner et comprendre les facteurs qui influencent la variabilité interannuelle du rayonnement solaire, nous analysons des données de la couverture nuageuse totale, des données sur les nuages bas et les aérosols. En étudiant ces paramètres, nous pourrons identifier les éventuelles corrélations entre les variations du rayonnement solaire et les conditions nuageuses et aérosols, ce qui permettra d'approfondir notre compréhension des paramètres qui contrôlent cette variabilité.

3 Le rôle des nuages et des aérosols dans la variabilité interannuelle du rayonnement solaire

À ce stade, nous explorons les liens entre la variabilité interannuelle du rayonnement solaire et trois paramètres météorologiques dans la région : couverture nuageuse totale, nuages bas, et aérosols. Pour cela, nous calculons les premiers modes de variabilité pour ces trois paramètres et les comparons avec ceux du rayonnement solaire. Cette approche nous permet de rechercher d'éventuelles relations entre ces paramètres pour mieux comprendre la variabilité à long terme du rayonnement solaire dans la région.

Compte tenu des tendances à la hausse du rayonnement solaire ERA5, nous prévoyons d'observer des tendances à la baisse correspondante de la couverture nuageuse, en particulier dans les nuages bas. Même pour les tendances à la baisse qui n'étaient pas statistiquement significatives dans SARAH-2, nous prévoyons de détecter soit des corrélations inverses avec la couverture nuageuse qui pourraient valider la précision de SARAH-2 malgré ses tendances non significatives, soit des corrélations positives qui mettraient en doute l'exactitude de SARAH-2. Dans les deux scénarios, cela permettrait de réaffirmer la précision de ces produits dans la région. Cette section évalue la validité de ces hypothèses.

3.1 Lien avec la couverture nuageuse

Les nuages jouent un rôle fondamental dans le bilan radiatif de l'atmosphère terrestre en modifiant la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre. Dans cette section, nous examinons la relation entre le rayonnement solaire et la fraction nuageuse totale en utilisant les données mensuelles COMET disponible sur la période 1991-2015 (Cf. section I.1.4.4). En suivant la méthodologie précédemment utilisée pour les données de rayonnement solaire, nous effectuons des ACP sur les données de fraction totale de nuages sur la période 1991-2015, entre mai et octobre (MJJASO) sur la petite région Gabon-Congo que nous corrélons ensuite aux pixels de l'ensemble de l'Afrique Centrale. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure III.5.

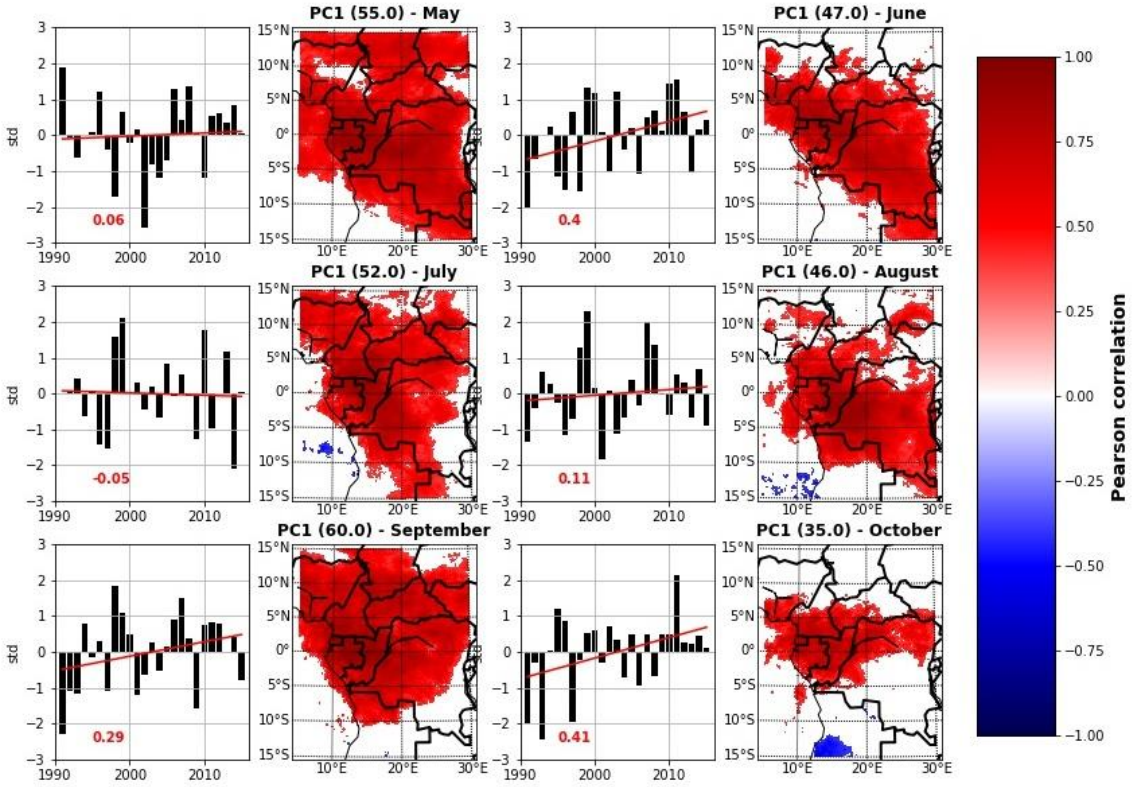

Figure III. 5 - Cartes de corrélation entre le 1er mode de variabilité de l'ACP et la fraction nuageuse totale COMET sur les mois MJJASO (2e et 4e colonnes ; le pourcentage de variance expliquée par le 1er mode de l'ACP est donné au-dessus de chaque carte) et pour chacune des cartes, la série temporelle du 1er mode de l'ACP correspondante (1ere et 3e colonnes). Les valeurs en rouge représentent les corrélations entre les 1ers modes de l'ACP et les années, et les lignes rouges présentent les tendances.

Les résultats d'analyse pour la fraction totale des nuages (Figure III.5) révèlent des tendances différentes selon les mois. En juin, août, septembre et octobre, une tendance à la hausse de la couverture nuageuse totale est observée, indiquant une augmentation significative de la présence des nuages au cours de ces mois. En revanche, en mai et juillet, aucune tendance n'est observée, ce qui indique une relative stabilité de la couverture nuageuse pendant ces mois. Les tendances à la hausse les plus prononcées sont observées en juin et octobre, soulignant une augmentation de la présence des nuages au cours de ces deux mois. Indépendamment du mois, un signal persistant est observé dans la région Gabon-Congo, ce qui indique une cohérence régionale dans les variations de la couverture nuageuse.

De plus, une cohérence spatiale est marquée en septembre, avec un pourcentage élevé de 60% de variance expliquée par la PC1 suivi de 55% et 52% en août et octobre respectivement. Comparativement aux autres produits, la PC1 appliquée sur les données COMET a réussi à capturer plus de la moitié de la variance des données originales.

Pour compléter notre analyse, nous avons effectué une comparaison entre les PC1 obtenus à partir des données de rayonnement solaire et ceux calculés à partir des données de la fraction totale des nuages. Cette comparaison nous permettra de dégager les différences entre les tendances du rayonnement solaire et de la couverture nuageuse. Afin d'éviter toute

incohérence due à une différence de période, nous avons recalculé les PC1 des produits SARAH-2 et ERA5 sur la période sur laquelle le produit COMET est disponible (1991-2015).

La figure III.6 présente les nuages de points des PC1 de la couverture nuageuse totale (COMET) en comparaison avec ceux du rayonnement solaire (SARAH-2 et ERA5). Une relation claire se dessine entre les PC1 de COMET et ceux des deux produits de rayonnement solaire. Les corrélations négatives observées entre ces variables indiquent que lorsque les niveaux de rayonnement solaire diminuent (augmentent), la couverture nuageuse totale augmente (diminue).

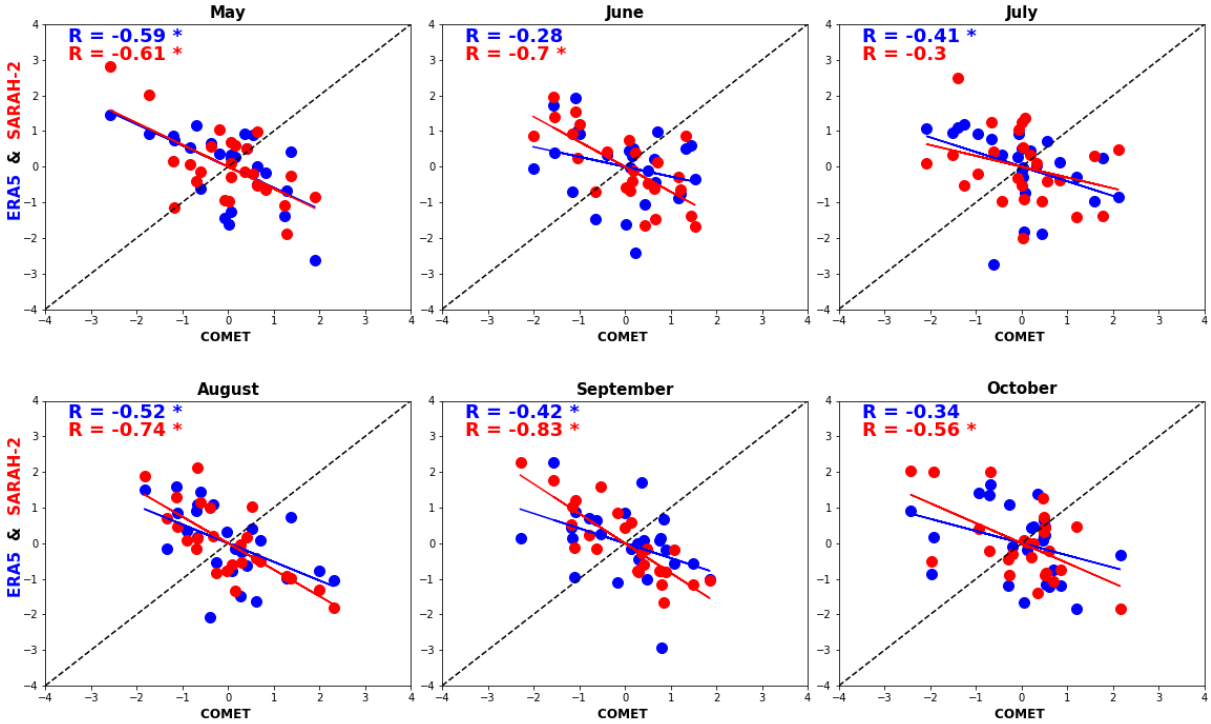

Figure III. 6 - Nuages de points des PC1 standardisés de la couverture nuageuse totale (COMET) et du rayonnement solaire ERA5 (bleu) et SARAH-2 (rouge) calculés sur la période 1991-2015. Les corrélations entre les PC1 d'ERA5/SARAH-2 et COMET sont données en haut à gauche de chaque panneau, les étoiles indiquant les corrélations significatives au niveau de confiance de 95%.

Pour SARAH-2, des corrélations significatives sont observées pour tous les mois à l'exception de juillet, avec des valeurs comprises entre -0.3 et -0.83. Une relation particulièrement forte est identifiée en septembre, où le coefficient de corrélation atteint -0.83. En ce qui concerne le rayonnement ERA5, des corrélations négatives significatives sont trouvées avec des valeurs qui varient entre -0.28 et -0.59. Il est intéressant de noter que les corrélations obtenues avec ERA5 sont généralement moins fortes que celles de SARAH-2. Cette différence pourrait être justifiée par le fait que même si les deux produits SARAH-2 et COMET sont basés sur des algorithmes différents, ils sont dérivés des mêmes images satellitaires Meteosat.

En général, SARAH-2 et ERA5 ont présenté des corrélations négatives importantes avec la fraction nuageuse totale de COMET sur les 6 mois MJJASO, et la plupart de ces

corrélations étaient statistiquement significatives. Cela indique que la couverture nuageuse a un rôle important sur la variabilité de rayonnement solaire dans la région. Cependant, étant donné que les nuages bas dominent pendant la saison sèche dans cette région, nous effectuons également une même analyse axée sur les données de nuages bas. Il est intéressant de noter que les données des nuages bas ne sont pas disponibles par le produit COMET, et donc nous avons utilisé les données mensuelles de nuages bas d'ERA5 sur la période 1983-2020 pour notre analyse.

En utilisant la même approche que celle employée pour les données de rayonnement solaire et de la fraction totale des nuages, les résultats pour les nuages bas ERA5 sont donnés dans la figure III.7.

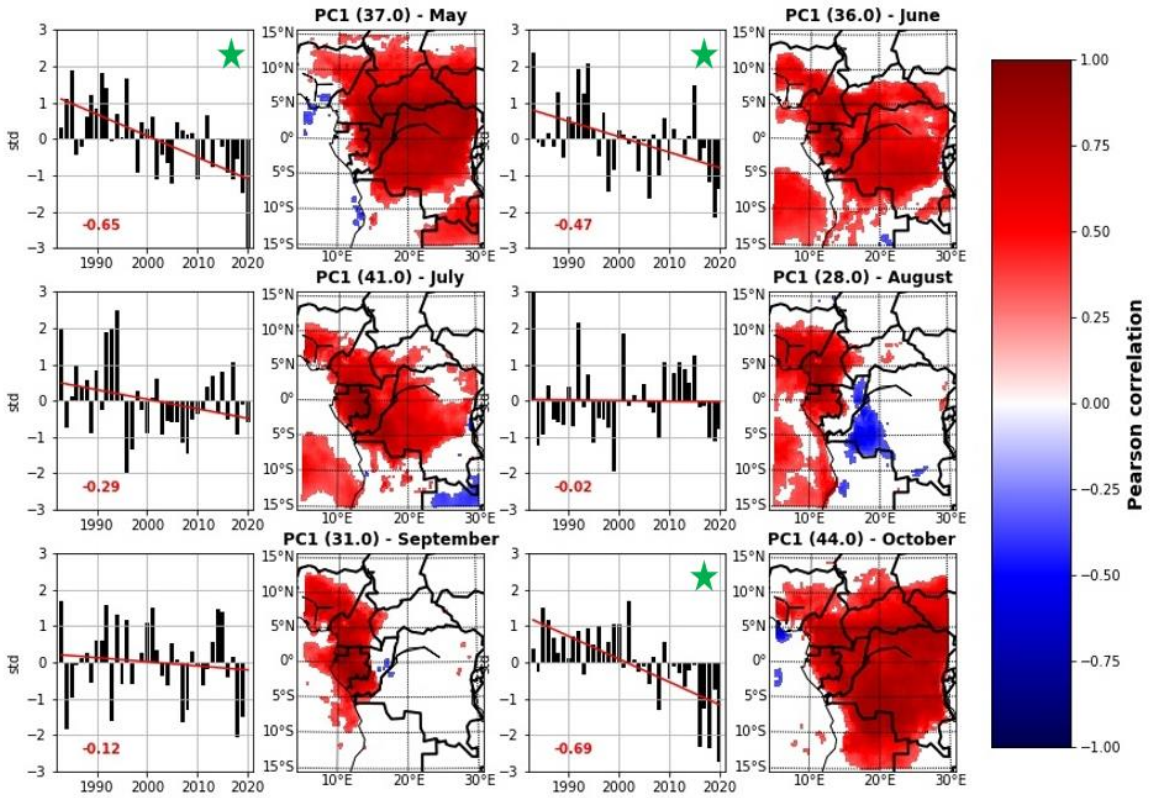

Figure III. 7 - Identique à la figure III.5 mais pour les nuages bas ERA5. Les étoiles vertes indiquent que la tendance est significative au niveau de confiance 95% par le test Mann-Kendall.

Les résultats d'analyse des nuages bas (figure III.7) révèlent des tendances à la baisse de leur présence au cours de la saison sèche, à l'exception du mois d'août durant lequel aucune tendance n'est observée. Les mois de mai et octobre se distinguent par des fortes tendances à la baisse (R valant -0.65 et -0.69 respectivement), indiquant une réduction significative de la couverture nuageuse basse pendant ces deux mois. Par ailleurs, en octobre et juillet, nous constatons que le premier mode explique des pourcentages de variance plus élevés, soit 44% et 41% respectivement. En outre, nous remarquons également l'absence de tout signal sur le sud-ouest du Gabon le long de la façade atlantique, en début (mai-juin) et en fin (octobre) de saison sèche. Ceci peut être influencé par des facteurs océaniques qui ont un impact sur la formation

des nuages bas dans cette région côtière. De plus, la variabilité des nuages bas sur la côte dans ERA5 suit un mode de variabilité différent de celui à l'intérieur des terres. En général, ces tendances de nuages bas sont remarquées de façon variable, parfois uniquement sur le Golfe de la Guinée et le Gabon (août et septembre) et d'autres fois sur tout le bassin, à l'exception de la côte gabonaise.

De plus, nous avons également examiné les liens des PCs de rayonnement solaire avec la couverture nuageuse basse issue de ERA5, (Figure III.8). Nous remarquons que toutes les corrélations sont négatives (et significatives) entres les PC1 de rayonnement solaire et de nuages bas dans ERA5 (à l'exception du mois d'août), avec des valeurs qui varient entre -0.88 et -0.24. En ce qui concerne SARAH-2, les corrélations sont toutes négatives sauf pour le mois d'août avec une valeur de 0.55. Ceci peut sembler paradoxal puisqu'une augmentation (diminution) des nuages bas devrait être associée à une diminution (augmentation) du rayonnement solaire. Cependant, il existe des facteurs supplémentaires qui pourraient expliquer cette corrélation. Il est possible que, pendant ce mois, les autres types de nuages (moyens, supérieurs) ou bien des aérosols diminuent. Cette combinaison pourrait favoriser une augmentation des niveaux de rayonnement solaire dans la région pendant cette période, malgré la présence des nuages bas.

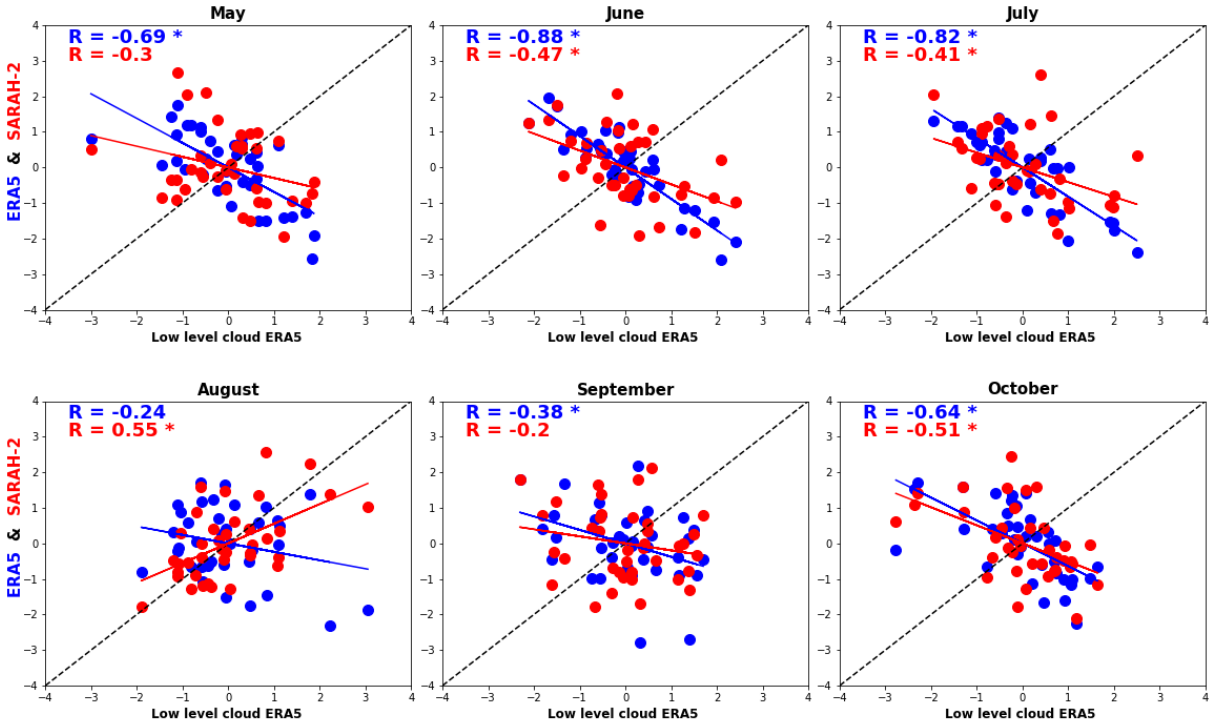

Figure III. 8 - Nuages de points des PC1 standardisés des nuages bas (ERA5) et du rayonnement solaire ERA5 (bleu) et SARAH-2 (rouge) calculés sur la période 1983-2020. Les corrélations entre les PC1 d'ERA5/SARAH-2 et ERA5 nuages bas sont données en haut à gauche de chaque panneau, les étoiles indiquant les corrélations significatives au niveau de confiance de 95%.

Pour renforcer notre interprétation, les résultats obtenus dans la figure III.7, qui comparent SARAH-2 avec la fraction totale des nuages COMET, confirment cette tendance. En effet, ces deux produits présentent une corrélation négative significative (R = -0.75) en août,

ce qui est conforme à nos attentes et renforce l'hypothèse selon laquelle la corrélation positive entre les PC1 ERA5 pour les nuages bas et de SARAH-2 pour le rayonnement solaire en août peut être liée à des variations spécifiques des autres types de nuages dans la région, que ERA5 ne prend pas en compte.

A cela s'ajoute l'hypothèse selon laquelle la variabilité des nuages dans ERA5 pour le mois d'août semble irréaliste. Pour ce mois-là, nous n'observons aucune tendance dans les nuages bas (comme le montre la figure III.7). Par conséquent, la corrélation entre les PC1 des nuages bas et le rayonnement solaire ERA5 au cours de ce mois est plus faible que pour les six autres mois étudiés (MJJASO). En fait, parmi les six mois MJJASO, c'est le seul mois où la corrélation n'était pas statistiquement significative, ce qui peut renforcer l'hypothèse d'une représentation irréaliste des nuages bas dans ERA5 pour le mois d'août.

Comme mentionné précédemment, ERA5 présente une variabilité de la couverture nuageuse sur la côte atlantique différente de celle sur le continent. Cela est corroborée par Yao et al. (2020), qui ont révélé qu'ERA5 montre une couverture nuageuse moyenne mensuelle proche de MODIS sur les zones continentales, mais montre des pourcentages inférieurs d'environ 10 % par rapport à MODIS sur les régions océaniques. Alors que notre étude n'a pas évalué la performance d'ERA5 dans la simulation des nuages bas en Afrique centrale, Dommo et al. (2022) ont effectué une telle évaluation. Ils ont comparé ERA5 avec les observations EECRA et les données satellitaires de Terra et Aqua MODIS. Leurs conclusions indiquent que, malgré une sous-estimation des nuages bas par ERA5, ce dernier reproduit avec précision la distribution spatiale moyenne des nuages bas lorsqu'on le compare aux données d'observation et aux données satellite MODIS.

Finalement, nos résultats ont clairement montré l'importance des nuages bas dans la modulation du rayonnement solaire dans la région. La corrélation entre les PC1 des nuages bas et du rayonnement solaire en août a suscité une réflexion intéressante sur les possibles mécanismes sous-jacents à cette tendance apparemment contradictoire. Cependant, se baser uniquement sur les nuages ne suffit pas pour comprendre pleinement les facteurs qui impactent le rayonnement dans cette région assez complexe. C'est pourquoi, dans la section suivante, nous avons également examiné les relations possibles avec les aérosols afin d'approfondir notre compréhension des processus influençant le rayonnement solaire dans la région.

3.2 Lien avec les aérosols

Les aérosols jouent un rôle crucial dans l'interaction avec le rayonnement solaire. En fonction de leurs propriétés physico-chimiques, les aérosols peuvent diffuser ou absorber le rayonnement solaire, et par conséquent, modifier la quantité du rayonnement solaire qui atteint le sol. Ils ont des effets sur le système climatique de la terre (Salah et al., 2018 ; Cazorla et al., 2013), ainsi que des influences sur le cycle hydrologique, la température du globe et les écosystèmes (Tai et al., 2010 ; Ramanathan et al., 2001 ; Boiyo et al., 2017). En Afrique Centrale, plusieurs types d'aérosols peuvent être présents, notamment, les aérosols de poussière provenant du Sahel (Laurent et al., 2008), des aérosols de suie provenant des feux de savanes, qui entrainent une surestimation du rayonnement solaire par les produits satellitaires

(Konzelmann et al., 1996), ainsi que des aérosols marins pouvant provenir de l'océan atlantique (Chakraborty et al., 2022).

Cette section vient compléter notre analyse précédente sur la relation entre le rayonnement solaire et les nuages. En évaluant ces différents facteurs, nous pourrons mieux appréhender les mécanismes qui influencent les tendances et la variabilité interannuelle du rayonnement solaire dans la région. Pour cela, nous avons utilisé l'AOD à 550 nm (Aerosol Optical Depth en anglais, l'épaisseur optique des aérosols en français). L'AOD est couramment utilisé dans la littérature, pour examiner les tendances à long terme (eg, Ali et al., 2020), étudier la variabilité spatiotemporelle (Tan et al., 2022), ou comprendre l'effet de cette variable sur d'autres paramètres ou phénomènes climatiques (eg, Chakraborty et al., 2021).

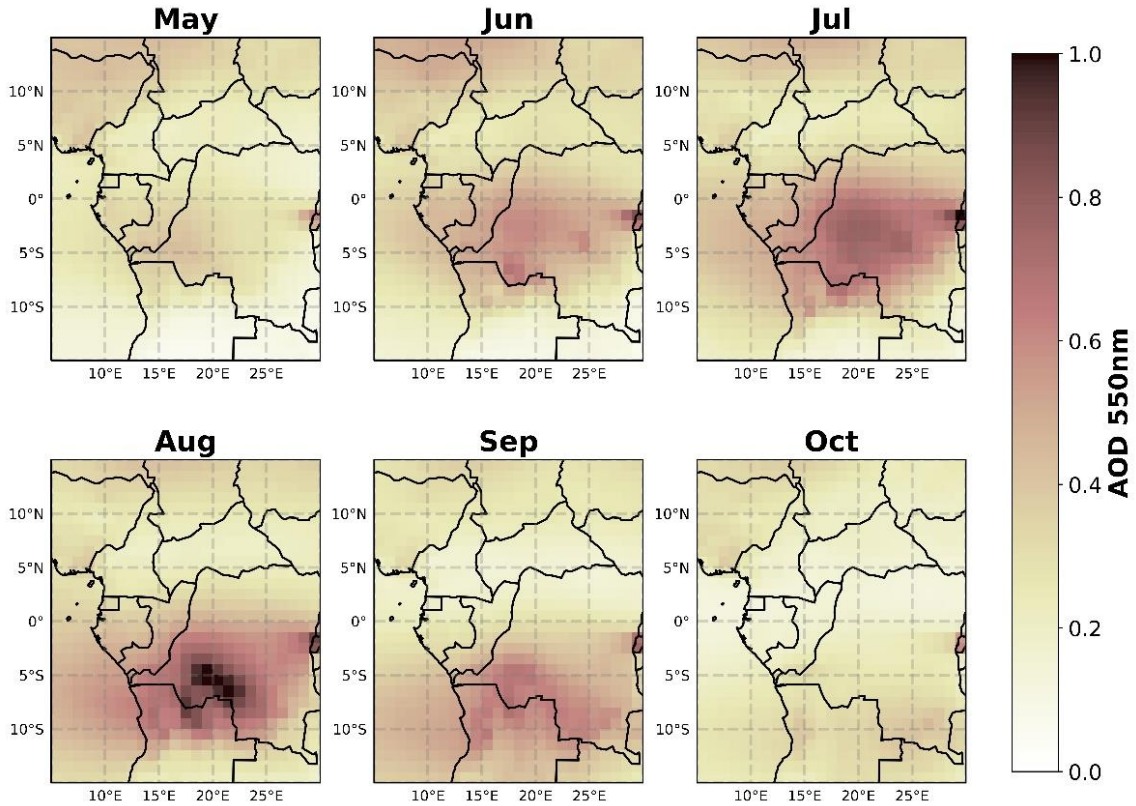

Figure III. 9 - Champs mensuels moyens de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) à 550 nm du produit CAMS en mai – octobre sur la période 2003-2017.

Les données mensuelles des AOD issues des réanalyses CAMS (Bellouin et al., 2020) sur la période 2003-2017 ont été utilisées. Des moyennes mensuelles mai-octobre sur cette période sont présentées dans la figure III.9 ; nous constatons que des maximas sont observés pendant la saison sèche de juin à septembre (JJAS), avec des pics particulièrement marqués en juillet et août (qui dépassent 0.9), spécifiquement dans la partie est de la région près des montagnes des Virunga, qui s'étendent le long de la frontière nord du Rwanda, de la RDC et de l'Ouganda. Cette chaîne montagneuse comprend plusieurs volcans majeurs qui ont été actifs ces dernières années, la dernière éruption étant survenue en 2021 au volcan Nyiragongo à l'est de la RDC. Un autre maximum important est observé en août dans le sud-ouest de la RDC, une zone caractérisée par des plateaux couverts de savane et une plus forte fréquence des

feux de savane à partir du mois de juin (Planche 1 dans Konzelmann et al., 1996). Sur notre région d'intérêt, le Gabon-Congo, les valeurs d'AOD dépassent 0.4 de juin à août.

En poursuivant avec la même méthodologie, nous avons calculé les premiers modes de variabilité de l'AOD dans la région (voir Annexe C). Il est important de noter que la période sur laquelle ces modes de variabilité de l'AOD sont calculées est plus courte en comparaison avec la période des autres paramètres se limitant à seulement 15 années, ce qui a un effet sur les résultats, et donc il faut toujours garder ça en tête lors d'analyse de résultats. Les résultats montrent des tendances significatives dans l'AOD sur la région. En juin, août et septembre, des tendances à la hausse de la quantité des aérosols sont observées, avec une tendance plus forte en août. Ces tendances s'étendent sur toute la région autour de l'équateur, de 5° sud à 5° nord, et parfois même jusqu'à plus de 20° à l'est. En revanche, le mois de mai montre une modeste tendance à la baisse, tandis qu'aucune tendance n'est observée en juillet et octobre.

Par la suite, et pour comparer ces résultats avec ceux pour le rayonnement solaire, nous avons recalculé tous les PC1 de rayonnement solaire sur cette même période de 2003 à 2017. La figure III.10 présente les nuages de points entre les PC1 de rayonnement solaire SARAH-2 et ERA5 et les PC1 de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) CAMS.

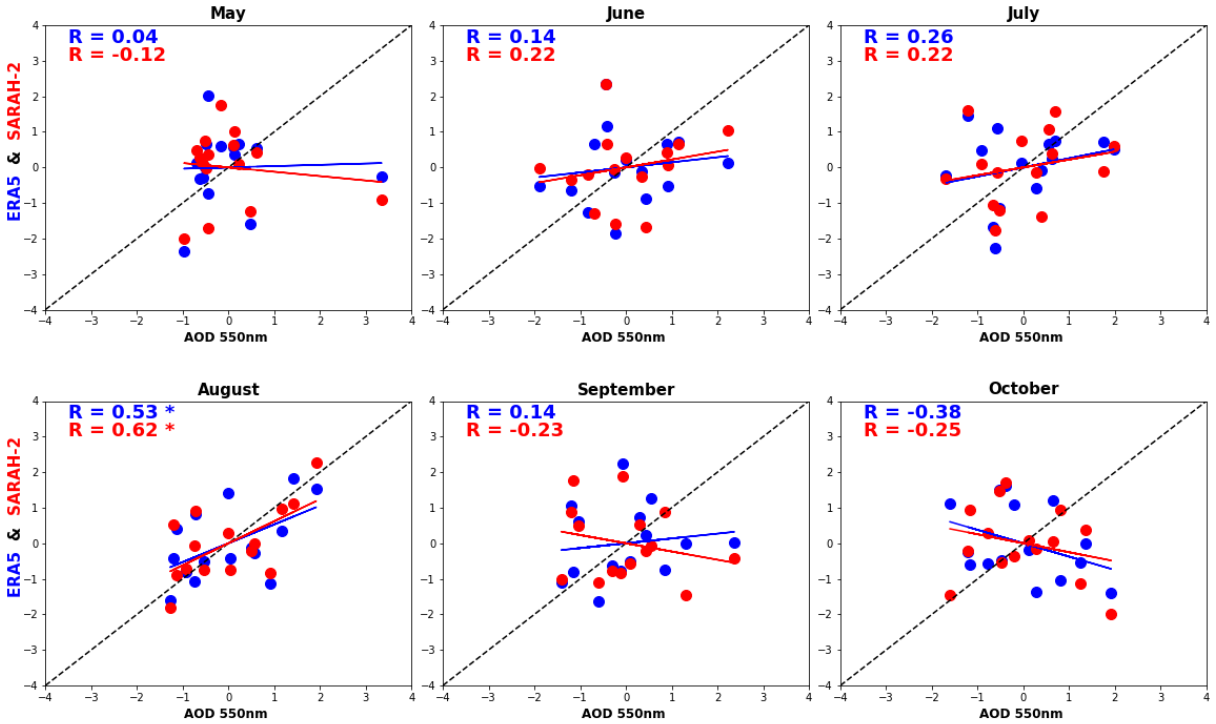

Figure III. 10 - Nuages de points des PC1 standardisés des AOD 550nm (CAMS) et du rayonnement solaire ERA5 (bleu) et SARAH-2 (rouge) calculés sur la période 2003-2017. Les corrélations entre les PC1 d'ERA5/SARAH-2 et les AOD sont données en haut à gauche de chaque panneau, les étoiles indiquant les corrélations significatives au niveau de confiance de 95%.

Parmi toutes les corrélations calculées, seules celles du mois d'août sont significatives mais positives, que ce soit avec le rayonnement ERA5 ou SARAH-2. Généralement, la plupart des corrélations sont positives, ce qui n'est pas en accord avec ce qui

est attendu (des corrélations négatives) et ce qui suggère que les AOD ne sont pas à l'origine des tendances dans le rayonnement solaire au cours de cette période. Cependant, seul le mois d'octobre présente des corrélations négatives, bien qu'elles ne soient pas significatives. La période d'étude de seulement 15 ans joue un rôle important dans la significativité de ces corrélations, ce qui limite la comparaison à ce stade.

De plus, la corrélation positive entre les PC1 des AOD et celles du rayonnement solaire en août (figure III.10) s'ajoute à celles trouvées entre les nuages bas et le rayonnement solaire (figure III.8), ce qui suggère que la variabilité interannuelle du rayonnement solaire au cours de ce mois est probablement impactée par la présence d'autres types de nuages que les nuages bas. Ces résultats soulignent l'importance d'examiner plus en détail l'influence des différents types de nuages sur la variabilité du rayonnement solaire dans la région. Une approche plus approfondie sur une période plus longue serait nécessaire pour mieux comprendre ces relations et leurs implications pour le climat de la région.

4 Définition et détection des dates de début et de fin de la saison sèche

En raison de la faible couverture de la région par les réseaux de mesure in-situ à long terme, la validation de la section précédente sur la variabilité interannuelle s'est avérée difficile et a soulevé de nombreuses questions sur la variabilité du rayonnement solaire de saison sèche dans la région. Par conséquent, la deuxième partie de ce chapitre porte sur la compréhension de cette saison particulière, notamment ses dates de début et de fin.

4.1 Contexte et définitions

L'alternance des saisons sèches et de pluie est une des caractéristiques principales des climats tropicaux. Dans de nombreuses régions tropicales, début et fin de saisons rythment étroitement les calendriers agricoles, l'accès aux ressources en eau, et la disponibilité en énergie. Comprendre donc quand ces saisons débutent et finissent et si ces dates de débuts et fins varient est d'une grande importance.

De nos jours, la plupart des études (Laux et al., 2008 ; Murphy et al., 2016 ; Liebmann et al., 2012 ; Dunning et al., 2016, 2018 ; Li & Sun, 2020) se sont concentrées sur les saisons des pluies. Cela est principalement dû à l'impact direct de cette saison sur le cycle hydrologique, les ressources en eau et l'agriculture. Cependant, il est tout aussi important de comprendre les dates de début et de fin de la saison sèche, en particulier celle d'Afrique Centrale occidentale. Cette saison sèche longue revêt une importance cruciale dans de nombreux aspects de la vie dans la région. Durant cette saison sèche, les conditions climatiques se caractérisent par une diminution des précipitations, ce qui influe sur la biodiversité et la disponibilité en eau. De plus, cette saison sèche a des implications directes pour l'exploitation des forêts : le sol plus sec pendant cette période, contrairement à la saison des pluies, facilite l'accès aux zones forestières rendant plus aisée les prélèvements d'arbres. En outre, et comme déjà mentionné au début de ce chapitre, cette longue saison sèche affecte l'utilisation de l'énergie solaire dans la région. D'ailleurs, l'étude de la saison sèche en Afrique Centrale revêt une importance multidimensionnelle, allant de la préservation des écosystèmes à l'optimisation des ressources

énergétiques, et offre un aperçu précieux des enjeux environnementaux et économiques auxquels cette région doit faire face.

L'objectif de cette section consiste à identifier et analyser les dates de début et de fin de la saison sèche en utilisant des données de rayonnement solaire. Ces dates seront comparées avec les dates trouvées en utilisant des données plus (ou moins) classiques de précipitations et de nébulosité. Enfin pour comprendre les mécanismes influençant la variabilité interannuelle de ces dates nous examinerons la température de surface de la mer. À cette fin, cette section vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques (dates moyennes, écarts types) des dates de début et de fin de la saison sèche ?
- Existe-t-il des différences entre les dates dérivées du rayonnement solaire et celles dérivées des précipitations et des nuages bas, et quelles conclusions peut-on tirer en cas de différence ?
- Comment ces dates varient-elles d'une année à l'autre et y a-t-il une tendance notable dans cette variation ?
- Comment la température de surface de la mer peut influencer le début ou la fin de la saison sèche ?

4.2 Détection des dates de début et de fin de la saison sèche

Pour répondre à ces questions et identifier les dates de début et de fin de la saison sèche dans la région Gabon-Congo (6°S-3°N, 8°-18°E), nous avons utilisé les données journalières de rayonnement solaire SARAH-2 sur la période d'avril à novembre, et de 1983 à 2020. Le choix de la période avril à novembre a été déterminé en testant différentes périodes : mai-octobre, mai-novembre et avril-octobre. Pour certaines périodes, le signal indiquant le début ou la fin de la saison n'a pas pu être clairement identifié pour certaines années. Ces tests sur différentes périodes ont révélé que la période avril-novembre fournit les informations les plus complètes sur la saison sèche, quelle que soit l'année.

Pour détecter les dates de début et de fin de la saison sèche, nous avons regardé deux méthodes :

- L'approche employée par Camberlin and Diop (2003), dans laquelle les dates de début et de fin de la saison des pluies sont déterminées sur la base du score cumulatif de la première composante principale de l'ACP sur les précipitations journalières.
  Dans notre cas, la variance expliquée par la PC1 du rayonnement solaire est très faible. De plus, les corrélations observées entre la PC1 et les séries temporelles de rayonnement solaire des pixels de la région Gabon-Congo sont non significatives. La PC1 n'a pas pu décrire le rayonnement solaire sur la région de façon suffisamment satisfaisante et la méthode même si elle a réussi à identifier les dates de début et de fin de la saison, a produit quelques dates aberrantes. En raison de ces incohérences, nous n'avons finalement pas retenu cette méthode de préfiltrage par ACP pour notre étude.
- La méthode des anomalies cumulées (Accumulated anomalies en anglais, AA) développée par Liebmann and Marengo (2001) pour la détection des dates de début et fin des saisons des pluies. Cette méthode repose sur la somme cumulée, année par année,

de la différence entre les valeurs journalières de rayonnement solaire et la moyenne à long terme c'est à dire sur toute la période d'étude. Autrement dit, la somme cumulée des anomalies centrées.

Pour cette deuxième méthode des anomalies cumulées, nous avons donc calculé un indice régional moyen sur la région Gabon-Congo (6°S, 3°N ; 8°-18°E), en ne considérant que les pixels terrestres. Nous avons ensuite appliqué la méthode des anomalies centrées cumulées pour détecter ces dates sur la période avril-novembre, et sur 1983-2020. La figure III.11 illustre le score cumulé des anomalies du rayonnement solaire, en prenant pour exemple les années 1997 et 2008. Les dates de début et de fin de la saison sèche correspondent au jour qui suit (j+1) celui qui enregistre respectivement les valeurs maximales et minimales de la série temporelle journalière des anomalies cumulées du rayonnement solaire pour chaque année. À partir de cette figure, nous remarquons que les deux courbes commencent par une tendance à la hausse ce qui indique des anomalies positives de rayonnement solaire correspondant à la poursuite de la saison des pluies (pour rappel la spécificité de notre région est d'enregistrer plus de rayonnement solaire pendant les saisons des pluies que la grande saison sèche). L'amplitude des anomalies cumulées diminue ensuite, ce qui correspond à l'occurrence de plusieurs jours consécutifs avec des niveaux de rayonnement solaire inférieurs à la moyenne, indiquant le début de la saison sèche. Cette tendance à la baisse se poursuit sans interruption jusqu'à un point où l'amplitude des anomalies recommence à augmenter. Cela marque la fin de la saison sèche dans la région.

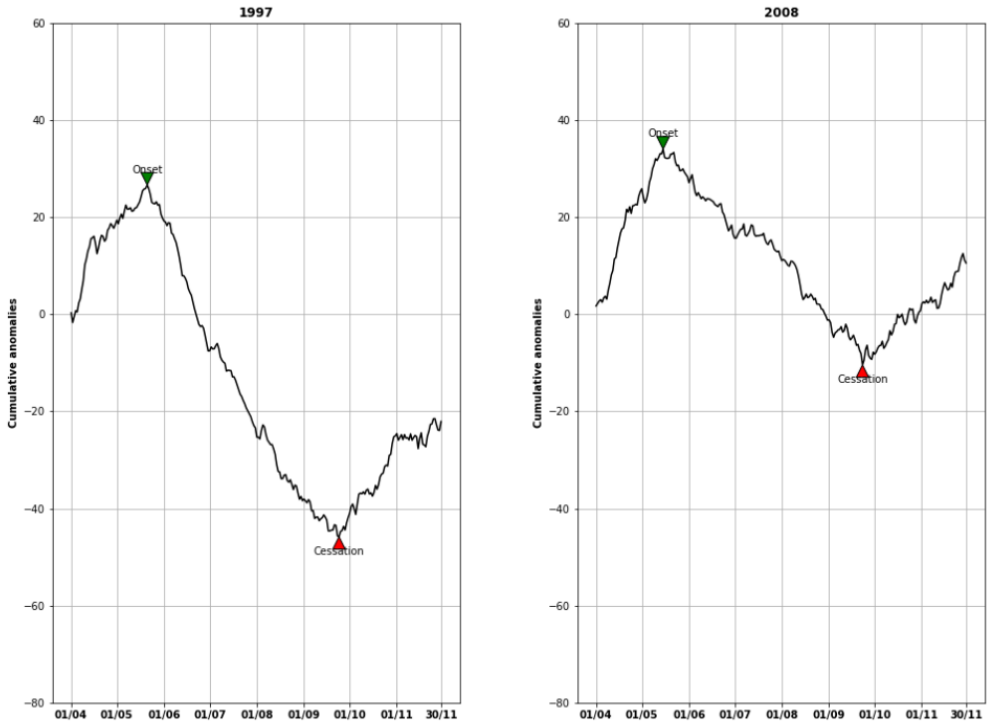

Figure III. 11 - Score cumulé des anomalies journalières du rayonnement solaire à partir de SARAH-2 (exemple des années 1997 et 2008). Les pointeurs vert et rouge indiquent respectivement le début et la fin de la saison sèche.

Afin de confirmer la validité de la méthode, nous avons analysé les champs spatiaux de rayonnement solaire moyen journalier pour une période de quatre jours avant et quatre jours après le début de la saison sèche, à partir des données couvrant toute la période 1983-2020 (figure III.12). Cette figure est basée sur les dates moyennes de début de la saison sèche pour chaque année, qui varient entre le 27 avril et le 19 juin (tableau III.1). Les résultats (figure III.12) montrent bien une diminution notable des niveaux de rayonnement solaire le premier jour après le jour où l'on enregistre l'anomalie cumulée maximale, dans la majeure partie de la région. Cependant, il est important de noter que la diminution du rayonnement solaire est plus prononcée dans la partie occidentale, le long de la façade Atlantique, que dans le nord de la région. Dans l'ensemble, nous remarquons un contraste entre les périodes précédant et suivant le début de la saison sèche, clairement évident dans toute la région (le même test a été effectué pour 10 jours avant à 10 jours après le début de la saison sèche, pour les dates de début et de fin. Les résultats indiquent une baisse des niveaux de rayonnement solaire dans la région après le début de la saison sèche et une augmentation après sa fin ; voir Annexe C.). Après validation de la méthode, nous regardons ensuite comment ces dates varient au cours de la période d'étude.

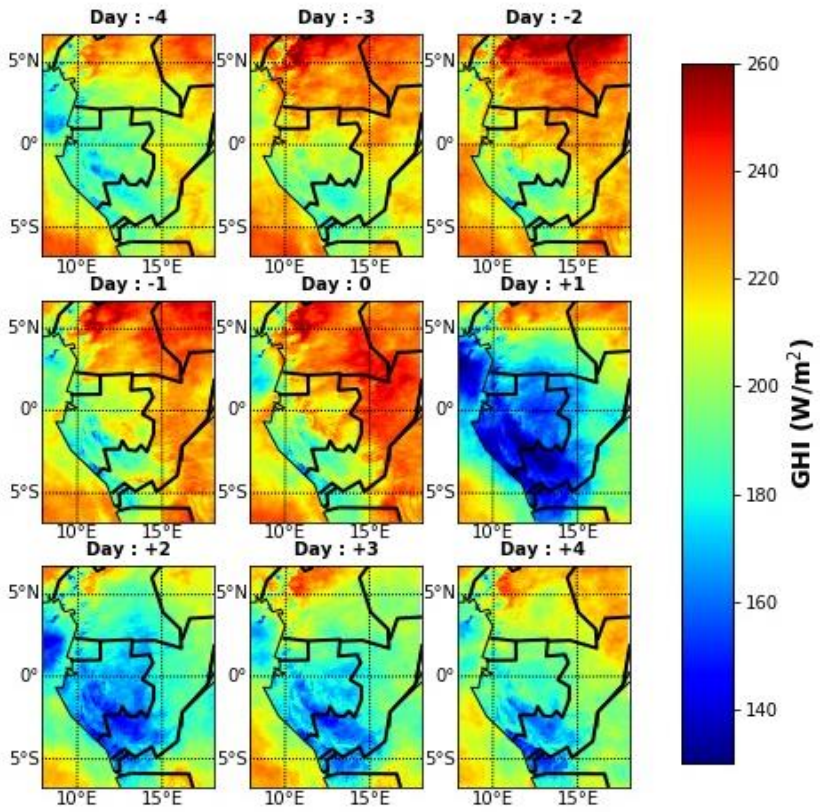

Figure III. 12 - Moyenne journalière du rayonnement solaire SARAH-2 de 4 jours avant à 4 jours après le début de la saison sèche. La moyenne est calculée sur l'ensemble de la période 1983-2020.

5 Variabilité interannuelle des dates de début et de fin

5.1 À partir du rayonnement solaire SARAH-2

A l'instar du calcul effectué dans la figure III.11 pour deux années en particulier, nous avons identifié les dates de début et de fin pour chaque année de la période 1983-2020. Les dates de début de la saison sèche varient entre le 27 avril et le 19 juin, et les dates de fin de la saison sèche varient entre le 29 août et le 5 novembre (Tableau III.1). En moyenne sur la période, la date de début de la saison sèche, dérivée de SARAH-2, est le 17 mai (±13 jours), et celle de fin le 3 octobre (±16 jours).

Tableau III. 1 - Dates de début et de fin de la saison sèche estimées à partir des données de rayonnement solaire SARAH-2 sur la période allant de 1983 à 2020 sur la base de l'indice régional moyen pour la région Gabon-Congo (6°S, 3°N ; 8°-18°E).

Année	Date de début	Date de fin	Année	Date de début	Date de fin	Année	Date de début	Date de fin
1983	02-mai	25-oct	**1996**	21-mai	17-oct	**2009**	25-mai	24-oct
1984	23-mai	04-sept	**1997**	21-mai	24-sept	**2010**	28-avr	25-sept
1985	13-mai	12-sept	**1998**	19-juin	24-sept	**2011**	14-mai	27-oct
1986	01-juin	02-nov	**1999**	17-juin	12-oct	**2012**	13-mai	21-sept
1987	06-juin	23-oct	**2000**	21-mai	09-oct	**2013**	26-mai	14-oct
1988	27-mai	25-sept	**2001**	11-mai	05-nov	**2014**	05-mai	30-sept
1989	02-mai	23-sept	**2002**	25-mai	03-oct	**2015**	15-mai	10-oct
1990	29-avr	30-sept	**2003**	23-mai	10-oct	**2016**	12-mai	04-oct
1991	22-mai	11-oct	**2004**	14-mai	29-août	**2017**	02-mai	29-sept
1992	30-avr	21-sept	**2005**	09-mai	06-oct	**2018**	07-mai	13-sept
1993	08-mai	16-sept	**2006**	08-mai	21-oct	**2019**	20-mai	04-oct
1994	27-avr	15-oct	**2007**	01-juin	08-oct	**2020**	22-mai	19-sept
1995	22-mai	23-sept	**2008**	15-mai	23-sept			

Nous constatons qu'aucune tendance significative n'est observée au cours de la période 1983-2020 que ce soit dans les dates de début ou de fin de la saison sèche (figure III.13). Toutefois, il convient de noter que certaines années présentent des dates de début très tardives, notamment les années 1986-1988, 1998-1999 et 2007, qui coïncident avec des événements ENSO/LNSO majeurs. À l'inverse, des dates de fin très précoces sont observées dans les années 1984/1985, 1992/1993, 2004, 2012, 2018 et 2020.

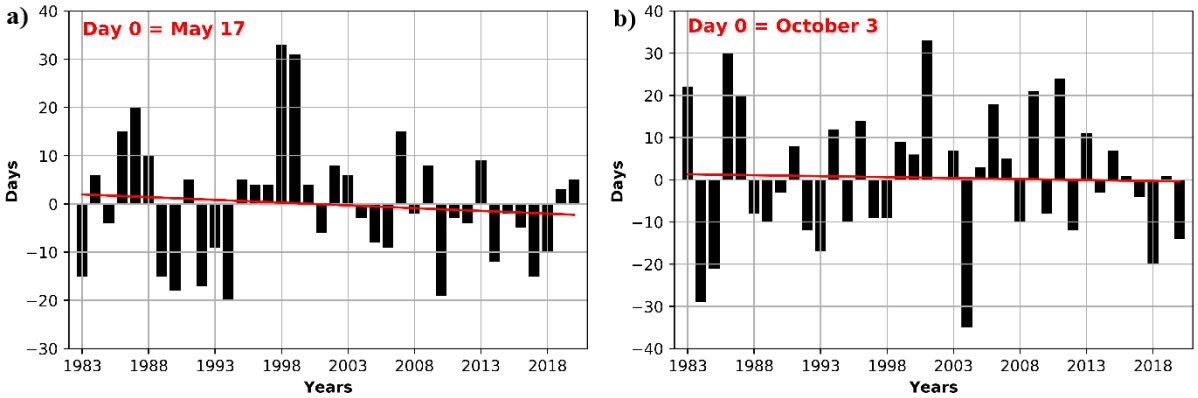

Figure III. 13 - Séries temporelles des anomalies des dates de début (panneau a) et de fin (panneau b) de saison sèche dérivées du rayonnement solaire SARAH-2, les dates moyennes étant indiquées dans le coin supérieur gauche de chaque panneau.

Ces variations observées dans les dates de début et de fin de la saison sèche au fil des années peuvent être attribuées à plusieurs facteurs climatiques. Parmi ces facteurs, nous envisageons les variations des températures de surface de la mer (c'est le facteur le plus souvent associé aux dates de début et de fin des saisons des pluies sous les tropiques (Cao et al., 2018 ; Wang et al., 2023)) comme hypothèse principale, et nous l'examinons plus en profondeur dans les sections qui suivent. Pour l'instant, une étude comparative des dates trouvées à partir du

rayonnement solaire, des nuages bas ainsi qu'à partir des données de précipitations font l'objet de la section suivante.

5.2 À partir d'autres variables

Nous avons de même appliqué la méthode AA sur i) les données journalières des nuages bas ERA5, et ii) les données journalières des précipitations CHIRPS (Funk et al., 2015, voir section I.1.4.2), mais aussi sur les données de rayonnement solaire ERA5 sur la même période 1983-2020. L'objectif principal de cette étude comparative est de vérifier s'il existe des différences dans les dates identifiées par chacun de ces paramètres et produits. Si tel est le cas, l'étude vise à quantifier leur ampleur et à fournir des explications sur les différences observées. La figure III.14 montre la variabilité interannuelle des dates de début et de fin de la saison sèche pour chacun de ces produits.

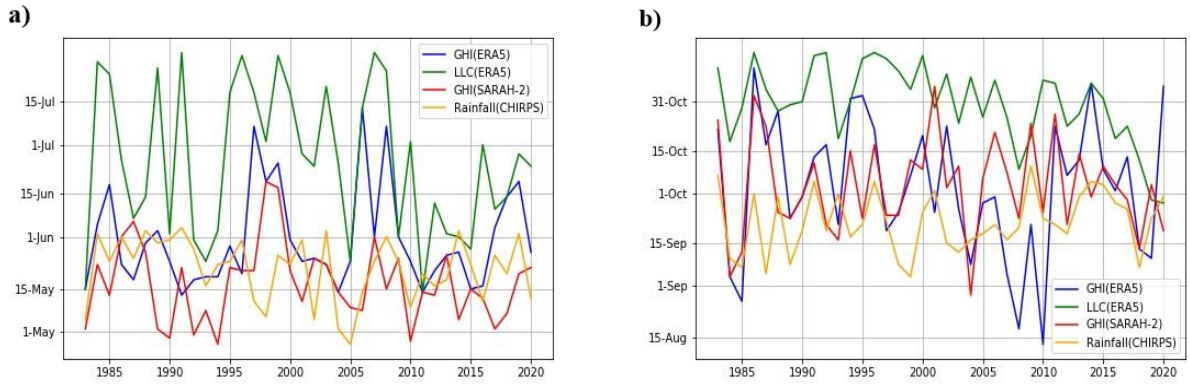

Figure III. 14 - Variabilité interannuelle des dates de début (panneau a) et de fin de la saison sèche (panneau b), dérivées à partir du rayonnement solaire ERA5 (en bleu) et SARAH-2 (en rouge), des nuages bas ERA5 (en vert) et des précipitations CHIRPS (en orange).

Les dates moyennes de début de la saison sèche varient selon les paramètres utilisés (rayonnement solaire, nuages bas, précipitations) et leur source. Comme montré dans la section ci-dessus, la date moyenne de début de la saison sèche selon le rayonnement solaire SARAH-2 est le 17 mai (±13) et celle de la fin est le 3 octobre (±16). En se basant sur le rayonnement solaire ERA5, la date moyenne de début de la saison sèche est le 30 mai (±16). Celle trouvée à partir des données de précipitations est le 21 mai (±10), alors que celle indiquée par les nuages bas est repoussée au 25 juin (±24). De même, pour les dates moyennes de fin de la saison sèche, en se basant sur le rayonnement solaire ERA5, la date moyenne de fin est le 3 octobre (±22, identique à celle trouvée par le rayonnement solaire SARAH-2), mais avec les données de nuages bas, cette date moyenne est le 30 octobre (±13). Les données de précipitations, quant à elles, indiquent le 21 septembre (±10) comme date moyenne de fin de la saison sèche.

Ces dates moyennes varient donc fortement entre les produits et les sources utilisées (tableau III.2). Les données de rayonnement solaire indiquent des débuts et des fins de la saison sèche relativement précoces, tandis que les données de nuages bas tendent vers des dates plus tardives. Les données de précipitations montrent des dates intermédiaires. Nous constatons également que la saison sèche est plus longue lorsqu'elle est calculée à partir du rayonnement solaire SARAH-2 (140 jours), tandis qu'elle varie entre 124 et 128 jours dans les autres produits

(figure III.15). L'écart entre les quatre dates moyennes de début est de 39 jours, et il se réduit à 13 jours si l'on exclut la date moyenne des données sur les nuages bas. Notamment, cette date montre un retard de plus de 3 semaines que les dates moyennes dérivées des autres paramètres. Ces différences posent questions quant à la vitesse et la modalité d'évolution de ces différents paramètres lors de cette période de transition entre la saison des pluies et la saison sèche.

Tableau III. 2 - Dates moyennes de début et de fin de la saison sèche, et leur écart-type (jours), pour la période 1983-2020, en fonction de différents produits et variables climatiques utilisées.

	Rayonnement solaire SARAH-2	**Rayonnement solaire ERA5**	**Précipitations CHIRPS**	**Nuages bas ERA5**
Début				
Date moyenne	17 mai	30 mai	21 mai	25 juin
Ecart type (jours)	13	16	10	24
Fin				
Date moyenne	3 octobre	3 octobre	21 septembre	30 octobre
Ecart type (jours)	16	22	10	13

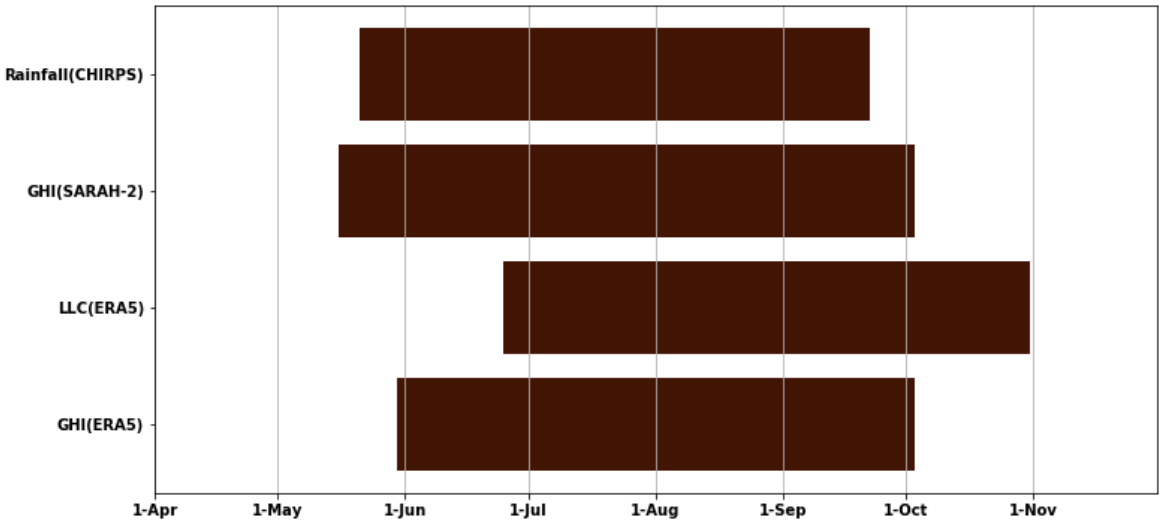

Figure III. 15 - Longueur moyenne de la saison sèche (1983-2020) à partir de différents produits utilisés (rayonnement solaire SARAH-2 et ERA5, précipitations CHIRPS, et les nuages bas ERA5).

Il est important de noter que la méthode des anomalies cumulées n'indique pas directement le dernier jour de pluie, mais marque plutôt le début d'une période avec moins de jours de pluie ou des pluies moins intenses. Dans ce contexte, nous pouvons proposer une hypothèse possible pour expliquer les différences observées. Suite à la cessation des pluies dans la région, la phase de transition entre la saison des pluies et la saison sèche commence selon les données de précipitations. Au cours de cette phase, la diminution progressive du nombre de

jours de pluie provient d'une diminution de la fréquence de nuages hauts et moyens au profit des nuages bas stratiformes qui, bien qu'ils ne soient pas précipitants, sont denses et opaques et entrainent une réduction des niveaux de rayonnement solaire, ce qui marque le début de la saison sèche au point de vue de rayonnement solaire. En outre, l'écart fort entre les dates issues des nuages bas et du rayonnement solaire SARAH-2 ou ERA5 est probablement lié à la sous-estimation par ERA5 de la quantité des nuages bas de juin à septembre, comme l'ont souligné Camberlin et al. (2023), alors que cette quantité était cohérente avec les observations en avril-mai. Par conséquent, cette sous-estimation peut conduire à un début plus tardif de la saison sèche.

Après avoir analysé les disparités entre les dates moyennes de début et de fin de la saison sèche, il convient d'examiner la cohérence dans la variabilité interannuelle des dates obtenues à partir de ces différents paramètres, ce qui peut être évalué par le calcul de corrélations linéaires. Il est logique de déduire qu'un début précoce de la saison sèche en termes de rayonnement solaire est probablement attribué à une apparition précoce de nuages bas et à une diminution précoce des précipitations.

D'autre part, nous avons trouvé une modeste corrélation mais significative à 95 % (R= 0.41) entre les dates de fin de la saison déterminées à partir du rayonnement solaire SARAH-2 et celles à partir du rayonnement solaire ERA5. En revanche, les dates de début n'ont pas montré de corrélation significative entre ces deux produits. Cela implique que la transition entre la saison des pluies et le début de la saison sèche présente moins de cohérence entre les deux ensembles de données que la transition entre la fin de la saison sèche et le début de la saison des pluies.

En ce qui concerne les dates de début issues de données de nuages bas, elles présentent une corrélation significative avec celles obtenues à partir du rayonnement solaire ERA5 (R= 0.47) et de SARAH-2 (R= 0.37). Cette constatation confirme notre hypothèse initiale selon laquelle un début précoce de la saison sèche selon le rayonnement solaire est effectivement associé à une apparition précoce des nuages bas. Par contre, aucune corrélation n'est observée entre les dates issues des données de précipitations et celles issues des nuages bas, que ce soit pour les dates de début ou de fin de la saison.

En fin de compte, notre analyse des divers paramètres climatiques pour détecter le début et la fin de la saison sèche, ainsi que leur variabilité interannuelle, souligne que la détermination précise de la transition entre la saison des pluies et la saison sèche en Afrique centrale occidentale reste difficile. Alors que ces paramètres sont essentiels pour caractériser la saison sèche dans la région, leur interaction et leurs corrélations mettent en évidence la nature complexe de ce changement saisonnier. La section suivante approfondit l'étude de la variabilité interannuelle de la saison sèche sur la base des anomalies cumulées.

5.3 Typologie de la saison sèche : une classification des années

À ce stade, une question cruciale se pose : Etant donné que l'approche des anomalies cumulées permet de caractériser chaque saison sèche en termes de dates de début et de fin, ainsi que de son caractère abrupt et de son amplitude, pouvons-nous différencier divers types de saisons sèches ? Cette question nous a incités à effectuer une classification de toutes les années

de la période 1983-2020 sur la base de la somme cumulée des anomalies de rayonnement solaire SARAH-2. En utilisant la méthode « Elbow » (Cui, 2020), nous avons trouvé que le nombre optimal de classes à retenir est 3. La figure III.16 montre les résultats de la classification K-means, avec les 3 types d'année extraits ainsi que leur enveloppe de variance et la moyenne sur toute la période.

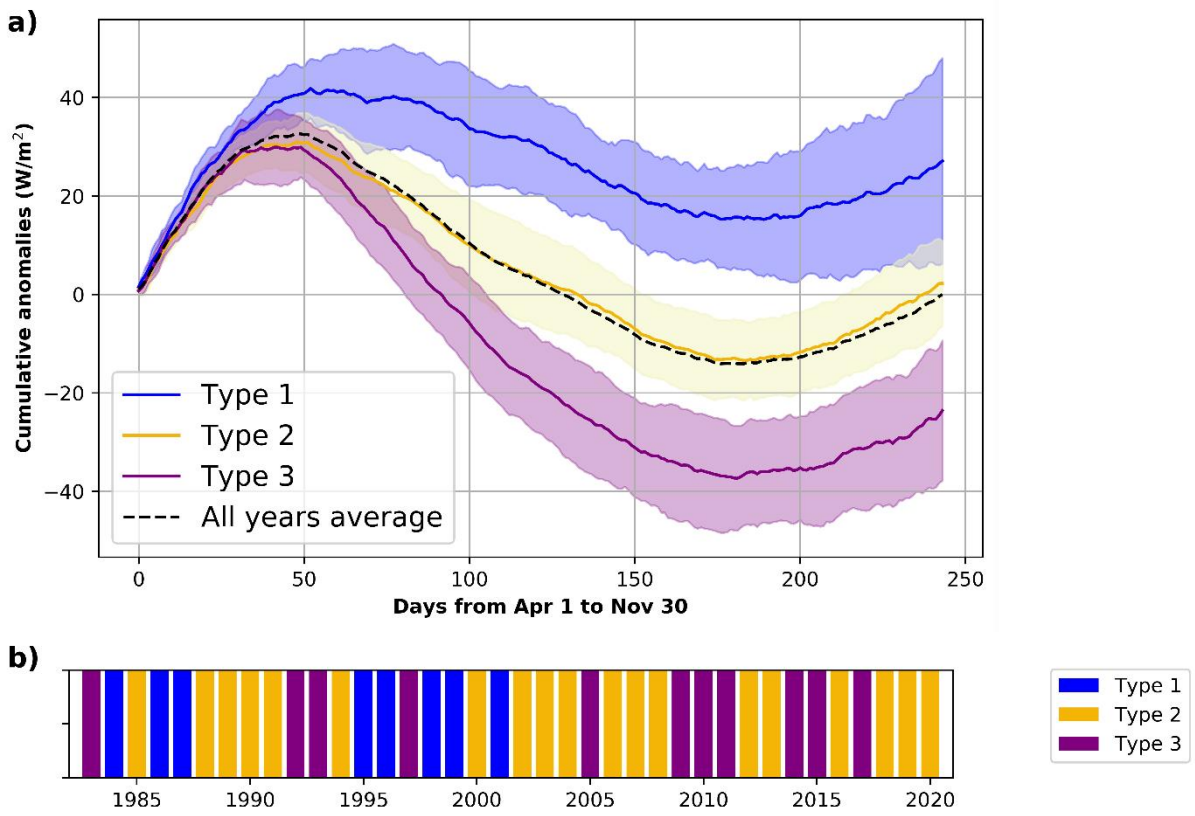

Figure III. 16 - Anomalies journalières cumulées composites de rayonnement (SARAH-2) pour chacune des 3 classes extraites par la classification K-means (panneau a). Chronologie des trois classes sur la période 1983-2020 (panneau b).

Le type 1, comprend 8 années exclusivement antérieures à 2001 (figure III.16b). Ces années se distinguent par des niveaux de rayonnement solaire anormalement élevés pendant la saison sèche, comme montré dans la figure III.16a, où toutes les valeurs cumulées des anomalies pour la période d'avril à novembre sont positives. Ces valeurs commencent à s'écarter de la moyenne dès début mai, une divergence notable apparaissant à la mi-mai (50ème jour), où elles sont déjà élevées d'environ 10 W/m². De plus, les années de type 1 se caractérisent par une saison sèche plus lumineuse que la normale, simultanément accompagnée d'un début de saison sèche retardé (de 15 jours en moyenne, tableau III.3) Ensuite, le type 2 se compose de 19 années (le plus fréquent, 50% des années de la période) caractérisées par des cumuls d'anomalies qui s'alignent étroitement avec la moyenne de l'ensemble des années. Enfin, le type 3 comprend 11 années, représentant les années les plus sombres de la période avec des niveaux de rayonnement solaire inférieurs à la moyenne (figure III.16a). Cette anomalie négative commence à apparaître au début du mois de mai et atteint une différence maximale par rapport

à une année moyenne d'environ 25 W/m² fin août - début septembre. Les années classées en type 3 se distinguent également par des débuts de saison sèche précoces (5 jours en moyenne).

Tableau III. 3 - Caractéristiques générales de la saison sèche selon les 3 types d'années. (Les dates sont dérivées de SARAH-2 sur la période1983-2020).

Types	Nombre d'année par type	Date moyenne	
		Début	Fin
Type 1	8 années (21%)	31-Mai	10-Oct
Type 2	19 années (50%)	16-Mai	30-Sept
Type 3	11 années (29%)	9-Mai	05-Oct

Pour confirmer ce constat, le tableau III.4 présente la matrice de contingence entre les trois types d'années et le type de début/fin de la saison sèche (tardive ou précoce). Il est à noter que 87.5% des années classifiées comme type 1 connaissent un début tardif de la saison sèche, tandis que 81.8% des années de type 3 commencent précocement la saison sèche. Les années de type 2 présentent des pourcentages plus équilibrés. En ce qui concerne les dates de fin, la majorité des années de type 1 (62.5%) montrent une fin tardive de la saison sèche. En revanche, les types 2 et 3 affichent des pourcentages équilibrés et similaires.

Tableau III. 4 - Tableau de contingence entre les 3 types d'année et le type de début et fin de la saison sèche, les pourcentages sont calculés par chaque type d'année.

Le début de la saison	**Type 1**	**Type 2**	**Type 3**
Précoce	12.5%	52.6%	81.8%
Tardif	87.5%	47.4%	18.2%
La fin de la saison	**Type 1**	**Type 2**	**Type 3**
Précoce	37.5%	47.4%	54.5%
Tardive	62.5%	52.6%	45.6%

5.4 Lien avec les cycles diurnes de rayonnement solaire

Ensuite, et afin de faire le lien entre échelles diurne, saisonnière et interannuelle, nous avons fait appel aux quatre types de cycles diurnes de rayonnement solaire (Obscur, obscur AM, Obscur PM et lumineux) définis dans la section I.2.2. La question centrale qui se pose dans cette section est de savoir comment les caractéristiques intrasaisonnières de la saison sèche (début, fin) et leur variabilité interannuelle se traduisent en termes de fréquence des types de cycles diurne de rayonnement solaire. Cela nous offre une perspective alternative pour la compréhension du déroulé de la saison sèche.

En utilisant des données horaires de rayonnement solaire SARAH-2, nous avons calculé pour chaque pixel de la région, les fréquences d'occurrence de ces 4 types de cycle diurne sur toute la période 1983-2020. La méthode employée ici est celle utilisée au chapitre II et décrite à la section I.2.2 ; la seule différence réside dans l'application de la méthode à l'échelle du pixel. La figure III.17 montre tout d'abord les moyennes, sur 10 jours avant et 10 jours après la date de début de la saison sèche (pour rappel calculée à l'échelle de la région Gabon-Congo), de la fréquence d'apparition des 4 types de cycles diurnes sur toute la période 1983-2020. Une figure similaire a été établie pour les dates de fin de la saison sèche (voir Annexe C).

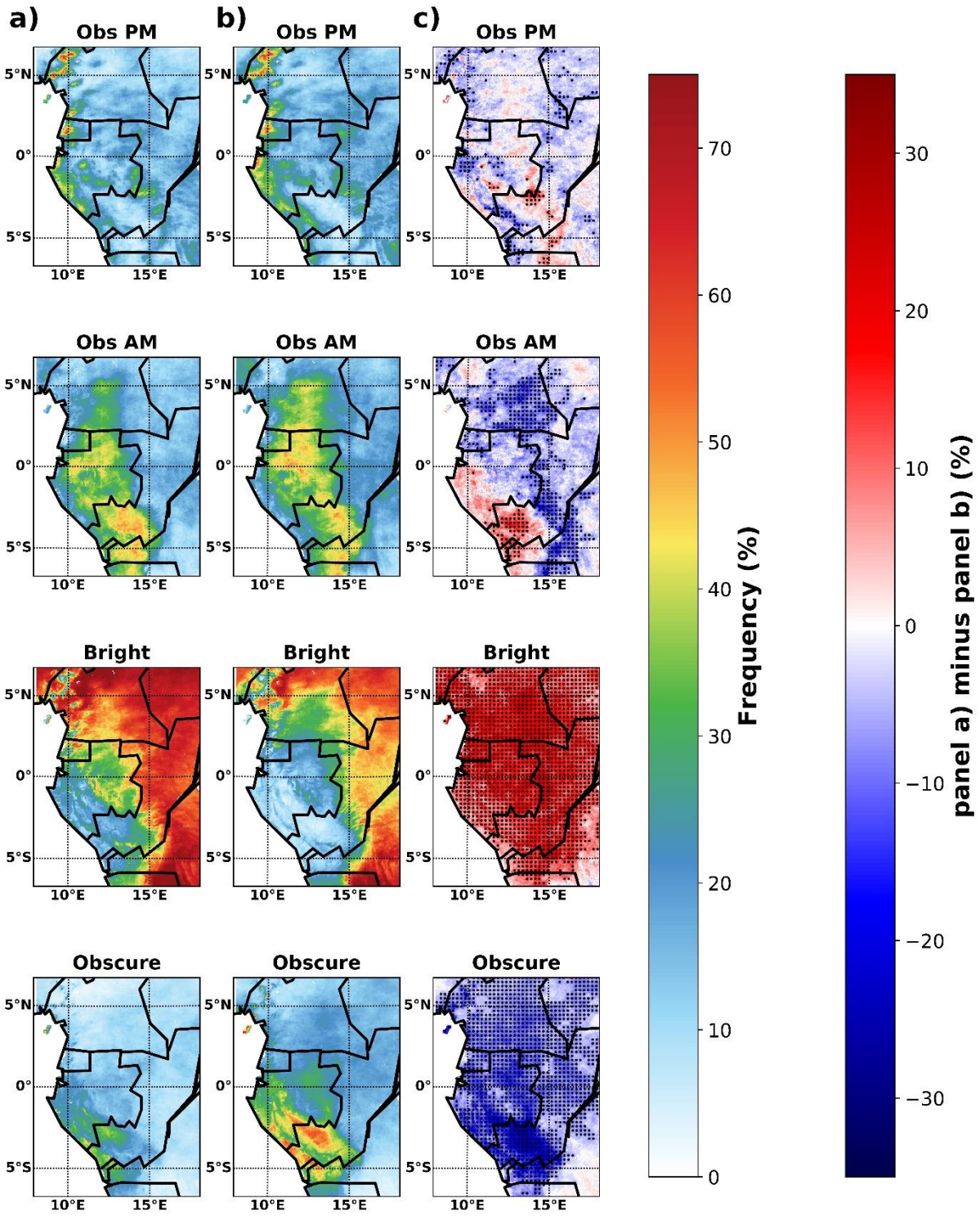

Figure III. 17 - Fréquences d'apparition des 4 types de cycle diurne de rayonnement solaire a) 10 jours avant et b) 10 jours après le début de la saison sèche sur la période 1983-2020. c) différence entre les panneaux a et b. Les points noirs indiquent les pixels présentant des différences significatives à un niveau de confiance de 95 % selon le test t de student.

Les résultats montrent des différences significatives notables dans les fréquences d'apparition des jours lumineux et obscurs lors de la transition vers la saison sèche. Avant le début de cette saison (figure III.17a), la région présente des fréquences relativement faibles de jours obscurs, avec quelques pourcentages modestes autour de 20 à 30 % près du massif Chaillu et le long de la façade Atlantique du Congo. À l'inverse, on observe davantage de jours lumineux sur toute la région, mais avec des fréquences d'apparition qui diminuent progressivement en se rapprochant du sud-ouest de la région. Après le début de la saison sèche (figure III.17b), la fréquence des jours lumineux diminue considérablement sur l'ensemble de la région, avec une diminution plus prononcée au sud du Gabon et à l'ouest du Congo. Cette diminution de la fréquence d'apparition des jours lumineux est compensée par une augmentation simultanée de la fréquence des jours obscurs. La plupart des différences observées pour ces deux types (figure III.17c) sont significatives dans l'ensemble de la région, à l'exception d'une petite zone dans le sud-est de la région (en particulier en RDC). Ceci peut s'expliquer, comme mentionné précédemment, par le fait que les pixels de cette région ne présentent pas la même climatologie que les pixels à l'ouest de la région (cf. figure B.1 en Annexe B). Par ailleurs, les jours obscurs le matin (Obs AM) connaissent une diminution de 7 à 15 % au sud-ouest du Gabon-Congo le long de la façade atlantique (significative uniquement au sud-ouest du Congo), tandis que leur occurrence augmente dans les autres parties de la région (figure III.17c). Les jours obscurs l'après-midi (Obs PM) qui sont globalement les moins fréquents montrent peu de changements significatifs, plutôt sur l'Est du Gabon, sur le Massif de Chaillu et la plaine littorale.

En ce qui concerne la fin de la saison sèche (Annexe C), le schéma est globalement inverse aux dates de début, mais avec une différence plus nette pour les jours Obs AM. Dans l'ensemble, ces différences soulignent clairement la transition vers la saison sèche et valident d'autant plus la méthode utilisée pour détecter ces dates de début et de fin de la saison sèche.

Cette analyse est complétée par l'examen de la fréquence de mai à novembre des quatre types de cycles diurnes de rayonnement solaire pour les trois types d'années identifiés précédemment en fonction des caractéristiques de la saison sèche. Les séries temporelles des fréquences d'occurrence pour chaque type de cycle diurne selon les trois types d'années sont représentées sur la figure III.18. Ces cycles sont calculés à partir d'un indice régional moyen sur la zone d'étude (6°S, 3°N ; 8°-18°E).

Les années de "type 1" c'est à dire à saison sèche anormalement lumineuse, présentent des caractéristiques spécifiques. Elles se distinguent par un pourcentage beaucoup plus élevé de jours obscurs le matin (Obs AM) atteignant 40% au mois du juin. De plus, ces années de "type 1" se caractérisent par moins de jours obscurs et plus de jours lumineux en début de saison (mai-juillet). Ces trois points expliquent notamment la date plus tardive de début de la saison sèche. En contraste, les années de "type 3" montrent des fréquences plus élevées de jours obscurs entre mai et septembre, associées à moins de jours lumineux pendant cette période. Notamment, la fréquence des jours obscurs dans le "type 3" augmente rapidement après mi-mai (moins de 20% début mai à plus de 40% en juin), tandis que la fréquence des jours lumineux diminue fortement à partir de cette même date (40% début mai à moins de 15% début juin). Enfin il est important de remarquer qu'à partir du début du mois d'août, les fréquences

d'occurrence des jours lumineux et obscurs se rapprochent considérablement les unes des autres pour les 3 types d'années, reflétant ainsi une certaine similarité sur cette seconde partie de saison et suggérant que le type de saison est surtout déterminé par les modulations de fréquence des types diurnes en 1ère partie de saison.

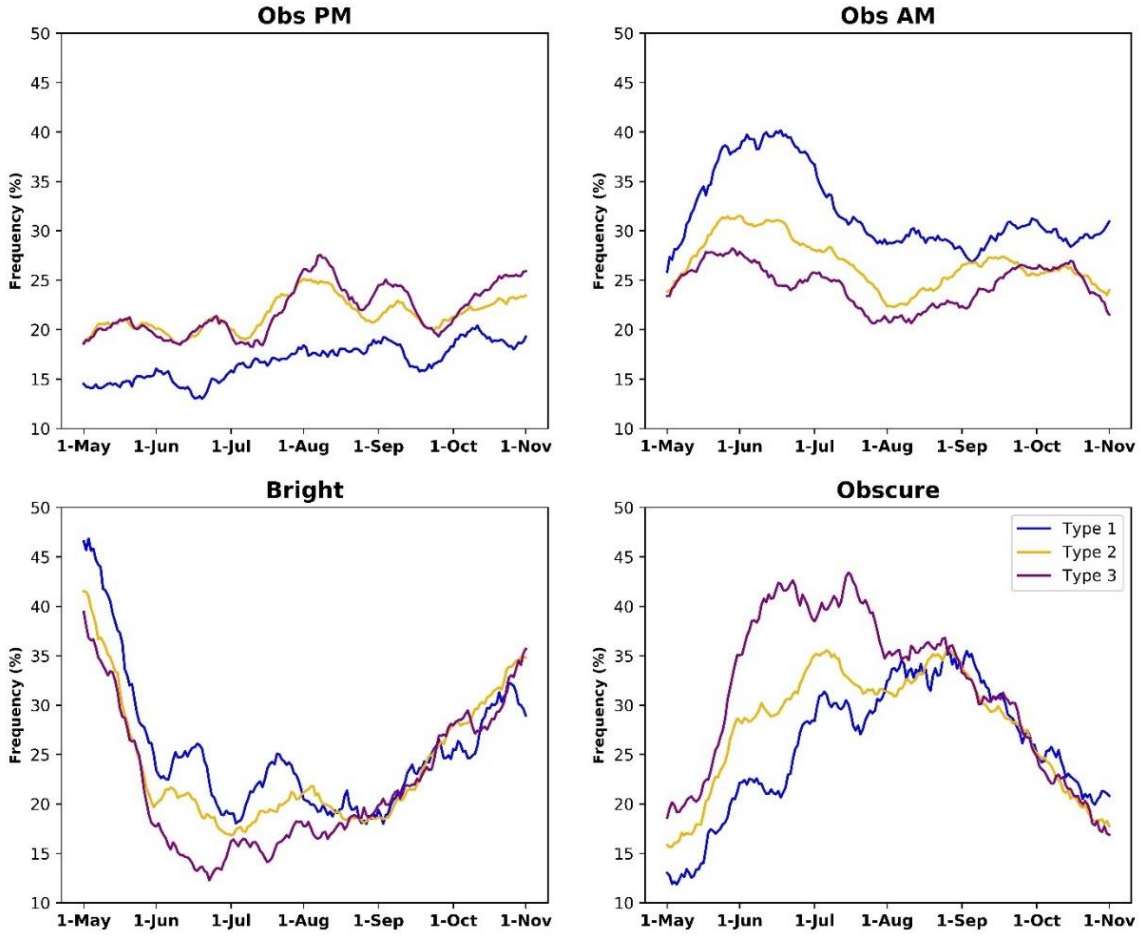

Figure III. 18 - Séries temporelles de mai à novembre des fréquences d'occurrence de chaque type de cycle diurne selon les 3 types d'années. Une moyenne mobile de 15 jours a été appliquée sur les séries temporelles.

Ces résultats révèlent que la classification des trois types d'années en fonction des caractéristiques de la saison sèche, particulièrement en fonction de la somme cumulée des anomalies journalières de rayonnement solaire, s'aligne avec l'approche en cycle diurne. La classification des trois types d'années est basée sur la forme des courbes représentant les anomalies cumulées, plutôt que sur les dates de début ou de fin de la saison sèche. Cette fusion des trois types d'années avec les quatre types de cycles diurnes offre une perspective plus complète sur la manière dont les pourcentages d'apparition des quatre types de cycles diurnes varient tout au long de la saison sèche. En outre, elle fournit un aperçu complet de cette variation pour chaque type d'année indépendamment, ce qui fait de l'approche en cycle diurne un complément précieux à l'approche des anomalies cumulées.

Sachant que l'atmosphère aux latitudes tropicales est très sensible aux conditions de surface, et compte tenu de l'impact des anomalies de SST tropicales sur la variabilité interannuelle des saisons des pluies, il est possible que la variabilité de la saison sèche au Gabon-Congo puisse être influencée par les SST. La question qui se pose est de savoir si les trois types d'années identifiés étaient associés à des anomalies spécifiques des SST. En outre, les conclusions de Camberlin et al. (2023) et de Moron et al. (2023) indiquent que la fréquence des nuages bas est influencée par les SST de l'océan Atlantique et Pacifique. Par conséquent, il est raisonnable d'anticiper des signaux similaires pour le rayonnement solaire au cours de cette saison, étant donné sa dépendance vis-à-vis de la couverture nuageuse basse.

6 Liens avec les températures de surface de la mer

Les données de température de surface de la mer (SST) à partir des réanalyses ERA5 sont utilisées afin d'étudier la relation entre les dates de début et de fin de la saison sèche et les variations des SST. Dans un premier temps, nous avons effectué une analyse de corrélation spatiale entre les dates de début et de fin de saison sèche et les anomalies mensuelles de SST sur la période 1983-2020, pour les mois d'avril à juillet pour les dates de début de la saison sèche (figure III.19) et pour les mois d'août à novembre pour les dates fin de la saison sèche (figure III.20)

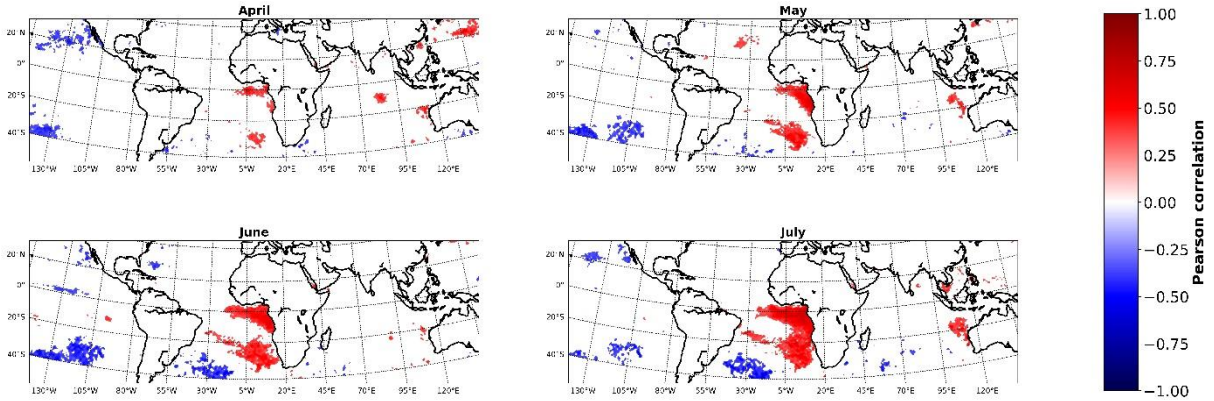

Figure III. 19 - Corrélations spatiales entres les anomalies mensuelles de SST et les dates de début de la saison sèche sur la période 1983-2020 d'avril à juillet. Seules les corrélations significatives à 95% sont affichées.

Les résultats (figure III.20) montrent une relation significative entre la variabilité interannuelle des dates de début de la saison sèche et les températures de surface de la mer dans l'Atlantique équatorial. En avril, des corrélations positives de faible étendue le long de l'équateur sont observées. En mai, ce signal atteint la région côtière s'étendant de 0° à 10°S, et élargissant sa présence le long de la bande équatoriale ; ce signal se renforce ensuite en juin. En outre, il convient de noter qu'un autre pôle de corrélations positives, situé plus au sud vers l'anticyclone de Sainte-Hélène (25°S - 10°W), s'intensifie et s'étend vers le nord-est de mai à juin. Enfin, en juillet, la présence du signal devient encore plus prononcée, englobant tout l'océan Atlantique tropical sud jusqu'au golfe de Guinée, et s'étendant vers l'ouest jusqu'à 5°W. Le signe des corrélations, positif, indique que plus les températures de surface de l'océan Atlantique tropical sud sont élevées, plus la date de début de la saison sèche est retardée.

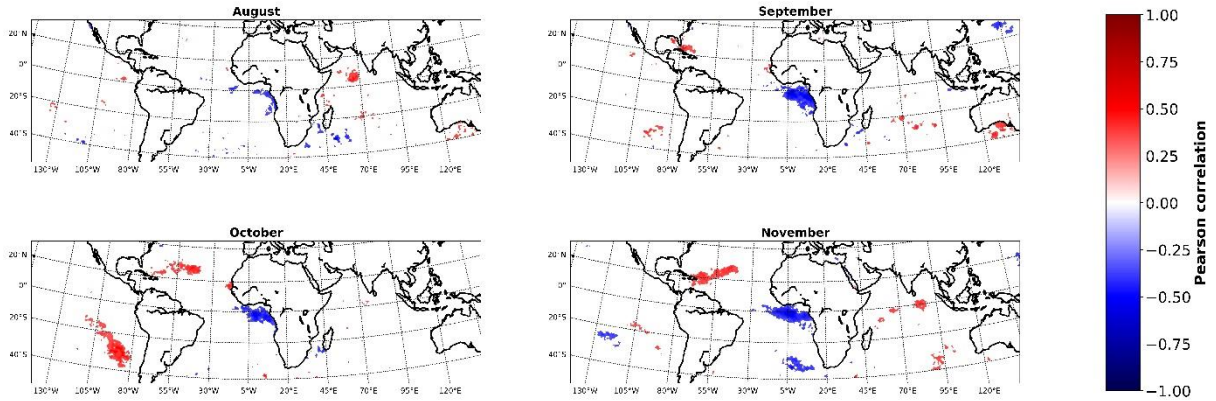

Figure III. 20 - Identique à la figure III.19, mais pour les dates de fin de la saison sèche sur la période 1983-2020 d'août à novembre.

De même, nous observons une influence directe des températures de surface de l'océan Atlantique équatorial sur la variabilité interannuelle des dates de fin de la saison sèche (figure III.20). Plus précisément, lorsque les températures de surface sont plus froides, la date de fin de la saison a tendance à être plus tardive. Il est intéressant de noter que le signal observé dans le cas des dates de fin présente une échelle spatiale plus petite que celui observé pour les dates de début de la saison sèche. Notamment, ce signal ne s'étend pas jusqu'à 30°S.

Nous avons également calculé des corrélations entre les dates de début et de fin et les indices Niño 3 et Niño 3.4, mais en accord avec les figures précédentes, aucune des corrélations n'est significative. Alors que Moron et al. (2023) ont trouvé des corrélations significatives entre les nuages bas, l'Atlantique tropical Sud et le Pacifique équatorial.

Dans une étape suivante nous nous appuyons sur les trois types d'année que nous avons identifiées. La figure III.21 représente la différence entre les anomalies de température de surface de la mer des années de type 3 (identifiées comme anormalement obscures) et celles de type 1 (identifiées comme anormalement lumineuses). L'utilisation de ces trois types d'années en conjonction avec les composites d'anomalies SST permet de suivre l'évolution des anomalies de SST tout au long du déroulé de la saison sèche.

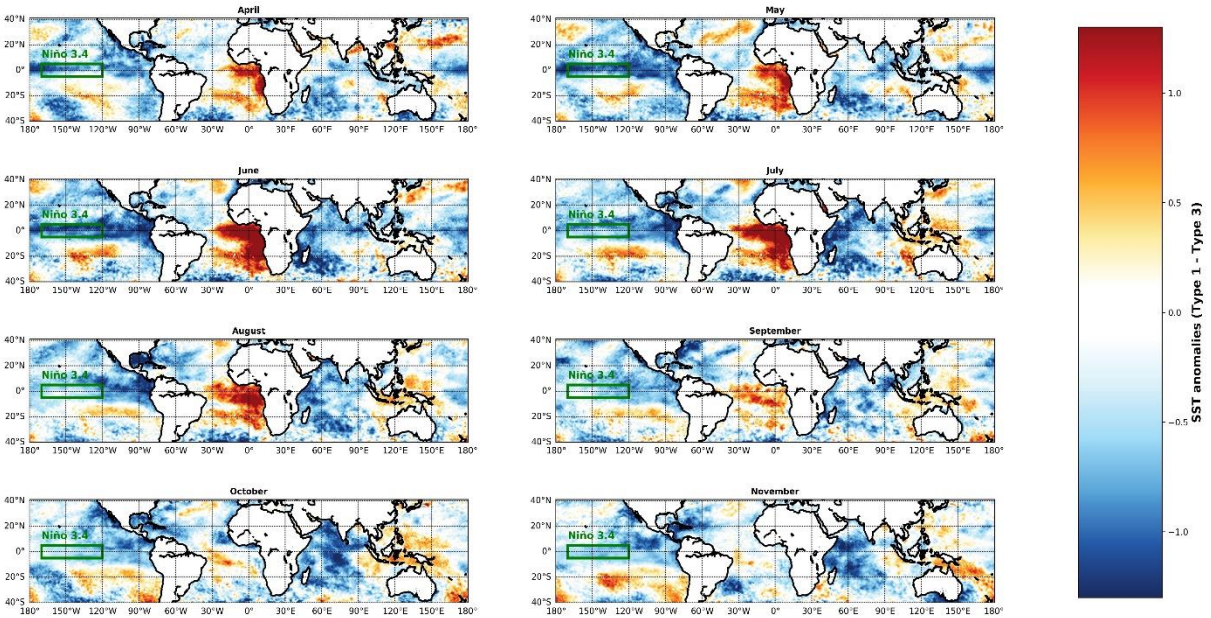

Figure III. 21 - Différence entre les anomalies mensuelles de température de surface de la mer pour les années de type 1 et celles pour les années de type 3 (le cadre vert indique la région du Niño 3.4). Toutes les différences supérieures à 0.58°C et inférieures à -0.58°C sont significatives à 95% selon le test Wilcoxon-Mann-Whitney.

D'après les résultats (figure III.21), nous retrouvons sur l'océan Atlantique, des anomalies positives significatives entre avril et août, atteignant leur intensité maximale en juin-juillet (plus de 1°C). Ce signal s'étend jusqu'à 20° S et 30° W. De plus, la différence positive entre les deux types montre que la température de surface de l'océan est plus élevée pour les années de type 1 (c'est-à-dire les années avec une saison sèche anormalement lumineuse) que pour celles de type 3. Compte tenu des résultats du tableau III.3 et ainsi que les résultats des figures III.19 et III.20, nous concluons que plus la température de l'océan Atlantique équatorial est élevée, plus le début de la saison sèche est tardif et plus celle-ci va également être anormalement lumineuse.

Sur le Pacifique équatorial et notamment la région du Niño 3.4, les anomalies les plus marquées (mais qui restent inférieures à 1°C) se limitent aux mois de mai et juin.

À noter que les différences entre chacun de ces deux types et le type 2 ont également été faites mais n'ont pas montré d'écarts importants (voir Annexe C). En raison de la répartition inégale de nombre des années dans les trois types (cf. tableau III.3), l'application du test t de Student pour évaluer la signification de la différence n'était pas possible, car ce test n'est pas applicable à des échantillons de tailles différentes. Par conséquent, nous avons opté pour le test de Wilcoxon-Mann-Whitney comme alternative appropriée.

7 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons examiné dans un premier temps la variabilité interannuelle du rayonnement solaire pendant la saison sèche en Afrique centrale en utilisant les données de rayonnement solaire provenant du produit satellitaire SARAH-2 et les réanalyses ERA5 sur la période de 1983 à 2020, pour le but de comprendre l'évolution à long terme du rayonnement solaire pendant la saison sèche et les facteurs qui déterminent cette évolution. Dans un deuxième temps, nous avons identifié les dates de début et de fin de la saison sèche, en analysant leurs variations d'une année à l'autre et en distinguant les années présentant des dates de début ou de fin particulières ainsi que leurs connexions avec les températures de surface de la mer dans le but de connaitre les facteurs clés qui définissent les dates de cette saison sèche.

Dans la première partie du chapitre, nous avons constaté que SARAH-2 et ERA5 présentaient une variabilité interannuelle et des tendances différentes de rayonnement solaire. SARAH-2 montre une tendance à la baisse (significative uniquement en juillet et septembre) avec un assombrissement dans les années 2010, tandis qu'ERA5 montre une tendance à la hausse significative pour tous les mois, avec une rupture notable dans les années 1995. Cette différence de tendance entre les deux produits est certainement liée aux méthodes de calcul et d'estimation utilisées dans les algorithmes de chacun d'entre eux. À ce stade, l'absence de données in-situ à long terme dans la région ne permet pas de valider l'un ou l'autre des produits.

En outre, nous avons observé des tendances à la baisse de la couverture nuageuse basse pendant la saison sèche. Les corrélations entre les premières composantes principales (PC1) des nuages bas et du rayonnement solaire étaient négatives et significatives dans la plupart des mois. Ces corrélations négatives indiquent que lorsque les niveaux de rayonnement solaire diminuent (augmentent), la couverture nuageuse basse augmente (diminue). Cependant, un scénario contradictoire est apparu en août, où une corrélation positive a été observée entre les deux PC1. Pour expliquer cela, nous avons émis l'hypothèse qu'en août, lorsque les nuages bas diminuent, d'autres types de nuages augmentent, ce qui pourrait favoriser une diminution des niveaux de rayonnement solaire dans la région pendant ce mois. Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas pu vérifier l'exactitude de cette hypothèse.

De plus, les corrélations entre les PC1 des aérosols (AOD) à 550nm et du rayonnement solaire ont ajouté une autre dimension à notre compréhension de la variabilité interannuelle du rayonnement solaire. En effet, les corrélations positives entre les deux variables dans certains mois indiquent que les AOD ne sont pas à l'origine des tendances dans le rayonnement solaire au cours de cette période et confirme que d'autres types de nuages ou des facteurs atmosphériques pourraient influencer les niveaux de rayonnement solaire dans la région. En résumé, l'analyse des AOD a permis d'apporter des éclaircissements sur les mécanismes qui déterminent les variations du rayonnement solaire en Afrique centrale pendant la saison sèche.

Cette première partie du chapitre a donné un premier aperçu de la variabilité interannuelle du rayonnement solaire dans la région, offrant des aperçus préliminaires qui peuvent servir de base à de futures études. Il est admis que la rareté, voire l'absence, de données in situ à long terme introduit un niveau d'incertitude. Néanmoins, notre étude s'est efforcée de répondre à cette incertitude en utilisant les données disponibles.

La deuxième partie du chapitre s'est concentrée sur l'identification des dates de début et de fin de la saison sèche en utilisant la méthode des anomalies cumulées (AA) et en se basant sur des données journalières de rayonnement solaire de SARAH-2. Nous avons également procédé à une comparaison des dates dérivées des données de rayonnement solaire et celles trouvées à partir d'autres paramètres tels que les précipitations et les nuages bas. De plus, une classification des années selon les caractéristiques de la saison sèche a été élaborée, suivie d'une exploration de la relation entre ces dates et les températures de surface de l'océan.

L'analyse des dates de début et de fin de la saison sèche a révélé des informations intéressantes. La méthode des anomalies cumulés (AA) s'est révélée être une méthode pertinente pour déterminer le début et la fin de la saison sèche. En particulier, avec SARAH-2 on obtient une date moyenne de début de la saison sèche le 17 mai, et une date moyenne de fin le 3 octobre. Ces dates ne montrent aucune tendance significative, certaines années s'écartant de la norme avec des débuts retardés (1986-1988, 1998-1999 et 2007) ou des fins précoces (1984/1985, 1992/1993, 2004, 2012, 2018 et 2020).

En outre, la comparaison de ces dates avec celles dérivées d'autres paramètres tels que les précipitations et les nuages bas a mis en évidence l'interaction complexe entre les différents facteurs climatiques. On a détecté des débuts de saison sèche plus précoces avec les données de rayonnement solaire plutôt qu'avec les données de nuages bas.

De plus, et à travers la classification K-means, nous avons classé les années en 3 types distincts sur la base des caractéristiques de la saison sèche. Les années de type 1 présentent des saisons sèches exceptionnellement lumineuses associées à des débuts tardifs, tandis que les années de type 3 se caractérisent par des saisons sèches plus sombres que la normale avec des débuts précoces. La relation entre ces types et les types de cycles diurnes s'est avérée importante. Le changement de fréquence des jours lumineux et obscurs autour du début et la fin de la saison sèche renforce la confiance dans les dates détectées. En effet, les années de type 1 (caractérisées par une saison sèche anormalement lumineuse) ont des fréquences élevées de jours lumineux et obscurs le matin, tandis que les années de type 3 (caractérisées par une saison sèche anormalement sombre) ont des fréquences élevées de jours obscurs.

En outre, notre exploration du lien entre les températures de surface de la mer (SST) et les dates de démarrage et fin de la saison sèche a révélé une relation positive forte. Les températures plus élevées de l'océan Atlantique équatorial sont liées avec des débuts tardifs de la saison sèche et par conséquence une saison sèche plus lumineuse que la normale. D'autre part, aucune relation notable n'a été observée entre les dates de début et fin de la saison sèche et les indices de Niño.

Chapitre IV. La représentation du rayonnement solaire en Afrique centrale occidentale dans les simulations historiques CMIP6

Dans ce chapitre, la variabilité du rayonnement solaire dans les modèles climatiques globaux CMIP6 pour la période historique a été étudiée. Plus précisément, c'est la capacité de ces modèles climatiques à estimer le rayonnement solaire dans la région et à reproduire ces variations spatiotemporelles moyennes qui a été examinée. De plus, le lien avec plusieurs facteurs climatiques qui contrôlent le rayonnement a été fait pour comprendre comment ces variables interagissent entre elles dans ces modèles.

Sommaire

1 Aperçu et contexte 103
2 Rayonnement solaire dans les simulations historiques CMIP6 104
3 La nébulosité dans les simulations CMIP6 et lien avec le rayonnement 111
4 Interactions avec les températures de surface de la mer (SST) 120
5 Conclusion du chapitre 127

1 Aperçu et contexte

Dans les chapitres II et III, nous avons examiné en détail la variabilité spatiotemporelle du rayonnement solaire sur diverses échelles temporelles, en mettant particulièrement l'accent sur la longue saison sèche de juin à septembre. S'appuyant sur un ensemble de données comprenant à la fois des données d'observation et des estimations satellitaires, ainsi que des réanalyses, ces chapitres ont permis une compréhension approfondie de la dynamique du rayonnement solaire dans la région d'Afrique centrale. En outre, ils ont fourni des informations importantes sur ses caractéristiques au cours de la saison sèche.

Sur cette base, le présent chapitre étend l'étude aux modèles climatiques globaux CMIP6. La question de savoir si les modèles CMIP6 capturent correctement le cycle saisonnier de rayonnement solaire dans le contexte du climat d'Afrique centrale reste importante.

Les modèles CMIP6, fournissent un très riche ensemble de données couvrant une longue période historique ainsi que des scénarios futurs. Ces simulations sont une ressource fondamentale pour la recherche sur le climat, rendue possible par les efforts coordonnés de nombreuses institutions. Pour une région comme l'Afrique centrale, où les données in-situ sont rares, l'importance de la validation de ces modèles sur la période historique est sans équivoque et ouvre la voie à des recherches plus approfondies.

Alors qu'un grand nombre d'études ont évalué la capacité des simulations CMIP6 à reproduire la variabilité du rayonnement solaire dans différentes régions du monde (Onsum Moseid et al., 2020 ; Wang et al., 2022 ; He et al., 2023 ; Li et al., 2023 ; Chtirkova et al., 2022 ; Olusegun et al., 2023), il n'existe aucune étude pour l'Afrique centrale. À ce jour, seuls Camberlin et al. (2023) ont évalué la capacité des modèles CMIP6 à reproduire la variabilité des nuages bas en Afrique Centrale, ou Nooni et al., 2023, qui ont évalué la performance de ces modèles à reproduire la variabilité des précipitations pour l'ensemble du continent africain. Par conséquent, la principale originalité de cette étude réside dans l'analyse de simulations historiques de rayonnement solaire, jusqu'à présent inexploitées pour la région. Ce chapitre représente donc un ajout très important à cette analyse climatique de la région et permet d'envisager l'étude de l'impact du changement climatique sur la région.

L'objectif principal de ce chapitre est double : premièrement, évaluer la compétence de huit simulations historiques CMIP6 à estimer le rayonnement solaire et reproduire son évolution saisonnière, ces huit modèles ont été choisis sur la base de leur capacité à simuler le rayonnement solaire et les nuages bas, comme l'ont montré des recherches antérieures (cf. section I.1.3), ainsi que la disponibilité de simulations englobant à la fois le rayonnement solaire et les nuages bas ; deuxièmement, comprendre quels sont les facteurs clés qui influencent le rayonnement solaire dans les modèles. Les résultats de ce chapitre ouvrent la voie à l'identification des modèles les plus appropriés pour étudier le rayonnement solaire en Afrique centrale sous scénarios SSP.

Dans ce chapitre, nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

- Comment le rayonnement solaire varie-t-il en Afrique Centrale selon les modèles climatiques CMIP6 ?
- Ces modèles reproduisent-ils bien les variations spatiotemporelles moyennes du rayonnement solaire dans la région ? Et quelles différences avec les observations ?
- Etant donné que les nuages bas sont très présents sur la région pendant la saison sèche et qu'ils présentent des biais plus ou moins prononcés dans les modèles (Camberlin et al., 2023), dans quelle mesure les variations simulées du rayonnement solaire sont-elles expliquées par celles de la nébulosité, basse en particulier.
- Quel rôle jouent les températures de surface de la mer dans cette variabilité ?

Telles sont les questions qui guident notre exploration. Afin d'y répondre, plusieurs analyses comparatives de validation ont été effectuées dans les sections suivantes.

2 Rayonnement solaire dans les simulations historiques CMIP6

Dans cette section, nous effectuons une analyse comparative des données de rayonnement solaire provenant de huit modèles climatiques CMIP6 : GFDL-ESM4 (GFDL ci-après), E3SM-1-1, E3SM-2-0, IPSL-CM6A LR (IPSL ci-après), CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, CESM2, et MIROC6 (plus de détail en section I.1.3). Pour évaluer la performance de ces modèles, nous utilisons les données satellitaires SARAH-2 comme référence. SARAH-2 est choisi en raison de sa capacité à représenter avec précision la variabilité du rayonnement solaire en Afrique centrale (cf. chapitre II), de sa résolution spatiale plus fine et de la disponibilité de données sur la période d'étude (cf. section I.1.2.1). Il convient toutefois de noter que SARAH-2 a tendance à surestimer les niveaux de rayonnement solaire dans la région.

Notre objectif principal est d'évaluer la capacité de ces modèles à reproduire les variations spatiales annuelles et saisonnières moyennes du rayonnement solaire dans la région Gabon-Congo (6°S, 3°N ; 8°-18°E, voir le panneau « a » de la figure IV.1), par rapport à SARAH-2. Le rayonnement solaire pendant la saison sèche juin-septembre (JJAS) est d'abord examiné sur la région large englobant le Golfe de Guinée et l'ensemble de l'Afrique Centrale et ses marges nord et sud. Ainsi la figure IV.1 donne le champ moyen en JJAS dans SARAH-2 et les 8 modèles CMIP6.

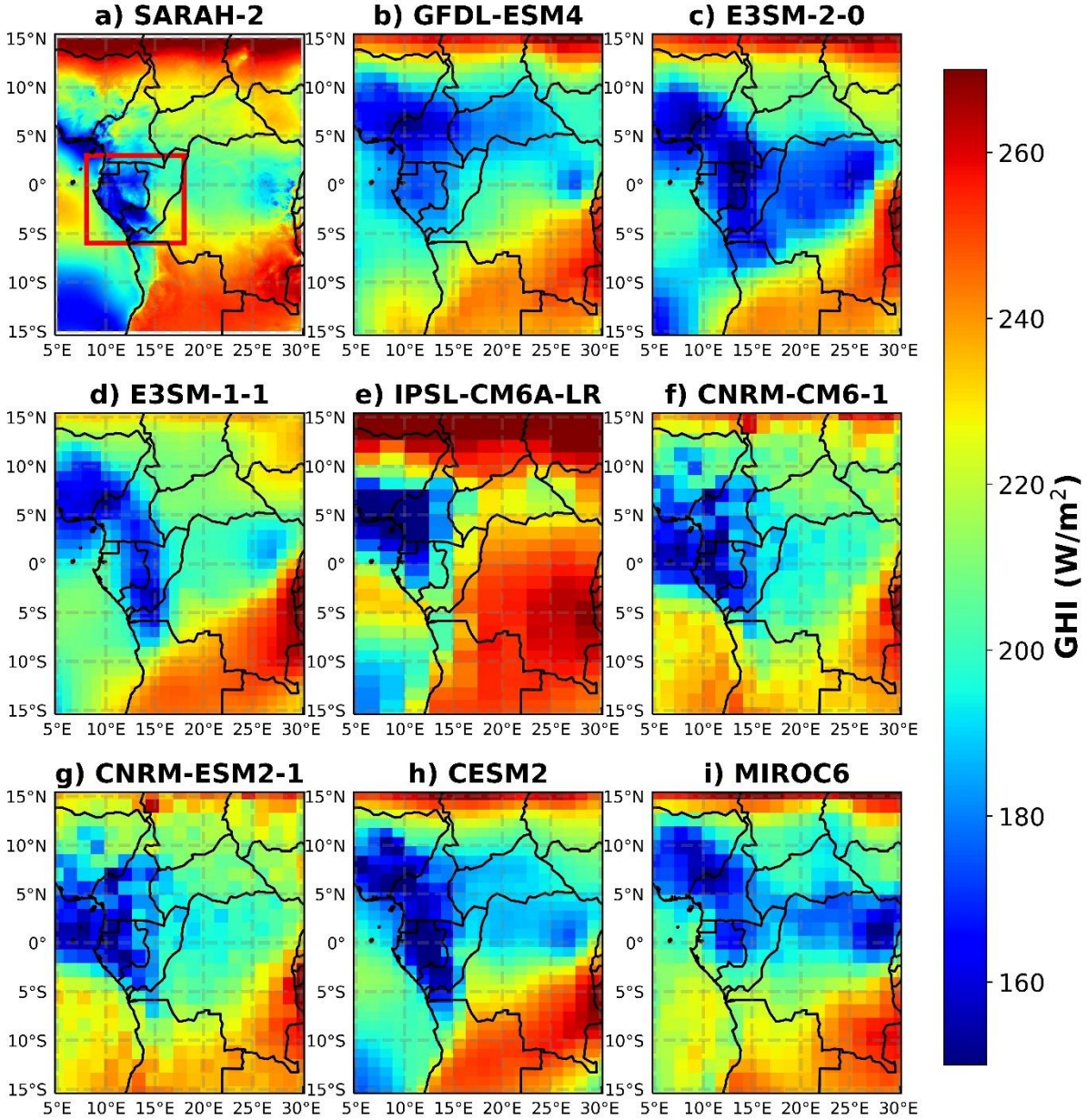

Figure IV. 1 - Moyenne du rayonnement solaire en JJAS (en W/m^2) pour SARAH-2 (a) et les modèles CMIP6, GFDL-ESM4 (b), E3SM-2-0 (c), E3SM-1-1 (d), IPSL-CM6A-LR(e), CNRM-CM6-1(f), CNRM-ESM2-1(g), CESM2 (h), et MIROC6 (i). Les moyennes sont calculées sur la période 1983-2014. Le cadre rouge dans le panneau (a) représente la région centrée sur le Gabon Congo (6°S, 3°N ; 8°-18°E).

Le champ moyen de rayonnement solaire en JJAS sur l'Afrique centrale, tel que représenté par SARAH-2 (Figure IV.1), montre des gradients marqués à travers la région. Dans le bassin du Congo, des niveaux modérés de rayonnement solaire sont observés (~220 W/m²), tandis que les marges nord ont des niveaux de rayonnement solaire plus élevés dépassant 250 W/m². La région Gabon-Congo (cadre rouge dans la figure IV.1) est la région la moins lumineuse d'Afrique centrale, recevant en moyenne moins de 200 W/m² en JJAS. Il convient de noter que SARAH-2 a tendance à surestimer le rayonnement solaire dans cette région

d'environ 20-30 W/m². SARAH-2 montre également un gradient est-ouest avec une transition brutale près de 15°E. Au niveau de l'océan Atlantique, SARAH-2 montre des niveaux de rayonnement solaire plus élevées vers le rail équatorial et des niveaux faibles au fond du golfe de Guinée au nord et au sud de l'équateur. Cette représentation spatiale de rayonnement solaire SARAH-2 dans la région est en accord avec celle représentée au chapitre II en figure II.2h pour la période 2005-2015.

Les modèles CMIP6 montrent des difficultés à reproduire ces caractéristiques de la répartition spatiale du rayonnement solaire moyen en JJAS dans la région (figures IV.1 et IV.2). Au niveau du continent, seuls le modèle E3SM-1-1 et les deux modèles du CNRM présentent un champ moyen qui semble à peu près réaliste, suivis de CESM2 qui montre des niveaux de rayonnement solaire faibles sur le bassin. Cependant, il est le modèle qui présente la corrélation spatiale la plus élevée (R=0.83) et la RMSE la plus faible par rapport aux autres modèles (20.34 W/m² ; figure IV.2).

Au niveau de l'océan Atlantique, le CESM2 et l'IPSL reproduisent bien le schéma spatial de rayonnement solaire tel qu'il est représenté par SARAH-2 (figure IV.1). Cependant, une différence dans les champs spatiaux du rayonnement solaire entre i) le sud de l'océan atlantique tropical ii) et autour du Golfe de Guinée sont remarquables (figure IV.2). Notamment, tous les modèles présentent une sous-estimation du rayonnement solaire dans le Golfe de Guinée et aux alentours de l'équateur. Cependant, l'étendue et l'intensité de cette sous-estimation diffèrent d'un modèle à l'autre. Pour GFDL, E3SM-2-0, E3SM-1-0 et CESM2, la sous-estimation s'étend jusqu'à 7°S. En revanche, pour les autres modèles, cette sous-estimation s'arrête vers 4°-5°S (figure IV.2). Les deux modèles du CNRM : CNRM-CM6-1 et CNRM-ESM2-1, en particulier, présentent la sous-estimation la plus prononcée, avec des différences dépassant 60 W/m². Ces deux modèles présentent également des corrélations spatiales faibles (R=0.6 pour CNRM-CM6-1 et R=0.63 pour CNRM-ESM2-1) et des RMSE plus élevées par rapport aux autres modèles (26.34 W/m² et 24.90 W/m², respectivement).

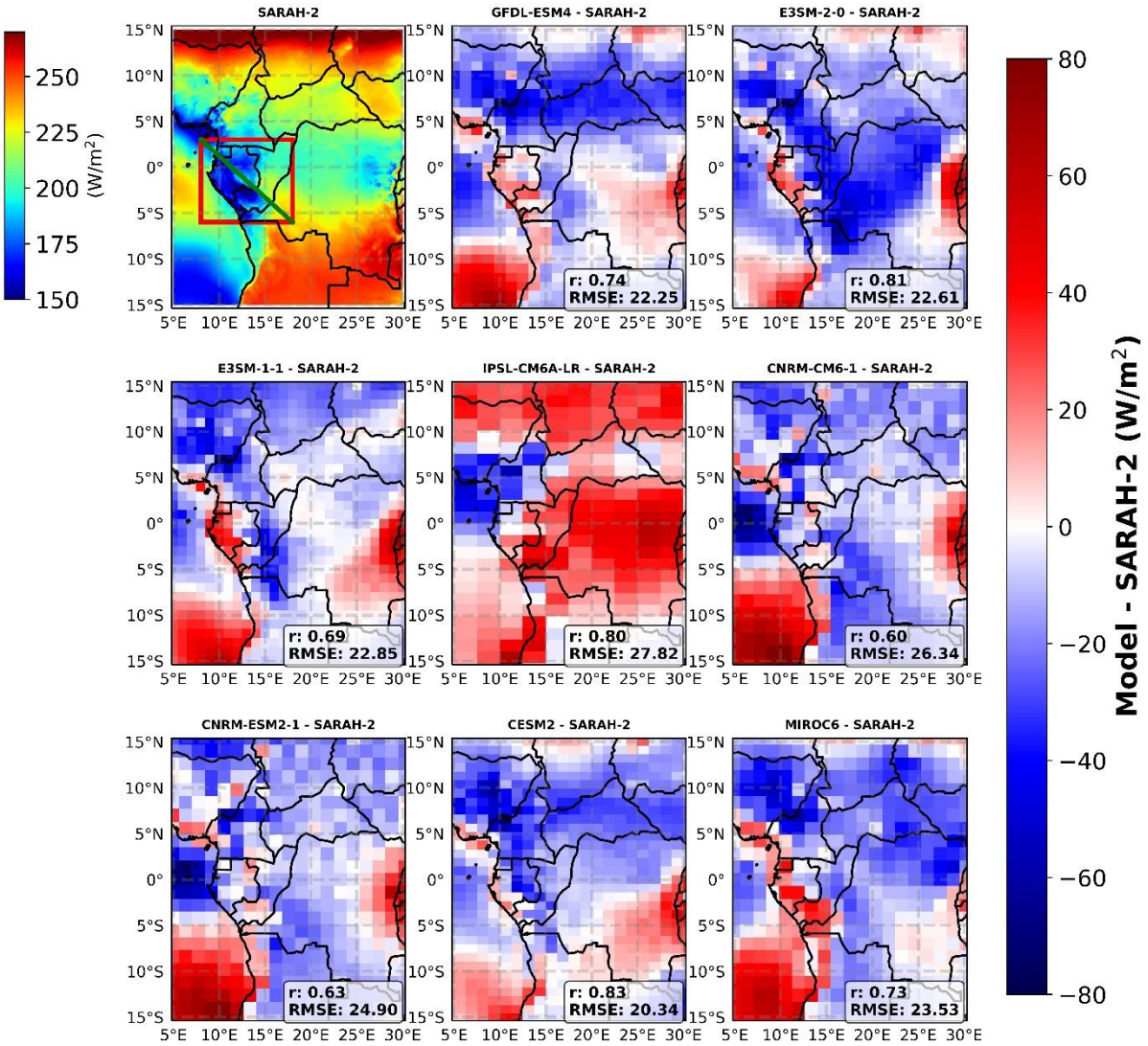

Figure IV. 2 - Différences entre les moyennes JJAS de rayonnement solaire des modèles et SARAH-2. Les différences sont calculées sur la période 1983-2014, le premier panneau montre la moyenne du rayonnement solaire SARAH-2 sur cette période. Le cadre rouge dans le panneau (a) représente la région Gabon Congo (6°S, 3°N ; 8°-18°E) et la ligne verte sépare le nord-est du sud-ouest de cette région. Dans le coin inférieur droit de chaque panneau, r est la corrélation entre les champs spatiaux moyens de rayonnement solaire des modèles et SARAH-2 présentés dans la figure IV.1, RMSE est l'erreur quadratique moyenne (en W/m²). Toutes les corrélations sont significatives au niveau de confiance 95%. R et RMSE sont calculées sur l'ensemble de la fenêtre.

Au niveau des marges nord de la région, tous les modèles parviennent à montrer des niveaux de rayonnement solaire plus élevés qu'au centre de la région. Cependant, ces niveaux sont largement plus faibles par rapport à SARAH-2 (qui semble cependant surestimer les niveaux de rayonnement sur ces marges, cf. chapitre II), à l'exception de l'IPSL qui montre des niveaux un peu plus élevés par rapport à SARAH-2 (plus de 260 W/m²). Ainsi, l'IPSL s'écarte considérablement des autres modèles, il présente des minima de rayonnement solaire autour du Golfe de Guinée (allant de 150 à 170 W/m²) et des niveaux de rayonnement solaire

anormalement élevés sur le centre et le sud qui sont en désaccord avec SARAH-2. E3SM-1-1 diverge également un peu de SARAH-2 aux marges nord en montrant des niveaux de rayonnement solaire un peu faibles, il présente également des minima de rayonnement solaire au Gabon et au Congo, soit décalés vers l'est par rapport à SARAH-2. En outre, ce modèle reproduit bien les faibles niveaux de rayonnement à l'est de la République démocratique du Congo (RDC) sur l'équateur, comme dans SARAH-2 (figure IV.1), avec des niveaux de rayonnement solaire presque identiques (~180-190 W/m²).

Au niveau du bassin du Congo : La plupart des modèles indiquent de faibles niveaux de rayonnement solaire, qui sont excessivement faibles dans E3SM-2-0 et MIROC6 (~160-180 W/m²) alors que l'IPSL diverge de tous les modèles en montrant des niveaux très forts de rayonnement solaire (~250W/m²) ; il se distingue également par la RMSE la plus élevée parmi les huit modèles (27.8 W/m²).

En se concentrant sur la région Gabon-Congo (délimitée par le cadre rouge dans le premier panneau de la figure IV.2), nous constatons que les différences de rayonnement solaire entre SARAH-2 et les modèles, qu'elles soient positives ou négatives, vont de 0 à 40 W/m². On constate également que 5 modèles (MIROC6, GFDL, CESM2, et les deux modèles E3SM) ont tendance à surestimer le rayonnement solaire dans la région sud-ouest le long de la façade Atlantique et à le sous-estimer dans la région nord-est. L'IPSL et les deux modèles du CNRM, ne présentent pas cette différence entre ces deux sous-régions.

Par la suite, et pour fournir plus d'informations, en particulier sur l'évolution saisonnière du rayonnement solaire dans la région, nous avons choisi de nous concentrer sur deux sous-régions distinctes : le nord-est et le sud-ouest du Gabon-Congo (voir le 1er panneau de la figure IV.2) qui connaissent des niveaux de rayonnement solaire différents dans la plupart des modèles.

Cette division nous permet d'étudier les variations saisonnières dans chacune de ces deux sous-régions et d'évaluer la performance des modèles au sein de chacune de ces deux sous-régions. La figure IV.3 présente le cycle annuel moyen du rayonnement solaire dans SARAH-2 et les modèles CMIP6 dans les deux sous-régions nord-est (NE) et sud-ouest (SW) du Gabon-Congo.

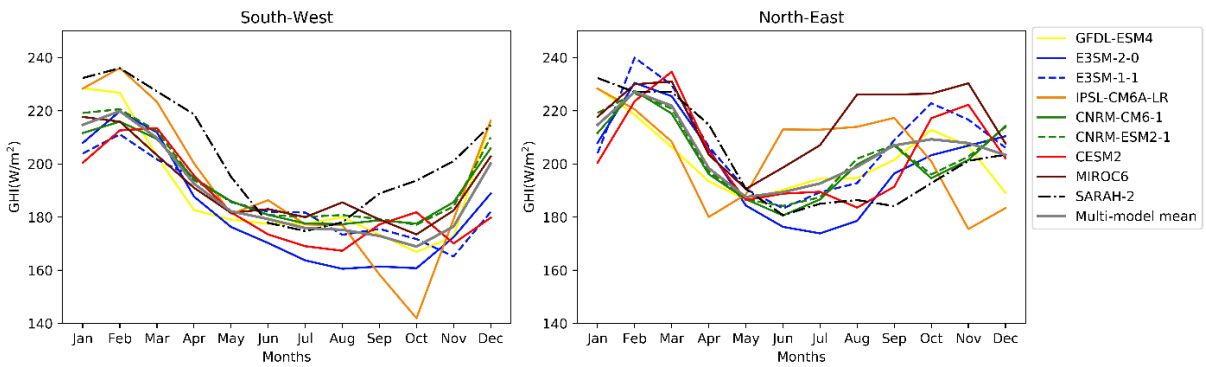

Figure IV. 3 - Cycle annuel moyen du rayonnement solaire dans SARAH-2 (représenté par la courbe noire en pointillés) et les huit modèles CMIP6 dans les deux sous régions du sud-ouest (gauche) et du nord-est (droite) de la région Gabon-Congo sur la période 1983-2014. La moyenne multi-modèle est représentée par la courbe grise.

D'après la figure IV.3, les modèles sont plus proches l'un de l'autre pour la région sud-ouest (SW) que pour la région nord-est (NE). Pour le SW, tous les modèles sous-estiment systématiquement le rayonnement solaire par rapport à SARAH-2 (environ 15 W/m^2 en moyenne mais nous avons montré que SARAH-2 surestimait probablement le rayonnement en chapitre II), à l'exception de MIROC6, E3SM-1-1, et des deux modèles du CNRM, pendant la période de juin à septembre, où une légère surestimation (~5 W/m^2) est observée. Alors que les modèles présentent généralement une bonne concordance dans leurs cycles annuels, les disparités deviennent plus prononcées pendant la saison des pluies octobre-novembre. En particulier, l'IPSL se distingue par une chute anormale du rayonnement solaire en octobre.

La région nord-est (NE) présente des cycles moyens plus disparates entre les modèles. L'IPSL montre un cycle annuel moyen irréaliste, présentant des maximas pendant la saison sèche JJAS au lieu d'un minimum. De même, MIROC6 présente un minimum en mai, et non pas au cœur de la saison sèche juillet-août, et surestime le rayonnement solaire par rapport à SARAH-2 et aux autres modèles de juin à novembre. Les autres modèles montrent un minimum de rayonnement solaire en JJAS, mais celui-ci est systématiquement surestimé par rapport à SARAH-2. Certains modèles présentent un minimum uniquement pendant les mois de juin et juillet, suivi d'une augmentation des niveaux de rayonnement, comme c'est le cas pour les deux modèles CNRM. À l'inverse, d'autres modèles comme le CESM2, présentent des minima s'étendant de mai à septembre. Cela pourrait traduire une longue saison sèche qui commence tôt et se termine tard selon ces modèles.

De manière générale, les discordances les plus prononcées entre les modèles et SARAH-2 se produisent pendant la saison sèche JJAS et la saison humide d'octobre-novembre. Il est important de noter que les niveaux de rayonnement solaire dans le cycle saisonnier sont plus élevés dans la région nord-est, avec une moyenne annuelle de 205 W/m², par rapport à la région du sud-ouest, où la moyenne annuelle est de 191 W/m².

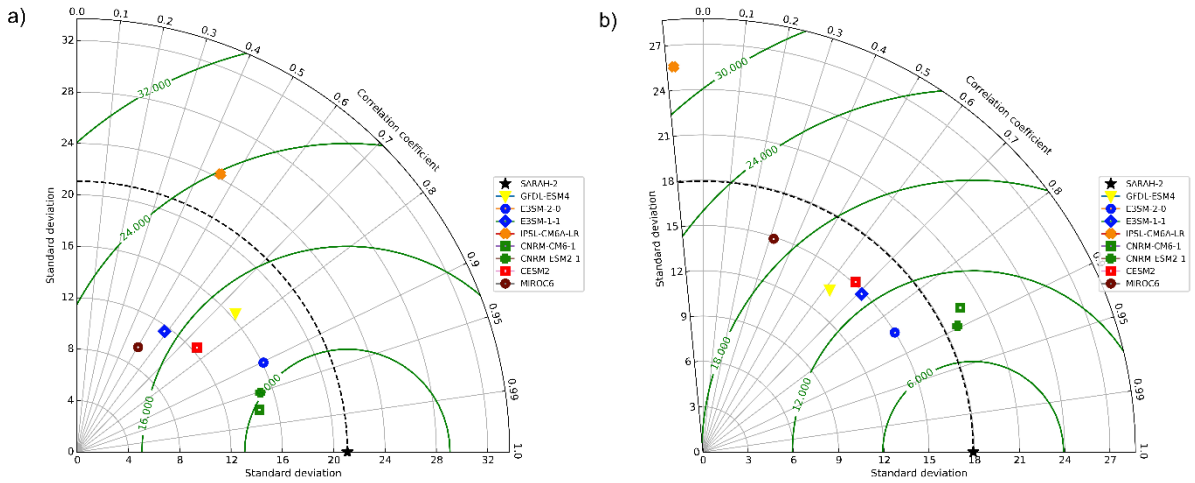

Figure IV. 4 - Diagramme de Taylor des moyennes mensuelles (tous les mois de l'année) du rayonnement solaire pour la période 1983-2014 dans les modèles CMIP6 au a) sud-ouest et b) nord-est du Gabon-Congo avec SARAH-2 comme référence. Lignes noires : coefficients de corrélation. Axes des ordonnées et des abscisses : écarts-types. En vert la RMSE.

Le diagramme de Taylor ci-dessus (figure IV.4) synthétise les variations de performance des 8 modèles pour chacune des deux sous-régions. D'un point de vue global, la performance des modèles dans la région du nord-est est comparativement inférieure par rapport à celle dans la région du sud-ouest.

Pour la région sud-ouest (figure IV.4a), trois modèles, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1 et E3SM-2-0, se distinguent par des corrélations remarquablement élevées avec SARAH-2 (toutes supérieures à 0.9 et significatives au niveau de confiance 95%). Ces modèles présentent également des valeurs d'erreur quadratique moyenne (RMSE) relativement faibles, comprises entre 8 et 9 W/m^2, et des écarts types proches de SARAH-2. IPSL et MIROC6, en revanche, présentent des corrélations faibles de 0.45 et 0.5 respectivement. IPSL montre également une RMSE plus élevée de 24 W/m^2 et MIROC6 se caractérise par un écart type (9.5 W/m^2) le plus faible par rapport à tous les modèles. Les autres modèles (GFDL, E3SM-1-1 et CESM2) présentent des corrélations variant entre 0.6 et 0.8.

Des différences importantes dans la performance des modèles dans la région nord-est (figure IV.4b) sont observées. Les deux modèles CNRM et E3SM-2-0 montrent à nouveau les corrélations les plus fortes avec SARAH-2, dépassant 0.8. GFDL, CESM2 et E3SM-1-1 montrent des corrélations comprises entre 0.6 et 0.7. MIROC6 présente une faible corrélation de 0.3 et IPSL se démarque avec une corrélation avec SARAH-2 proche de 0 (R = -0.08). Ce résultat est accompagné d'une RMSE dépassant les 30 W/m², ce qui en fait le modèle ayant la RMSE la plus élevée parmi les huit modèles examinés. Cette absence de corrélation et la RMSE élevée suggèrent des déficiences fortes du modèle.

Ces limites du modèle IPSL dans la simulation précise du rayonnement solaire sur le Gabon-Congo peuvent provenir de son traitement des processus atmosphériques clés, notamment la convection profonde, la conversion de l'eau de condensation des nuages en pluie et la distribution verticale de l'eau pour les nuages non convectifs. Le modèle IPSL utilise un

paramètre pour contrôler la transition des cumulus en stratocumulus (Hourdin et al., 2020a, 2020b), ainsi que des valeurs seuils pour représenter la conversion de l'eau liquide des nuages en pluie. En outre, un autre paramètre contrôlant l'effet indirect des nuages est utilisé pour l'ajustement final du bilan radiatif global, cela affecte spécifiquement l'épaisseur optique des nuages liquides (bas), et par conséquent, le rayonnement solaire (Bouchet et al., 2020). Tout cela pourrait expliquer les faibles performances du modèle, spécialement dans une région nuageuse comme le Gabon-Congo.

3 La nébulosité dans les simulations CMIP6 et lien avec le rayonnement

Compte tenu de ces résultats, et sachant que les nuages et particulièrement les nuages bas jouent un rôle essentiel dans la modulation du rayonnement solaire dans cette région, la compréhension de la façon dont les modèles CMIP6 représentent les nuages bas peut fournir des informations sur les sources d'incohérence dans les simulations du rayonnement solaire. Pour cela, la figure IV.5 présente la moyenne de la fraction nuageuse basse en JJAS par les huit modèles ainsi que les réanalyses ERA5. Camberlin et al. (2023) montrent que la fréquence des nuages bas est sous-estimée en JJAS sur la région par ERA5 en comparaison des estimations satellites alors que Dommo et al. (2022) et Moron et al. (2023) ont démontré la bonne capacité d'ERA5 à reproduire le cycle diurne moyen et la variabilité interannuelle des nuages bas dans la région.

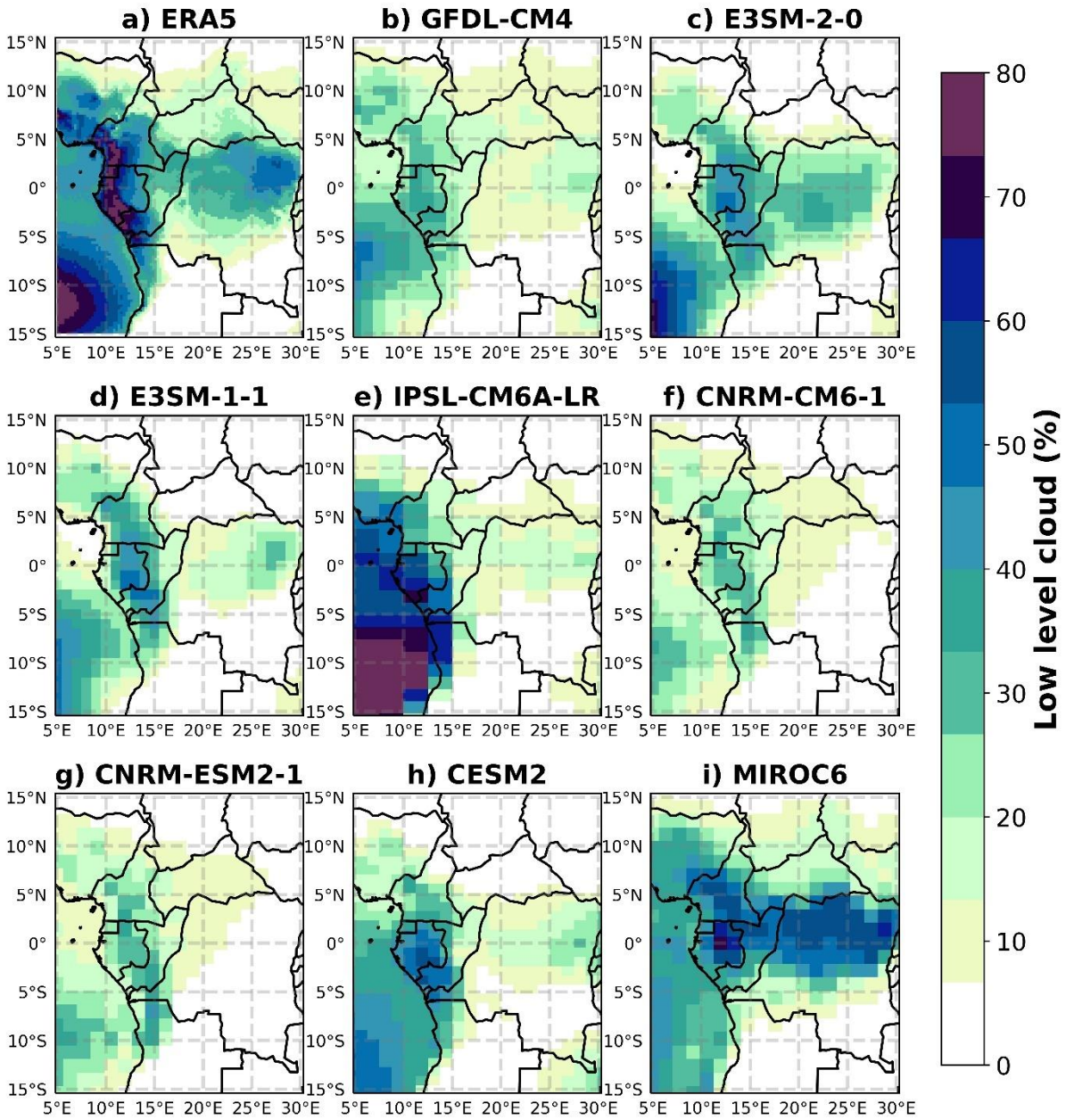

Figure IV. 5 - Moyenne de la fraction nuageuse basse JJAS (en %) pour ERA5 (a) et les huit modèles CMIP6 (b-i). Les moyennes sont calculées sur la période 1983-2014.

Les réanalyses ERA5 (panneau a) indiquent une fraction élevée de nuages bas, environ 75 %, le long de la façade Atlantique (région sud-ouest du Gabon-Congo), fraction qui diminue au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'intérieur du continent au nord-est. Au-dessus de l'océan, on observe également des pourcentages élevés de la fraction de nuages bas autour des latitudes 10°-15°S (environ 80%), qui diminuent en se rapprochant de la côte, pour ensuite atteindre 30-40%. La plupart des modèles reproduisent ce schéma spatial, mais avec des pourcentages de fraction nuageuse généralement très inférieurs à ERA5. Le modèle CESM2 s'approche le plus de la configuration spatiale observée dans ERA5. Les deux modèles E3SM présentent également une distribution spatiale proche d'ERA5, mais avec un décalage spatial (les pourcentages élevés de nuages bas sont décalés vers l'est du Gabon). Ce décalage pourrait

expliquer la représentation décalée vers l'est des faibles niveaux de rayonnement solaire par ces modèles (figure IV.1). Cela pourrait être attribué à la représentation de la topographie dans les modèles, compte tenu de leurs résolutions spatiales plus grossières.

En outre, MIROC6 n'arrive pas à reproduire le schéma spatial observé dans ERA5 : il présente des fractions élevées de nuages bas (50-60%) tout au long de l'équateur. Cela pourrait expliquer les faibles niveaux de rayonnement solaire observés en RDC le long de l'équateur (figure IV.1) par ce modèle. L'IPSL se distingue par des niveaux très élevés de la fraction de nuages bas au sud de l'océan Atlantique (environ 80%), mais il montre des pourcentages de fraction nuageuse conformes sur la façade Atlantique : c'est le modèle qui produit le plus de nuages bas sur la façade atlantique, il est donc presque le plus réaliste comparé à ERA5 pour cette région.

En analysant les cycles annuels moyens de nuages bas présentés dans la figure IV.6 pour les deux sous-régions nord-est et sud-ouest du Gabon-Congo, nous pouvons dégager plusieurs conclusions importantes.

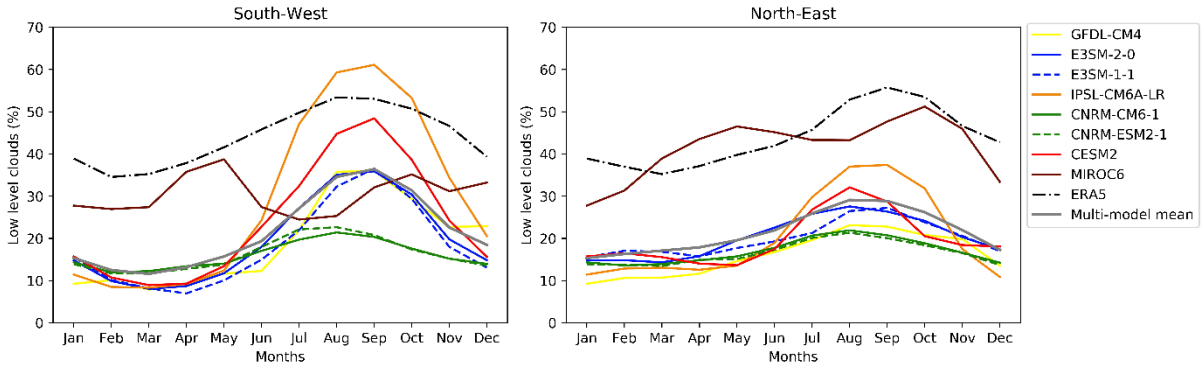

Figure IV. 6 - Cycle annuel moyen de la fraction des nuages bas dans ERA5 (représenté par la courbe noire en pointillés) et les huit modèles CMIP6 dans les deux sous régions du sud-ouest et du nord-est de la région Gabon-Congo sur la période 1983-2014. La moyenne multi-modèle est représentée par la courbe grise.

Le cycle annuel moyen de la fraction des nuages bas dans ERA5 montre quelques différences entre les sous-régions du Nord-Est (NE) et du Sud-Ouest (SW). Pour la région SW des valeurs légèrement plus élevées que celles de la région NE sont observées en JJAS. Dans la région NE, le pic de la fraction de nuages bas se produit en septembre, atteignant environ 55%, tandis que le minimum est observé en mars (environ 35%). Dans la région SW, le maximum de la fraction de nuages bas se produit en août-septembre (environ 53%) et le minimum en février (34%).

Dans la région SW, les modèles présentent des cycles annuels moyens différenciés. Tous les modèles sous-estiment la fraction des nuages bas par rapport à ERA5, à l'exception d'IPSL, qui présente une surestimation en août-octobre. L'IPSL montre une augmentation notable (qui semble peu réaliste par rapport à ERA5 mais l'est par rapport aux estimations satellites, cf. Camberlin et al., 2023) de la fraction des nuages bas à partir de mai, avec un pic en août-septembre, atteignant approximativement 60%. MIROC6 se distingue par un cycle

bimodal irréaliste, avec des pics en avril-mai et en octobre, qui diffèrent à la fois d'ERA5 et des autres modèles. En revanche, les deux modèles CNRM présentent des cycles relativement stables avec une faible variation (11-21%) tout au long de l'année, mais ils arrivent à reproduire le cycle annuel moyen. Les autres modèles (GFDL, CESM2 et E3SM) présentent des cycles moyens relativement similaires et reproduisent bien le cycle annuel moyen, avec un maximum de nuages bas en août-septembre.

Comparativement, dans la région nord-est, les cycles annuels moyens de nuages bas dans les modèles sont plus proches les uns des autres. Néanmoins, le comportement de MIROC6 reste distinct, même s'il montre des quantités de nuages bas proches d'ERA5. D'autre part, IPSL et CESM2 montrent un cycle annuel plus réaliste que le reste des modèles. Généralement dans cette région, tous les modèles à l'exception de MIROC6, sous-estiment la fraction de nuages bas par rapport à ERA5.

Si on considère l'interaction entre les cycles annuels moyens de rayonnement solaire et des nuages bas, certains modèles présentent des relations cohérentes (figures IV.3 et IV.6). Cependant, IPSL et MIROC6 montrent des cycles annuels moyens de rayonnement solaire et de nuages bas qui n'ont pas de relation évidente l'un avec l'autre.

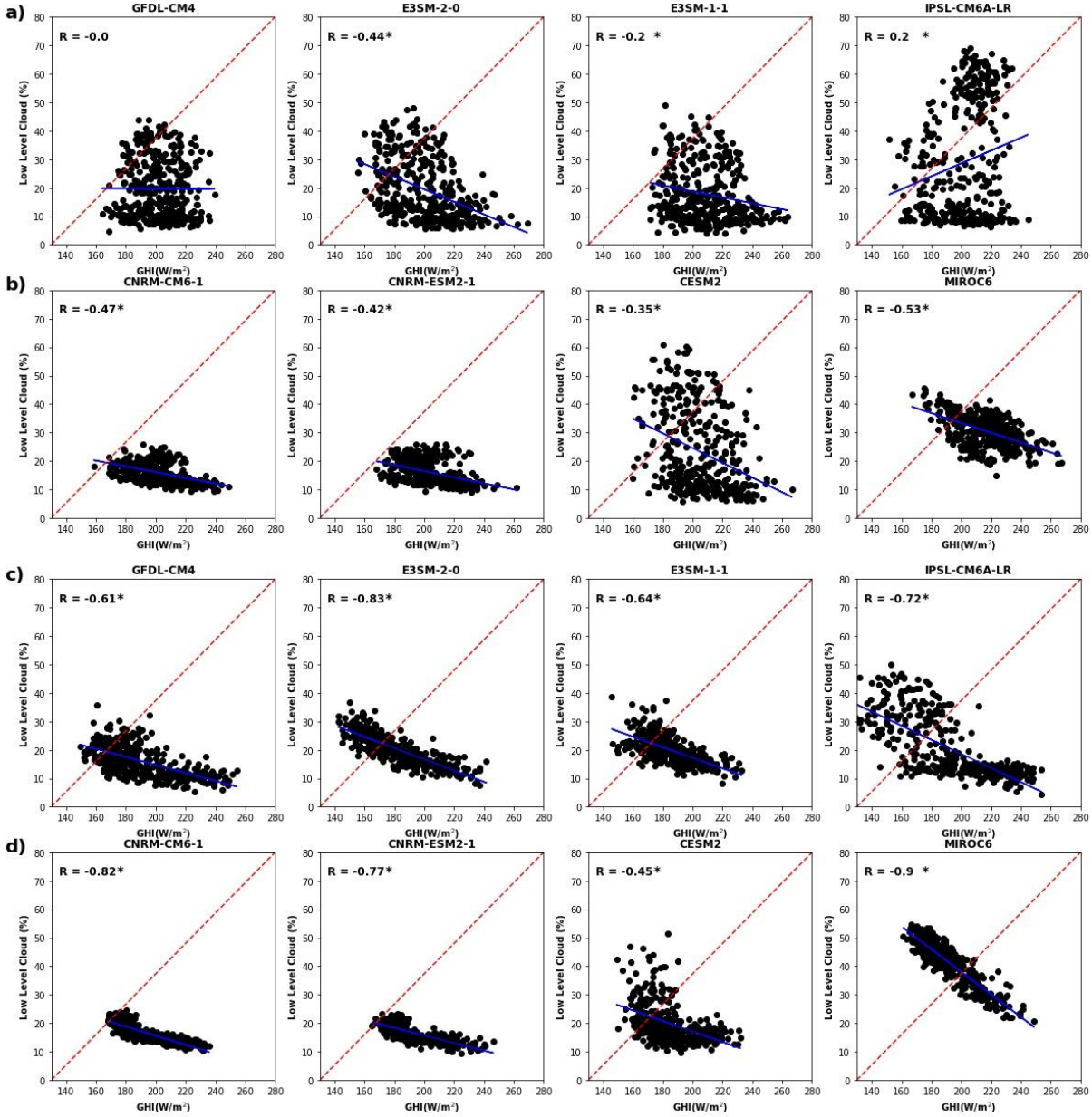

Figure IV. 7 - Nuages de points entre les indices moyens de rayonnement solaire et la fraction de nuages bas dans les modèles CMIP6 dans la région sud-ouest (panneaux a-b) et la région nord-est (panneaux c-d). Chaque point correspond à la valeur moyenne régionale d'un mois et d'une année (les 12 mois et la période 1983-2014). En haut à gauche de chaque figure, les corrélations sont données avec les étoiles noires indiquant les corrélations significatives à 95%. La ligne en rouge pointillé représente la droite x=y et la ligne bleue représente la droite de régression.

Pour explorer la relation entre variabilité du rayonnement solaire et variabilité de la fraction de nuages bas dans les modèles, la figure IV.7 présente des nuages de points entre les deux paramètres dans les deux sous-régions : le sud-ouest (figure IV.7a-b) et le nord-est (figure IV.7c-d).

Les résultats dans la région sud-ouest présentent une disparité assez importante des valeurs de corrélation entre les modèles allant de -0.53 pour MIROC6 à 0.2 pour IPSL. Les données de rayonnement solaire et des nuages du GFDL n'indiquent aucune corrélation dans cette région, contrairement à une corrélation significative de -0.61 observée dans le nord-est. Cela peut être attribué à la variabilité régionale du climat ou à la représentation des processus nuageux dans ce modèle. L'absence de corrélation dans la région sud-ouest implique l'existence d'autres paramètres que les nuages bas qui régissent les variations du rayonnement solaire. En revanche, dans la région nord-est, les nuages bas ont un impact évident sur la variabilité du rayonnement solaire dans GFDL.

Il convient de noter que l'IPSL montre une faible corrélation positive entre les nuages bas et le rayonnement solaire dans la région du sud-ouest (R=0.2). Ce résultat est attribué en premier à la performance limitée de l'IPSL à reproduire avec précision le cycle annuel moyen du rayonnement solaire. Alors que l'IPSL capture avec précision le cycle annuel moyen de nuages bas même avec une légère surestimation pendant la saison sèche (figure IV.6), cela ne se traduit pas par un minimum correspondant du rayonnement solaire dans la région sud-ouest lors de la saison sèche. En outre, la corrélation quasi nulle de l'IPSL avec SARAH-2 (figure IV.4) souligne l'irréalité de sa représentation des variations du rayonnement solaire dans cette région. Cela indique clairement l'implication d'autres facteurs que les nuages bas pris en compte par l'IPSL pour simuler le rayonnement solaire dans cette région.

A l'inverse, dans la région nord-est (figure IV.7c-d), tous les modèles présentent des corrélations fortes, négatives et statistiquement significatives entre les nuages bas et le rayonnement solaire, allant de -0.45 pour CESM2 à -0.9 pour MIROC6. Ces corrélations, plus fortes que celles observées dans la région sud-ouest, s'accordent sur le fait que les nuages bas jouent bien un rôle important voire dominant dans la modulation du rayonnement solaire dans la région nord-est dans les modèles. Il est intéressant de noter que CESM2, bien qu'il présente un schéma spatial de rayonnement solaire très proche de SARAH-2 (figure IV.1), il présente la corrélation la plus faible entre le rayonnement solaire et les nuages parmi les huit modèles CMIP6. En outre, bien que MIROC6 ne soit pas du tout cohérent avec ERA5 ou les autres modèles en termes de cycle saisonnier, c'est le modèle pour lequel le rayonnement solaire est le plus fortement impacté par les nuages bas, et ceci est vrai pour les deux sous-régions.

Ces analyses soulignent que dans les modèles les nuages bas ont un impact plus important sur les variations du rayonnement solaire dans le nord-est que dans le sud-ouest du Gabon-Congo. Ce résultat est en désaccord avec les observations et les résultats du chapitre II. Notamment, les données ERA5 (figure IV.5a) et MODIS (Dommo et al., 2022) montrent des pourcentages élevés de fraction de nuages bas dans la région sud-ouest. Ainsi, les résultats du chapitre II ont également montré que la façade atlantique (région sud-ouest) reçoit des niveaux faibles de rayonnement solaire pendant la saison sèche, ce qui est attribué à la présence d'une couverture nuageuse basse pendant cette saison.

Il est donc important d'approfondir l'étude avec d'autres types de nuages pour bien comprendre les facteurs contribuant à ces différences régionales. En examinant les nuages de moyenne et haute altitude, nous visons à démêler les aspects derrière les différences entre les modèles dans la simulation de la variabilité du rayonnement solaire et particulièrement dans la région sud-ouest.

Pour cela, nous avons analysé les données mensuelles des nuages moyens (altitude entre 2-8 km au niveau de l'équateur selon l'organisation météorologique mondiale**)** et haut (6-18km au niveau de l'équateur). Nous avons calculé leurs moyennes JJAS sur la période 1983-2014 (Annexe D). Dans cette section, nous présentons uniquement les relations entre ces types de nuages et le rayonnement solaire pour les sous-régions sud-ouest et nord-est (figures IV.8 et IV.9).

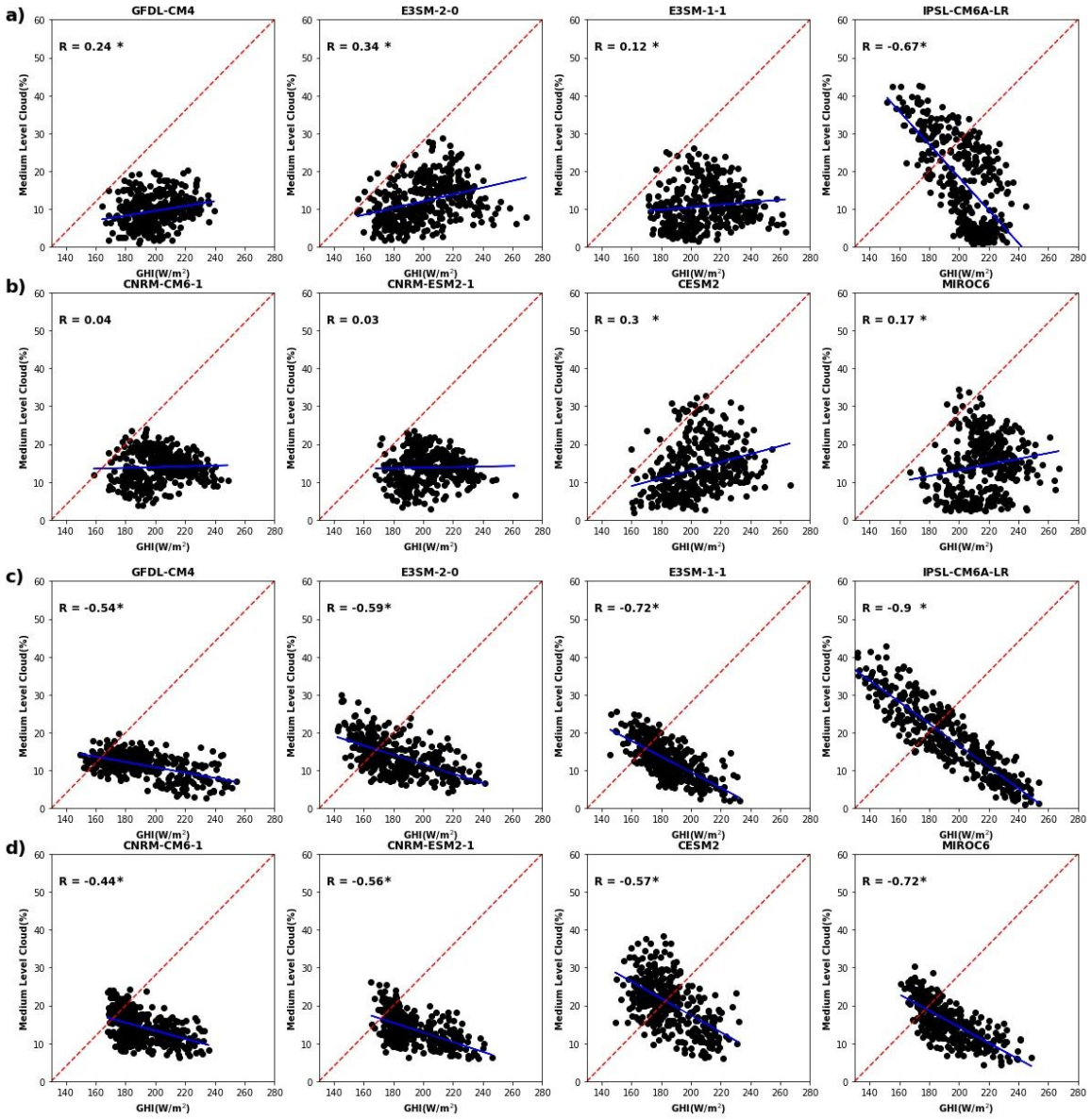

Figure IV. 8 - Identique à la figure IV.7 mais pour les nuages de moyenne altitude.

Concernant les nuages de moyenne altitude dans la région sud-ouest (figure IV.8a-b), la plupart des modèles présentent de faibles corrélations positives avec le rayonnement, à l'exception de l'IPSL, qui présente une corrélation négative et significative (R= -0.67). Cela implique que les variations du rayonnement solaire dans l'IPSL dans cette région sont principalement influencées par les variations des nuages à moyenne altitude. À l'inverse, dans la région nord-est (figure IV.8c-d), toutes les corrélations sont négatives et significatives, allant de -0.9 à -0.44. L'IPSL se distingue là encore par la corrélation la plus forte (R = -0.9), indiquant un lien fort entre le rayonnement solaire et les nuages de moyenne altitude dans ce modèle pour cette région. MIROC6 et E3SM-1-1 viennent ensuite avec une corrélation R = -0.72. Dans l'ensemble, la région nord-est présente des corrélations à nouveau plus fortes entre le rayonnement solaire et les nuages (ici moyens) que la région sud-ouest.

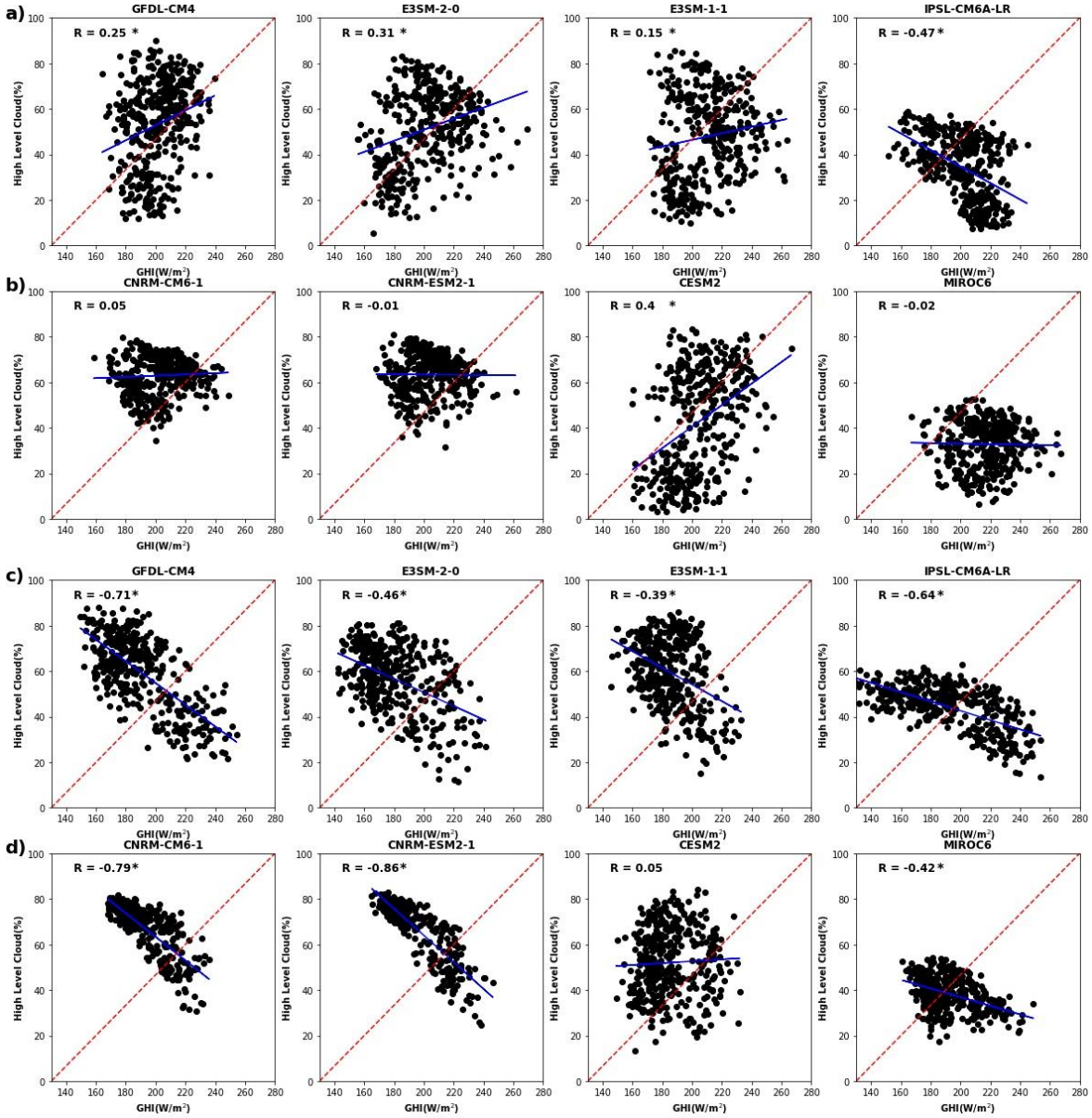

Figure IV.9 - Identique à la figure IV.7 et IV.8 mais pour les nuages de haute altitude.

En ce qui concerne les nuages de haute altitude, la région sud-ouest (figure IV.9a-b) présente des corrélations généralement faibles et positives. L'IPSL est le seul modèle indiquant une corrélation négative (R= -0.47), ce qui signifie que la variabilité de rayonnement solaire dans les autres modèles n'est pas contrôlée par ce type de nuage dans la région sud-ouest. Pour la région nord-est, la plupart des corrélations sont négatives, comprises entre -0.86 et -0.39, à l'exception de CESM2 qui ne montre aucune corrélation. Les deux modèles CNRM se distinguent par leurs corrélations élevées (-0.79 et -0.86). En outre, la plupart des modèles montrent des fractions élevées de nuages à haute altitude, dépassant souvent 60 % et atteignant même plus de 80 % dans quelques modèles.

Dans cette section, nos attentes étaient axées sur l'observation d'une corrélation négative entre le rayonnement solaire et les nuages, particulièrement forte avec les nuages bas par rapport aux nuages moyens et élevés. Nos résultats indiquent que dans la région nord-est, la plupart des modèles présentent bien une relation négative significative entre le rayonnement solaire et les trois types de nuages, alors que cette relation est beaucoup moins prononcée dans la région sud-ouest, en particulier pour les nuages de moyenne et haute altitude. Mais l'intensité de la relation entre le rayonnement solaire et les différents types de nuages varie selon les modèles. Dans la région sud-ouest, la plupart des modèles présentent des corrélations négatives entre les nuages bas et le rayonnement solaire, à l'exception du GFDL et de l'IPSL. Ce dernier présente des corrélations négatives significatives avec les nuages moyens et hauts, tandis que GFDL présente des corrélations positives faibles (R=0.25). De plus, les résultats indiquent que la relation entre le rayonnement solaire et les nuages bas semble être indépendante du biais.

Cette moins bonne relation entre les nuages et le rayonnement solaire au région sud-ouest vs la région nord-est pourrait être lié à la dynamique de la direction du vent, où le sud-ouest est une zone « au vent », tandis que le nord-est connaît des conditions sous le vent (Annexe D). Cela pourrait également être expliqué par les limites des modèles à rendre compte avec précision de la topographie complexe de la région ainsi que d'une couverture nuageuse (et d'un contenu en aérosols) différente de part et d'autre du relief dans les modèles. En outre, le climat d'Afrique centrale est influencé par la proximité de l'océan atlantique, le bassin du Congo et la présence de vastes forêts tropicales. Ces caractéristiques climatiques locales peuvent introduire des interactions complexes entre la couverture nuageuse et le rayonnement solaire. Et par conséquent, les modèles peuvent être sensible à ces complexités, ce qui se traduit par des corrélations différentes selon les régions.

En outre, bien que les analyses de comparaison dans cette section aient principalement reposé sur l'évaluation des relations linéaires entre le rayonnement solaire et la nébulosité, nous avons également envisagé d'autres approches telles que la corrélation de Spearman ou la corrélation de Kendall. Cependant, étant donné que les nuages bas sont très présents dans la région pendant la saison sèche, notre objectif était de mettre en évidence la relation entre chaque type de nuages et le rayonnement solaire dans les modèles climatiques CMIP6 indépendamment. Par conséquent, nous avons jugé que l'application de ces tests n'était pas nécessaire dans le cadre de cette étude.

4 Interactions avec les températures de surface de la mer (SST)

Bien que les modèles CMIP6 présentent des limites dans la simulation des nuages bas et, par conséquent, du rayonnement solaire dans la région, et compte tenu du fait que les nuages bas sont influencés, en partie, par la température de surface de l'Atlantique équatorial (Camberlin et al., 2023 ; Moron et al., 2023), nous nous concentrons dans cette section sur la compréhension de la variabilité de la température de surface de la mer (SST) dans la région. La SST de l'Atlantique tropical sud et équatorial a montré une relation importante avec le rayonnement solaire dans le chapitre précédent. Ainsi, Dommo et al. (2018) suggèrent que l'occurrence saisonnière d'une SST froide près du Gabon joue un rôle déterminant dans la formation des nuages bas. La question qui se pose est de savoir si nous pouvons nous affranchir de la variabilité de la nébulosité et utiliser la SST comme un moyen d'inférer le rayonnement solaire dans la région. Étant donné les problèmes documentés dans les modèles couplés à reproduire avec précision la SST dans cette région (Farneti et al., 2022 ; Camberlin et al., 2023), notre étude vise à examiner la relation SST-Rayonnement solaire dans les modèles et si elle est comparable avec les données d'observation.

Pour ce faire, nous avons utilisé les données moyennes mensuelles de température de surface de la mer (SST) pour l'Atlantique équatorial, en utilisant le même ensemble de huit modèles utilisés précédemment, ainsi que les réanalyses ERA5 comme référence. Les champs moyens JJAS de la SST pour la période 1983 à 2014 sont représentés dans la figure IV.10 pour ERA5 (panneau a) et pour les 8 modèles CMIP6 (panneaux b-i).

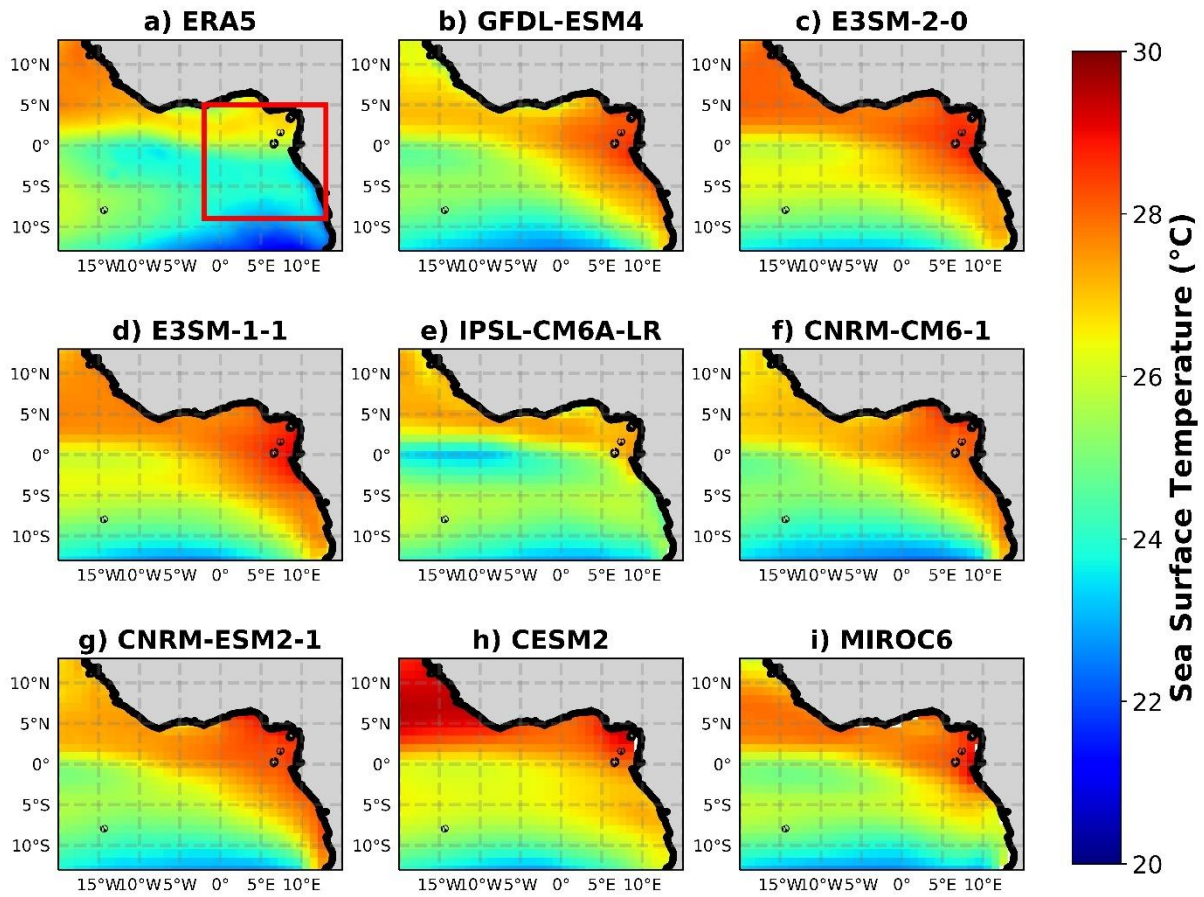

Figure IV. 10 - Les champs moyens de température de surface de la mer (SST en °C) en juin-septembre (JJAS) sur l'océan Atlantique dans a) ERA5, et b-i) les modèles CMIP6. Le cadre rouge dans le panneau (a) délimite la région équatoriale est de l'océan Atlantique (9-2°S, 5-13°E) près du Gabon-Congo. Les moyennes sont calculées sur la période 1983-2014.

Le champ moyen de SST en JJAS sur l'océan Atlantique, tel que représenté par ERA5 dans la figure IV.10a, montre des eaux froides (inférieures à 23°C) au sud qui s'étendent vers le Nord en suivant la côte africaine jusqu'au sud de l'équateur, il s'agit de l'upwelling de Benguela qui s'étend vers le nord le long de la côte ouest de l'Afrique australe (Gutknecht., 2011). En outre, des eaux froides (mais moins fraîches que les précédentes, ~24°C) sont observées sur le rail équatorial : il s'agit de l'upwelling équatorial). En plus, des eaux à ~25°C sont observées juste à la côte de l'Afrique de l'Ouest : upwellings locaux liés au flux de mousson. Des eaux chaudes (supérieures à 26°C) sont observées dans les autres zones.

Des différences notables apparaissent en termes de valeurs de température entre modèles et ERA5. Au sud, on remarque que la plupart des modèles montrent des températures beaucoup moins froides (~23°C) que dans ERA5. Pour l'IPSL, ces températures s'étendent vers le nord en suivant la côte africaine jusqu'au sud de l'équateur comme dans ERA5, alors que dans les autres modèles, les températures augmentent rapidement sur la cote africaine et dépassent 27°C en se rapprochant de l'équateur. Ainsi, des eaux à ~24°C sont observées dans IPSL au niveau du rail équatorial, et à ~25°C dans les autres modèles à l'ouest de ce rail équatorial, devenant plus chaudes (plus de 26°C) à partir de 5°W et jusqu'à la côte Congo-

Gabonaise. Dans le Golfe de Guinée, les températures dépassent 28°C dans tous les modèles alors qu'elles sont d'environ 26°C dans ERA5.

Les modèles tendent donc à fortement surestimer les températures de surface de l'océan Atlantique tropical sud et équatorial par rapport aux données ERA5. Par ailleurs, la surestimation des modèles de la température de surface de l'océan Atlantique pendant la saison sèche est également observée dans les champs moyens de tous les autres mois (Annexe D). De plus, Wahl et al. (2011) ; Voldoire et al. (2014) suggèrent que l'absence de nuages bas explique en partie les biais de la SST et conduit à un biais positif du rayonnement solaire sur l'océan.

Pour confirmer que la tendance des modèles à surestimer la SST est effectivement un biais systématique sur toute l'année et pas uniquement en saison sèche, la figure IV.11 représente le cycle annuel moyen de la SST dans la région équatoriale est (9-2°S, 5-13°E) de l'océan Atlantique qui se caractérise par un maximum en mars aux alentours de 29°C et un minima en août aux alentours de 23°. Les résultats montrent que tous les modèles surestiment systématiquement la SST dans la région, les surestimations les plus importantes se produisant de mai à novembre. Le minimum de SST, observé en août, est bien reproduit par tous les modèles, à l'exception des deux modèles E3SM, qui présentent un minimum décalé en septembre. Le maximum de SST en mars est déplacé par certains modèles en avril, voire même en mai dans le cas des deux modèles E3SM. L'IPSL se distingue par un cycle moyen le plus proche de celui d'ERA5, montrant une chute marquée de température en avril (4° de différence entre mars et juin). En revanche, les autres modèles montrent cette baisse de température en mai et juin, mais avec une faible intensité (2°C de différence entre mars et juin).

En outre, le seuil de SST qui déclenche la convection varie d'une région à l'autre. En ce qui concerne la formation de cyclones tropicaux, Tory and Dare. (2015) ont suggéré qu'une fois que la SST dépasse le seuil de 26.5°C, la formation de cyclones tropicaux est possible. Leung et al. (2022) ont indiqué qu'une SST de 28°C est considérée comme le seuil pour la convection profonde. Par conséquent, si les modèles atteignent ces seuils (26-28°C) en JJAS, il est probable que des nuages convectifs ou cumuliformes se forment plutôt que des nuages bas stratiformes. Par conséquent, le rayonnement solaire sera influencé non seulement par les nuages bas, mais aussi par d'autres types de nuages. Cela correspond aux nuages de points présentés dans les figures IV.8 et IV.9.

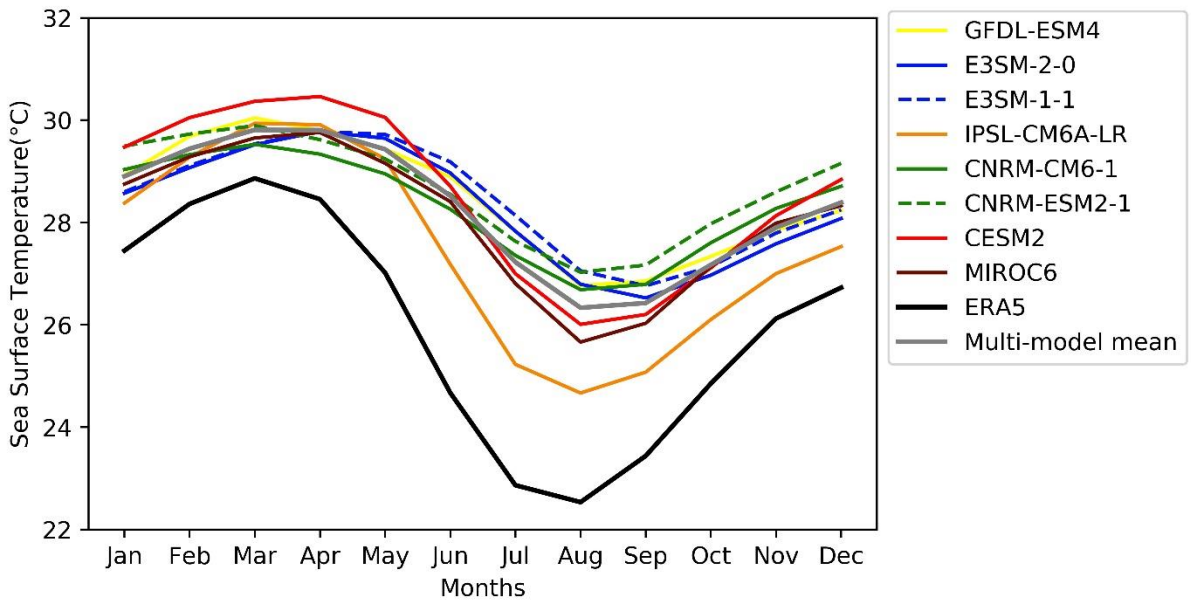

Figure IV. 11 - Cycle annuel moyen de SST 1983-2014 sur la région (9-2°S, 5-13°E) dans l'océan atlantique (cadre rouge dans le panneau (a) de la figure IV.10). La courbe noire représente le cycle annuel moyen d'ERA5, la courbe grise représente la moyenne multi-modèle.

Ce biais positif de la SST observé dans les modèles peut être attribué à la convergence anormale des vitesses de vent près de l'équateur et le long de la frontière orientale de l'océan (Camberlin et al., 2023). En outre, il peut s'expliquer par un déplacement de la ZCIT vers le sud au cours du printemps boréal (Richter et al., 2014).

Pour établir le lien entre la température de l'océan Atlantique et le rayonnement solaire, nous avons élaboré des nuages de points (figure IV.12) entre l'indice de rayonnement solaire JJAS sur chacune des régions nord-est et sud-ouest du Gabon Congo et l'indice moyen JJAS de SST calculé sur la région équatoriale est de l'océan Atlantique (9-2°S, 5-13°E) sur la période 1983-2014. L'objectif principal est de déterminer si les modèles CMIP6 vont présenter différents liens entre la SST et le rayonnement solaire.

Dans le chapitre précèdent, les SST de l'océan Atlantique ont montré une relation importante avec le rayonnement solaire, influençant le démarrage et la fin de la saison sèche. Notamment, nous avons trouvé que des températures plus élevées de l'océan Atlantique équatorial sont liées à une saison sèche plus lumineuse que la normale. Par conséquent, nous prévoyons dans cette section une relation positive entre les SST de l'océan Atlantique et le rayonnement solaire dans les modèles CMIP6.

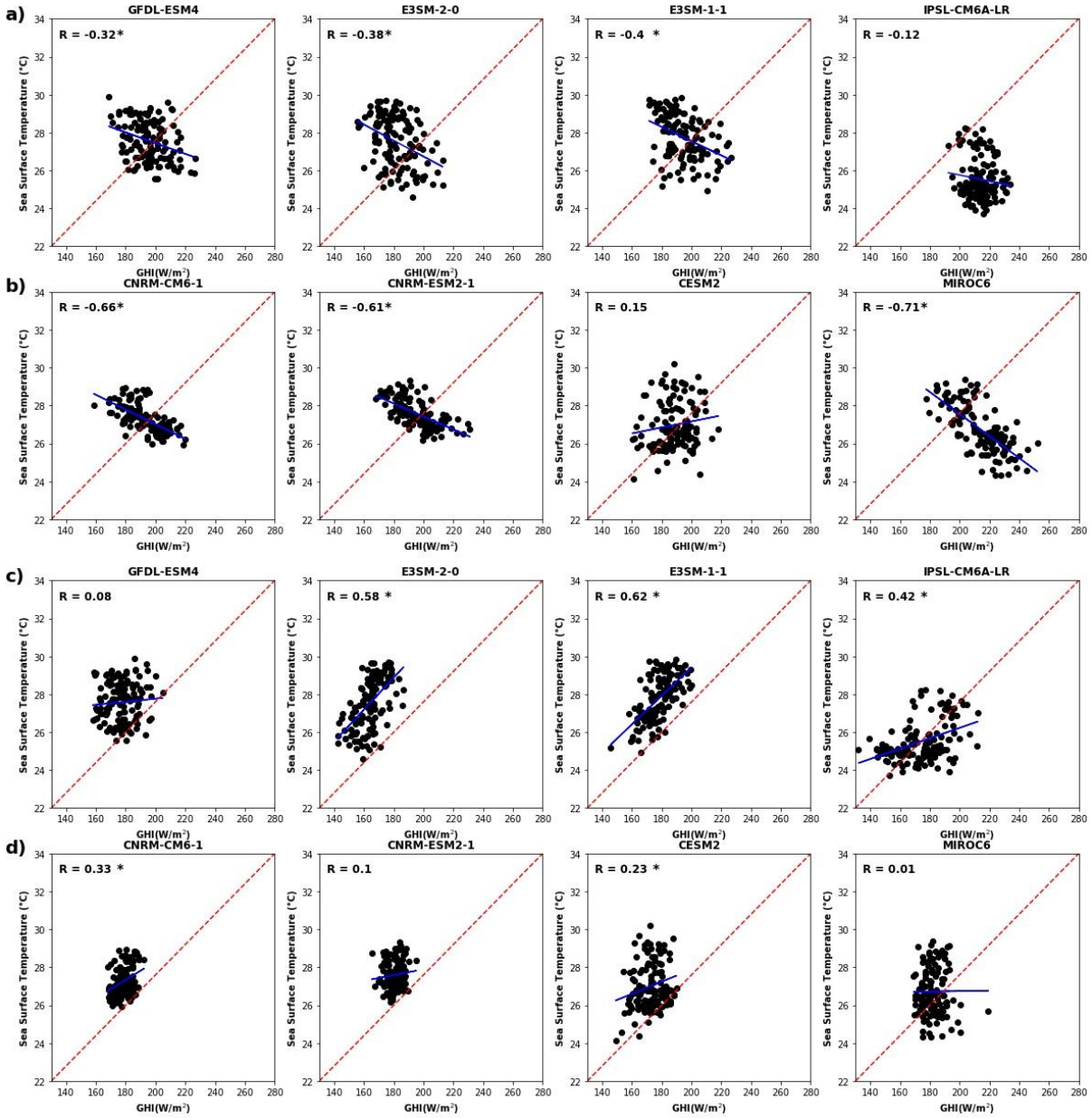

Figure IV. 12 - Nuages de points entre les indices de la température de surface de l'océan atlantique sur la région (9-2°S, 5-13°E) et de rayonnement solaire dans les modèles CMIP6 sur la région sud-ouest (panneaux a-b) et la région nord-est (panneaux c-d). Chaque point correspond à la valeur moyenne régionale d'un mois (JJAS) et une année spécifique. En haut à gauche de chaque figure, les corrélations sont données avec les étoiles noires indiquant les corrélations significatives à 95%. La ligne en rouge pointillé représente la droite x=y et la ligne bleu représente la droite de régression.

Pour la région nord-est (figure IV.12c-d), toutes les corrélations sont positives. Les deux modèles E3SM présentent les corrélations les plus fortes (~0.6), suivis par l'IPSL et le CNRM-CM6-1, avec des corrélations modestes de 0.42 et 0.33, respectivement. En revanche, les autres modèles ne présentent pas de corrélations significatives dans cette région ou bien faibles. Ce résultat correspond à nos attentes et s'accorde avec les résultats du chapitre III, où une SST élevée a conduit à une saison sèche plus lumineuse que la normale et donc des niveaux de rayonnement solaire élevés. Cela s'explique par la formation de moins de nuages bas stratiformes et plus de nuages cumuliformes qui filtrent moins le rayonnement solaire.

Inversement, pour la région sud-ouest (figure IV.12a-b), nos résultats montrent que la majorité des modèles (6 sur 8) présentent des corrélations négatives et statistiquement significatives entre le rayonnement solaire et la SST ; le modèle CESM2 présente une faible corrélation positive (R=0.15) qui n'est pas significative. Ce résultat correspond également à une absence de corrélation entre la variation interannuelle du rayonnement solaire sur la région sud-ouest et la SST sur l'ensemble de l'océan atlantique tropical sud (Annexe D). Bien que le champ spatial de rayonnement solaire dans CESM2 soit plus ou moins proche de celui de SARAH-2, CESM2 a nettement surestimé la SST par rapport à ERA5. En outre, parmi tous les modèles, MIROC6 a présenté la corrélation la plus élevée (-0.71), suivi par les deux modèles CNRM (R ~ -0.6), tandis que les autres modèles ont présenté des corrélations allant de -0.4 à -0.3. Cette relation négative inattendue signifie que des SST élevées de l'océan Atlantique coïncident avec des niveaux faibles de rayonnement solaire. Cela pourrait être expliqué par la surestimation de la SST Atlantique par les modèles, particulièrement en JJAS, ce qui entraine une convection profonde et donne lieu à la formation des cumulonimbus. Ces nuages, caractérisés par une grande extension verticale, peuvent conduire à des niveaux faibles de rayonnement solaire.

Globalement, dans la région sud-ouest, la corrélation négative indique qu'une SST plus chaude dans l'océan Atlantique en JJAS entraîne une diminution du rayonnement solaire. Inversement, la corrélation positive dans la région nord-est indique qu'une SST plus chaude coïncide avec une augmentation du rayonnement solaire au cours de la même période. Ces corrélations contrastées observées entre la SST et le rayonnement solaire dans les deux sous-régions nord-est et sud-ouest du Gabon-Congo peuvent être attribuées à la dynamique du climat régional. Ces corrélations soulignent également des dynamiques et des interactions climatiques différentes au sein des modèles et qui n'ont pas en accord avec les observations. Elles peuvent résulter d'une combinaison de facteurs, notamment les régimes de vents locaux, la pression au niveau de la surface et d'autres facteurs océaniques, qui ont un impact différent sur la formation des nuages et le rayonnement solaire dans chaque région.

Pour finir, des corrélations sont calculées entre l'indice moyen JJAS de SST calculé sur la région équatoriale est de l'océan Atlantique (9-2°S, 5-13°E) et les champs spatiaux moyens JJAS de rayonnement solaire (1983-2014). La figure IV.13 présente ces corrélations spatiales.

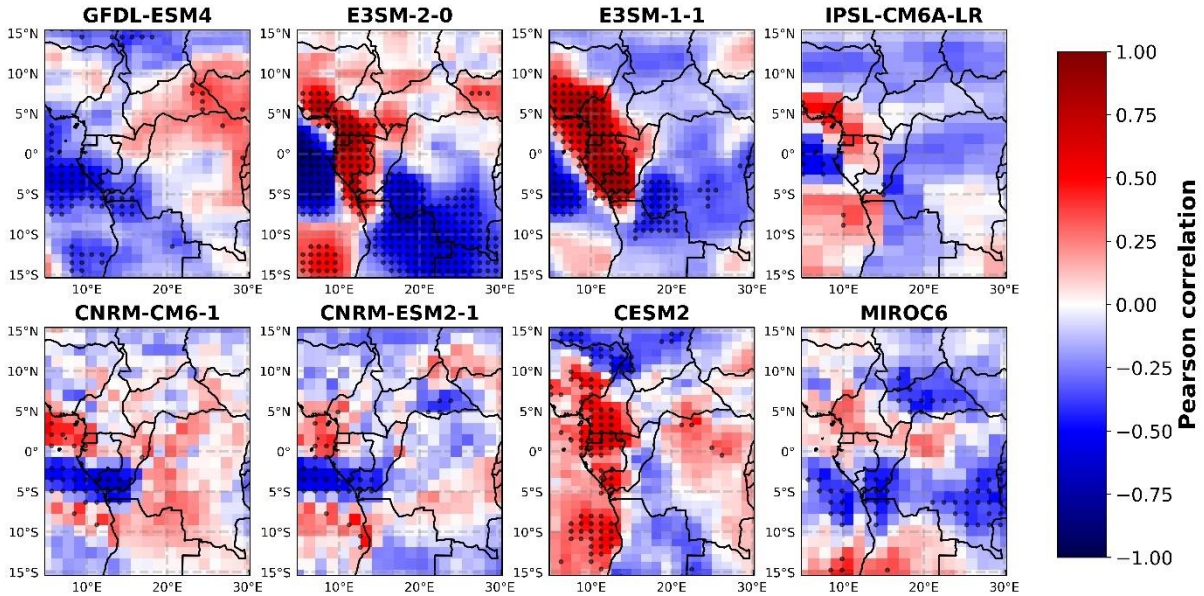

Figure IV. 13 - Corrélations spatiales (1983-2014) entre l'indice de SST calculé sur la région équatoriale est de l'océan Atlantique (9-2°S, 5-13°E, cadre rouge dans la figure IV.10a) et le champ spatial de rayonnement solaire pour la saison JJAS. Les points noirs indiquent les pixels présentant une corrélation significative à un niveau de confiance de 95 %.

Les modèles CMIP6 (Figure IV.13) présentent des schémas de corrélation avec la SST de l'océan atlantique qui diffèrent largement entre les modèles. Les deux modèles E3SM et le modèle CESM2 présentent des corrélations positives et significatives dans la majorité de la région du Gabon-Congo, plus prononcées pour les modèles E3SM (R>0.8), s'étendant le long de la côte atlantique jusqu'au Golfe de Guinée, ce qui indique que les années montrant des niveaux élevés de rayonnement solaire JJAS au Gabon-Congo coïncident avec un océan Atlantique plus chaud que d'habitude. L'IPSL ne montre pas de corrélation significative sur la région Gabon-Congo, alors que MIROC6 montre des corrélations négatives seulement sur le sud du Congo. Les deux modèles du CNRM présentent également des corrélations négatives sur le sud du Congo.

De façon générale, les températures chaudes dans la région équatoriale est de l'océan Atlantique impliquent des niveaux élevés de rayonnement solaire dans CESM2 et les deux modèles E3SM au Gabon-Congo. A l'inverse, dans MIROC6, GFDL et les deux modèles CNRM, les températures chaudes coïncident avec des niveaux de rayonnement solaire plus faibles au sud du Congo. Ils présentent également des corrélations spatiales négatives entre l'indice de rayonnement solaire JJAS pour la région sud-ouest et le champ spatial de la SST JJAS pour l'océan Atlantique (Annexe D).

Camberlin et al., (2023) ont montré que les simulations AMIP sont meilleures que les modèles couplés dans la simulation de l'interaction SST-nuages bas, ils suggèrent qu'une grande partie des défauts de la relation entre la SST et les nuages bas dans les simulations couplées provient de mauvaises interactions entre l'océan et l'atmosphère, qui se projettent sur une variabilité trop faible de la température océanique. Certains modèles CMIP6 présentent des anomalies de SST opposées entre l'Atlantique tropical nord et l'océan équatorial et sud, ce qui

suggère des disparités dans la performance de ces modèles à capturer la relation vent-SST dans la région (Xia et al., 2023). En outre, il a été observé que les modèles climatiques sous-estiment généralement le réchauffement dû aux aérosols de combustion de la biomasse d'Afrique centrale sur l'Atlantique Sud-Est (Mallet et al., 2021), ce qui indique des limites potentielles dans la capture du bilan radiatif, et des propriétés des nuages dans la région.

5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons mené une analyse du rayonnement solaire, de ses relations avec la couverture nuageuse et les SST, dans huit modèles climatiques globaux CMIP6, en nous concentrant sur la région Gabon-Congo. En examinant cette série de modèles climatiques CMIP6, nous cherchons à comprendre le niveau des biais dans les modèles pour le rayonnement solaire, et les facteurs (nébulosité, température de surface de la mer ; SST) qui contrôlent ces biais. En outre, nous cherchons à comprendre dans quelle mesure ces facteurs contrôlent la variabilité de rayonnement solaire.

Nos résultats mettent en lumière les dynamiques complexes qui influencent le rayonnement solaire. Nous avons commencé par examiner la performance de ces huit modèles CMIP6 (GFDL-ESM4, E3SM-1-1, E3SM-2-0, IPSL-CM6A LR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, CESM2, et MIROC6) par rapport aux données satellitaires SARAH-2. Nous constatons notamment des variations importantes dans la représentation du rayonnement solaire entre les modèles. Le modèle CESM2 se distingue par la meilleure corrélation spatiale et une erreur quadratique moyenne minimale par rapport à SARAH-2 sur l'ensemble de l'Afrique Centrale. En revanche, dans la région Gabon-Congo, les deux modèles CNRM présentent des meilleurs scores, malgré une sous-estimation considérable du rayonnement solaire.

En outre, nous avons analysé les cycles annuels moyens du rayonnement solaire, découvrant des distinctions notables entre les sous-régions du sud-ouest et du nord-est du Gabon-Congo. La région du sud-ouest, sur la façade Atlantique, a toujours reçu moins de rayonnement solaire dans SARAH-2 que la région intérieure du nord-est, qui présentait des niveaux plus élevés de rayonnement solaire. Cela correspond aux résultats du chapitre II. Cependant, les modèles ont eu du mal à reproduire avec précision Cette caractéristique, seuls les modèles CNRM, CESM2 et, de façon moins nette, IPSL parvenant à capturer cette caractéristique. Il est important de souligner que la limite entre les deux sous-régions correspond au massif du Chaillu. Cependant, les modèles n'en tiennent pas compte de façon optimale, négligeant son impact topographique dans le blocage des vents et des masses d'air humide. Par conséquent, la formation de nuages bas est mal représentée, se produisant plus à l'intérieur du continent. De ce fait, le minimum de rayonnement solaire est observé plus à l'intérieur du continent contrairement à ce qui est observé dans SARAH-2.

L'orientation et la vitesse des vents pourrait expliquer les différences observées. En JJAS, les vents dominants soufflent de l'océan du SW vers le NE (Annexe D), apportant avec eux une masse d'air humidifiée. L'interaction avec la topographie (pentes du massif de Chaillu) favorise la formation des nuages bas. À l'inverse, dans la région nord-est, sous le vent du massif du Chaillu connaît des vents plus faibles (ne dépassent pas 2 m/s, Annexe D). Ceci limite le

transport d'air chargé d'humidité en provenance de l'océan, ce qui réduit la formation de nuages et, par conséquent, augmente les niveaux de rayonnement solaire dans cette sous-région dans les observations. Alors que les modèles CMIP6 capturent généralement bien la direction des vents de surface, leur capacité à reproduire l'intensité de ces vents est limitée (Camberlin et al., 2023).

Pour comprendre les biais dans le rayonnement solaire moyen des modèles, nous avons procédé à une analyse des données CMIP6 de la couverture nuageuse et de la température de surface de la mer (SST), en examinant également leur impact sur la variabilité interannuelle du rayonnement solaire. Nos résultats ont démontré que les types de nuages, de basse et moyenne altitude, jouent un rôle central. La présence accrue de nuages bas entraîne une réduction du rayonnement solaire. Les nuages de moyenne altitude influencent le rayonnement solaire d'une manière complexe, leur impact variant d'un modèle à l'autre. Alors que Certains modèles n'ont pas réussi à monter des niveaux de nuages bas élevés sur la région sud-ouest du Gabon-Congo ou bien le font mais avec un décalage longitudinal vers l'est, clairement observée dans les modèles E3SM et CNRM. Tous les modèles ont montré une relation négative entre le rayonnement solaire et les nuages bas dans les deux sous-régions, à l'exception du modèle GFDL dans la région sud-ouest.

Concernant la SST dans ces modèles, nos résultats ont révélé une dynamique surprenante : dans la région sud-ouest, la SST présente une corrélation négative avec le rayonnement solaire, ce qui suggère que des températures océaniques plus froides coïncident avec des niveaux de rayonnement solaire élevés. En revanche, la région du nord-est présentait une corrélation positive, indiquant que des températures plus chaudes étaient associées à des niveaux de rayonnement solaire élevés. Ce contraste dans les relations entre la SST et le rayonnement solaire dans les modèles CMIP6 entre les deux sous-régions met en évidence les complexités régionales des interactions climatiques et souligne l'importance d'incorporer de telles nuances dans les modèles climatiques afin d'améliorer notre compréhension de la dynamique climatique régionale.

En conclusion, notre étude fournit des informations sur les relations complexes qui régissent la variabilité de rayonnement solaire dans la région Gabon-Congo. Afin d'améliorer notre compréhension de cette variabilité, les études futures devraient envisager d'explorer diverses réalisations et paramétrisations des simulations CMIP6, y compris l'inclusion des projets de comparaison des modèles atmosphériques (AMIP, Atmospheric Model Intercomparison Projects), afin de fournir des indications sur le comportement de l'atmosphère sans interactions directes avec l'océan, ce qui peut nous aider à mieux comprendre le rôle des processus atmosphériques dans la variabilité du rayonnement solaire. Les simulations AMIP utilisent des températures de surface de la mer prescrites à partir d'observations plutôt que d'être prédites par le modèle lui-même. Cette approche permet d'isoler et d'étudier la composante atmosphérique des modèles climatiques, ce qui est particulièrement utile pour étudier l'impact des nuages sur le rayonnement solaire. De tels efforts contribueront à affiner les prévisions climatiques régionales et à renforcer notre capacité à relever les défis liés au climat dans cette région importante du globe.

Conclusion et perspectives

1 Conclusion

Résumé des objectifs et de l'approche méthodologique

La région d'Afrique Centrale occidentale, abritant les forêts les plus denses du bassin du Congo, se caractérise par son climat équatorial avec des températures élevées et un régime pluviométrique bimodal (Bush et al., 2020). En outre, elle connaît une longue saison sèche nuageuse de juin à septembre (Philippon et al., 2019). Cette région joue un rôle crucial dans le système climatique mondial. Cependant, malgré son importance écologique, la variabilité climatique de cette région reste peu étudiée (Dezfuli., 2017) en raison de la rareté des observations in-situ.

Par ailleurs, cette étude explore la variabilité climatique des forêts d'Afrique centrale en se concentrant sur le rayonnement solaire. Cette variable climatique permet de comprendre les relations entre les paramètres atmosphériques et la dynamique climatique régionale. De plus, cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Dyvalocca, plus précisément, le Workpackage 5 sur la disponibilité en eau et en lumière pour les forêts sous la couverture nuageuse basse.

Dans ce contexte, cette thèse s'articulait autour des trois objectifs suivants :

- Dresser une première climatologie du rayonnement solaire incident en Afrique Centrale et évaluer la performance des différentes bases de données satellitaires disponibles.
- Caractériser la variabilité interannuelle du rayonnement solaire, notamment durant la grande saison sèche nuageuse juin-septembre en Afrique Centrale occidentale et apporter des éléments de compréhension sur les facteurs qui contrôlent la variabilité du rayonnement durant cette saison.
- Évaluer la capacité des modèles climatiques globaux CMIP6 à simuler le rayonnement solaire en Afrique Centrale pour la période historique.

Plusieurs approches ont été suivies au cours de cette thèse afin d'atteindre ces objectifs. Dans un premier temps, nous avons utilisé diverses mesures statistiques pour évaluer la capacité des produits satellitaires à reproduire les variations moyennes du rayonnement solaire dans la région. Ces mêmes mesures ont ensuite été utilisés pour évaluer la performance des modèles climatiques CMIP6. Nous avons aussi mis en œuvre l'approche en cycle diurne, en classant les jours en quatre types pour comprendre les évolutions intra-saisonnières du rayonnement solaire notamment celles associées aux dates de démarrage et de fin de la saison sèche, qui ont été extraites avec l'approche en anomalies cumulées. La méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) nous a permis d'extraire les principaux modes de variabilité du rayonnement, et d'analyser les tendances. L'intégration de ces diverses approches et outils statistiques a contribué collectivement à la réalisation des objectifs de recherche décrits dans cette thèse.

Résultats principaux

Dans le chapitre II de ce mémoire, nous avons évalué, pour la première fois en Afrique Centrale la performance de 8 produits satellitaires d'estimation de rayonnement solaire (CERES-EBAF, CERES-SYN1deg, TPDC, CMSAF SARAH-2, CMSAF CLARA-A2, CAMS-JADE, WorldClim 2 et les réanalyses ERA5) de l'échelle annuelle aux cycles diurnes. Nos résultats ont montré que tous les produits, à l'exception de WorldClim 2, ont pu reproduire le schéma spatial moyen de rayonnement solaire à l'échelle annuelle et montrent que la façade atlantique de l'Afrique Centrale reçoit le moins de rayonnement solaire.

Les produits satellitaires reproduisent bien les cycles annuels moyens du rayonnement solaire, caractérisés par un maximum en février-mars et un minimum en juillet-août. Les deux produits CMSAF SARAH-2 et CMSAF CLARA-A2 présentent systématiquement des niveaux de rayonnement solaire plus élevés par rapport aux autres produits, en particulier pendant la saison sèche boréale ensoleillée décembre-février. En revanche, les deux produits CERES-EBAF et CERES-SYN1deg montrent des niveaux de rayonnement solaire plus faibles, en particulier pendant la saison sèche nuageuse en juillet-août.

Ensuite, à l'échelle journalière, quatre produits – CMSAF SARAH-2, CAMS-JADE, CERES-SYN1deg, et les réanalyses ERA5 - ont été examinés et comparés aux mesures in situ disponibles en Afrique Centrale occidentale. Ces produits capturent bien le cycle annuel moyen du rayonnement solaire, présentant des corrélations fortes et statistiquement significatives (>0.7), les corrélations les plus élevées étant observées pour CMSAF SARAH-2 et CAMS-JADE. Néanmoins, il convient de noter que les quatre produits ont surestimé les niveaux de rayonnement solaire.

A l'échelle infra-journalière, la performance de ces produits a été évaluée en tenant compte de quatre types de cycles diurnes de rayonnement solaire - les jours Obscurs, Obscurs AM (matin), Obscurs PM (après-midi) et Lumineux. Bien que les produits reproduisent correctement la forme des quatre types de cycles diurnes, leur amplitude est généralement grande, en particulier pour les jours Obscurs AM et Obscurs PM. En outre, les résultats montrent des disparités régionales dans la fréquence des quatre types de cycles diurnes : le Nord de la République du Congo a connu plus de jours lumineux, tandis que le Gabon et le Sud de la République du Congo ont connu plus de jours Obscurs AM ou Obscurs, ce qui est en accord avec les niveaux annuels moyens.

De l'échelle annuelle aux cycles diurnes, les variations du rayonnement solaire sont principalement influencées par les nuages et les aérosols, la précision des estimations du rayonnement solaire dépend de la détection exacte de ces paramètres. La détection des nuages bas constitue un défi important dans la région, en particulier pendant la saison sèche, lorsqu'ils sont pour partie masqués par les aérosols. Il convient de souligner que CMSAF SARAH-2 et CLARA-A2 s'appuient sur une climatologie mensuelle des aérosols, ce qui peut contribuer à la tendance observée de ces deux produits à surestimer les niveaux de rayonnement solaire.

Toutefois, il convient de souligner que les biais trouvés dans les produits satellitaires par rapport aux observations sont en partie liés à la difference de fenêtre spectrale entre ces

deux sources. Les stations météorologiques utilisées dans cette étude sont équipées de pyranomètres enregistrant le rayonnement solaire sur des fenêtres spectrales allant de 300nm à 1200nm, une plage moins étendue que celle des fenêtres spectrales des produits satellitaires.

Finalement, les résultats ce chapitre répondent aux questions posées dans l'introduction, en réalisant l'objectif principal d'établir une climatologie initiale du rayonnement solaire incident dans la région, et évaluer les performances des diverses bases de données satellitaires d'estimation de rayonnement solaire à notre disposition.

Dans le chapitre III, nous nous sommes concentrés sur deux segments principaux. Le premier volet a porté sur l'étude de la variabilité interannuelle et des tendances du rayonnement solaire pendant la saison sèche nuageuse de juin à septembre. Pour ce faire, nous avons utilisé deux produits - CMSAF SARAH-2 et les réanalyses ERA5 - pour la période 1983-2020, et en appliquant des ACP pour extraire les 1ers modes de variabilité. Le premier résultat de ce chapitre est surprenant : nous constatons que SARAH-2 et ERA5 présentent des tendances opposées de rayonnement solaire. SARAH-2 montre une tendance à la baisse (significative uniquement en juillet et septembre) avec un assombrissement dans les années 2010, tandis qu'ERA5 montre une tendance à la hausse significative pour tous les mois, avec une rupture notable dans les années 1995. Cette différence de tendance entre les deux produits est certainement liée aux différentes méthodes de calcul et d'estimation intégrées dans leurs algorithmes respectifs.

Ensuite, nous avons regardé également les tendances dans la couverture nuageuse totale COMET et les nuages bas ERA5. Les résultats révèlent des tendances significatives et à la baisse seulement dans la couverture nuageuse basse ERA5, ce qui est en accord avec la tendance à la hausse dans le rayonnement ERA5. Les corrélations entre les premières composantes principales (PC1) de la couverture nuageuse totale COMET et basse ERA5 et du rayonnement solaire SARAH-2 et ERA5 montrent des relations négatives conformes à l'attendu. Cependant, il y a des fluctuations intra-saisonnières marquées dans ces corrélations avec une corrélation SARAH-2 avec COMET faible en juillet et avec les nuages bas ERA5 positive (donc non conforme à l'attendu) en août. Ceci nous a conduit à explorer brièvement les liens avec le contenu en aérosols CAMS (AOD à 550nm) qui sont faibles et non significatifs voire non conformes (corrélation positive) pour le mois d'août. Cependant, Il est important de noter que la période couverte par les données AOD est courte (2003-2017), ce qui rend ce résultat moins robuste et limité dans son applicabilité. De plus, la présence des nuages bas sous la couche d'aérosols rend la détection de ces derniers compliquée (soit depuis le sol par les photomètres soit depuis l'espace par les satellites) et aboutit à de fortes incertitudes dans leur estimation et donc leur réanalyse.

Dans cette première partie du chapitre, il est admis que l'absence de données in situ à long terme introduit un certain niveau d'incertitude. Cependant, notre étude s'est efforcée de répondre à cette incertitude et a relevé ce défi en exploitant les données satellitaires qui nous sont accessibles.

La deuxième partie de ce chapitre porte sur l'identification et l'analyse des dates de début et de fin de la saison sèche, en appliquant la méthode des anomalies cumulées (AA) aux données journalières de rayonnement solaire. D'après nos résultats, la date moyenne de début de la saison sèche selon CMSAF SARAH-2 est le 17 mai (±13 jours), tandis que la date moyenne de fin le 3 octobre (±16 jours). La variabilité interannuelle de ces dates ne montre pas de tendance significative au cours de la période d'étude (1983-2020).

En les comparant avec des dates dérivées des précipitations CHIRPS et des nuages bas ERA5, les données de rayonnement solaire montrent que la saison sèche commence plus tôt, tandis que les données de nuages bas indiquent des dates plus tardives. Les données de précipitations montrent des dates intermédiaires. Ces résultats nous ont conduit à formuler une hypothèse visant à expliquer ces écarts observés entre les dates de début de la saison sèche. Après l'arrêt des pluies dans la région, la transition entre la saison des pluies et la saison sèche commence selon les données de précipitations. Au cours de cette phase, la diminution progressive du nombre de jours de pluie résulte d'une diminution de la fréquence de nuages hauts et moyens au profit des nuages bas stratiformes qui. Bien que ces nuages bas ne soient pas précipitants, ils sont denses et opaques, ce qui entraine une diminution des niveaux de rayonnement solaire, qui à son tour, marque le début de la saison sèche selon le rayonnement solaire. En outre, l'écart important entre les dates dérivées des nuages bas et du rayonnement solaire est probablement associé à la sous-estimation par ERA5 de la quantité des nuages bas de juin à septembre. Par conséquent, cette sous-estimation peut conduire à un début plus tardif de la saison sèche.

Ensuite, en utilisant la classification K-means, nous avons classé les années de la période d'étude en trois types distincts sur la base des caractéristiques de la saison sèche. Les résultats ont montré que les années de type 1 présentent des saisons sèches anormalement lumineuses avec un début tardif, tandis que les années de type 3 sont marquées par des saisons sèches plus sombres et un début précoce. La relation entre ces trois types et les quatre types de cycles diurnes fait également l'objet des travaux de ce chapitre. Les résultats indiquent que les années de type 1 présentent des fréquences élevées de jours lumineux et obscurs AM en début de saison sèche (mai-juillet). En revanche, les années de type 3, présentent des fréquences élevées de jours obscurs entre mai et septembre. Ce résultat confirme que les caractéristiques de la saison sèche se traduisent en termes de fréquence des types de cycles diurne de rayonnement solaire. Il confirme de plus l'intérêt de l'approche en cycles diurnes pour appréhender les interactions d'échelles temporelles : interannuel, intra-saisonnier, diurne.

Enfin, en réponse à la dernière question posée dans ce chapitre concernant l'influence des températures de surface de la mer (SST) sur la saison sèche, nous avons étudié le lien entre SST et dates de début, de fin et type de saison sèche. Les résultats indiquent que des températures anormalement chaudes (froides) de l'océan Atlantique équatorial correspondent à des débuts tardifs (précoces) de la saison sèche, et une saison sèche plus (moins) lumineuse que la normale. Par contre, aucune relation significative n'a été trouvée avec le Pacifique et notamment les indices Niño, contrairement à l'étude de Moron et al (2023) sur les nuages bas.

Dans le chapitre IV, la capacité de huit modèles climatiques globaux CMIP6 – GFDL-ESM4, E3SM-1-1, E3SM-2-0, IPSL-CM6A LR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, CESM2, et MIROC6 – à simuler le rayonnement solaire en Afrique Centrale a été évaluée pour la période historique 1983-2014. Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur la compréhension des variations spatiotemporelles moyennes du rayonnement solaire dans les modèles CMIP6 et sur l'évaluation de leur performance à reproduire ces variations. Les premiers résultats révèlent une différence dans la compétence des modèles à travers la région. À l'échelle de l'Afrique Centrale, CESM2 se distingue par sa meilleure corrélation spatiale, tandis qu'à l'échelle de la région Gabon-Congo en Afrique centrale occidentale, les deux modèles CNRM présentent les meilleurs scores.

Le focus a ensuite porté sur la région du Gabon-Congo en se concentrant spécifiquement sur les deux sous-régions du sud-ouest et du nord-est. Les résultats montrent des distinctions notables entre les deux sous-régions. Les modèles ne réussissent pas à montrer comme dans les observations que la région sud-ouest reçoit les faibles niveaux de rayonnement solaire que les autres régions d'Afrique Centrale. Une caractéristique qui n'est reflétée que par le CESM2 et les deux modèles du CNRM.

Dans la région sud-ouest, tous les modèles sous-estiment systématiquement le rayonnement solaire d'environ 15 W/m^2 par rapport à SARAH-2. Pendant la saison sèche juin-septembre (JJAS), MIROC6, E3SM-1-1, et des deux modèles du CNRM surestiment légèrement le rayonnement solaire d'environ 5 W/m^2. En plus, les différences les plus importantes entre les modèles et SARAH-2 sont observées lors de la saison pluvieuse octobre-novembre. Dans la région nord-est, les modèles présentent des cycles saisonniers différents. Ils sous-estiment légèrement le rayonnement solaire de janvier à avril, tandis qu'ils le surestiment le reste de l'année, à l'exception de E3SM2-0 qui le sous-estime pendant la saison sèche (JJAS). Les surestimations les plus importantes, de l'ordre de 20-30 W/m^2 sont observées en octobre-novembre.

Enfin, nous avons étudié la relation entre la variabilité du rayonnement solaire et la couverture nuageuse dans les modèles, en prenant en compte les données des trois types de nuages (bas, moyen et haut). Les résultats montrent que les nuages, de basse et moyenne altitude, jouent un rôle central dans la régulation des champs de rayonnement solaire.

Bien que certains modèles n'aient pas réussi à représenter des niveaux élevés de nuages bas sur la région sud-ouest du Gabon-Congo ou l'aient fait mais avec un déplacement longitudinal vers l'est, clairement observé dans les modèles E3SM et CNRM. Tous les modèles montrent une relation négative entre le rayonnement solaire et les nuages bas dans les deux sous-régions, à l'exception du modèle GFDL dans la région sud-ouest. D'ailleurs, les nuages de moyenne altitude montrent également une relation négative avec le rayonnement solaire mais celle-ci varie selon les modèles.

Par la suite, nous avons exploré le lien entre la SST de l'océan Atlantique équatorial et le rayonnement solaire. Les résultats ont montré une téleconnexion qui diffère : dans la région nord-est, une corrélation positive est bien observée, indiquant que des températures plus

chaudes de l'océan atlantique équatorial, défavorables à la formation des nuages bas, sont associées à des niveaux de rayonnement solaire élevés. Mais pour la région sud-ouest, la SST présente une corrélation négative avec le rayonnement solaire, ce qui suggère que des températures océaniques plus froides coïncident avec des niveaux de rayonnement solaire élevés. Cela souligne que ce ne sont pas les mêmes mécanismes qui pilotent le rayonnement dans les modèles entre les deux sous entités régionales.

2 Perspectives

Cette dernière section examine les possibilités d'améliorations méthodologiques et aborde certaines des questions de recherche encore en suspens à la fin de ces travaux.

Chapitre II : Vers de nouvelles bases de données

Bien que ce travail soit à notre connaissance le seul à avoir utilisé des données in-situ de rayonnement pour l'Afrique centrale, la disponibilité de ces données reste limitée, ce qui empêche toute évaluation approfondie des produits satellitaires et de réanalyse, en particulier sur une longue période. Une nouvelle station météorologique a été mise en service au Gabon à Bambidie en mars 2020, située à 200 km au nord la station Lékédi. Cette station fournit des données infra-journalières sur toutes les composantes de rayonnement solaire (direct, diffus, photosynthétiquement active, ainsi que le rayonnement solaire sortant) permettant d'étudier le bilan radiatif dans la région, ouvrant la voie à de nouvelles études, et renforçant ainsi le réseau de stations existant.

Par ailleurs, une version récente des enregistrements de données CMSAF (SARAH-3 et CLARA-A3) a été publiée récemment (Karlsson et al., 2023 ; Pfeifroth et al., 2023), ce qui contribue à l'obtention d'estimations satellitaires plus précises du rayonnement solaire. Des études futures d'évaluation de ces deux produits pour la région joueront un rôle essentiel dans la compréhension des modifications et des distinctions entre ces deux nouvelles versions. Une comparaison préliminaire entre les versions SARAH-2 et SARAH-3 (figure V.1) montre une très bonne adéquation (corrélation positive significative >0.9) dans les données journalières moyennes de rayonnement solaire (1983-2020). Cependant, des différences ont été observées entre les deux produits, variant selon la sous-région (non montré).

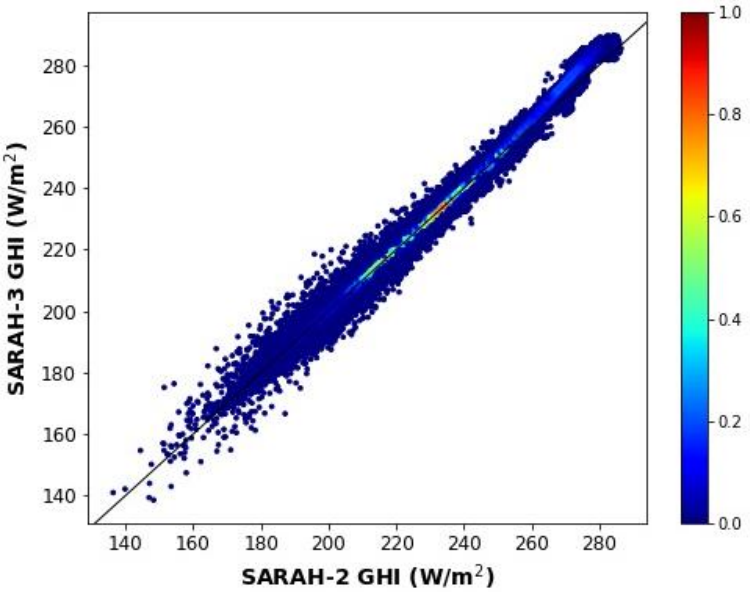

Figure V. 1 - Nuages de points entre les moyennes journalières de rayonnement solaire SARAH-2 et SARAH-3 sur la période 1983-2020 dans la région Gabon-Congo.

Chapitre III : Vers une meilleure identification des dates de la saison sèche

L'étude de la variabilité interannuelle du rayonnement solaire dans la première partie de ce chapitre, a posé des défis de validation en raison de l'absence de mesures in situ à long terme dans la région. Nous avons également été confrontés à la difficulté de comprendre comment la variabilité interannuelle du rayonnement sur la région était modulée par celle de la nébulosité et du contenu en aérosols à partir des produits satellites et de réanalyses. Une piste potentielle pour faire avancer cette recherche consisterait à utiliser des données sur le rayonnement solaire dans des conditions de ciel clair. Cela nous permettrait d'éliminer l'impact radiatif des nuages et de nous concentrer sur la compréhension de l'influence des aérosols sur la variabilité du rayonnement solaire dans la région.

Le produit CERES-SYN1deg par exemple, et malgré sa courte période de disponibilité d'une vingtaine d'années, fournit une variable de rayonnement solaire pour toutes conditions de ciel sans aérosol. Cette caractéristique unique nous permet de dissocier les effets radiatifs des nuages et des aérosols, facilitant ainsi la compréhension des contributions respectives de ces deux paramètres à la variabilité interannuelle du rayonnement solaire. Par ailleurs les données très haute résolution (1 min) acquises à Bambidie pourrait également aider à distinguer l'effet des nuages et des aérosols.

La deuxième partie de ce chapitre s'est concentrée sur la détection des dates de début et de fin de la saison sèche. Nous avons opté pour l'approche en anomalies cumulées appliquée séparément aux trois variables d'intérêt : le rayonnement solaire, la nébulosité basse et les précipitations. Une comparaison de plusieurs approches disponibles dans la littérature pour la détection de ces dates permettrait d'évaluer la sensibilité des dates détectées à la méthode. De plus il pourrait être intéressant de développer un indice combinant les trois paramètres.

Un autre aspect remarquable est la bonne relation entre la date de début de la saison sèche et la SST de l'Atlantique tropical sud et équatorial. Compte tenu de la persistance des anomalies de la SST dans les tropiques, il est possible de développer des modèles à petite échelle pour prédire le début de la saison sèche. De tels modèles pourraient être utiles pour la gestion des ressources en eau, les calendriers agricoles, la gestion des forêts et d'autres aspects similaires.

Un début précoce et une fin tardive de saison sèche signifient peu de précipitations mais aussi peu de lumière pour les forêts. Au contraire un début tardif et une fin précoce signifient des niveaux anormalement élevés de rayonnement solaire accompagnés de températures plus chaudes qui peuvent accroître la demande en eau des forêts. Il serait donc intéressant de savoir la réaction de la forêt à ces deux types opposés de saisons sèches. En raison de la couverture nuageuse, les indices de végétation classiques de type NDVI ne permettent pas d'évaluer si la forêt subit une réduction de la photosynthèse ou modifie ses phases phénologiques. Toutefois, l'utilisation d'indices dérivés de la télédétection radar active, comme la VOD (Vegetation Optical Depth ; Frappart et al., 2020), qui pénètre à travers les nuages, pourrait permettre de déterminer s'il existe des modulations significatives de la teneur en eau de la forêt et du sol.

Chapitre IV : l'évolution future du rayonnement solaire en Afrique Centrale

Le chapitre IV a fourni des informations importantes sur la manière dont les modèles CMIP6 capturent les variations spatiotemporelles du rayonnement solaire dans la région sur la période historique. Cependant, des déficiences importantes sont identifiées dans la simulation du rayonnement solaire par les modèles couplés CMIP6. Ces déficiences sont principalement associées à la simulation inadéquate des températures de surface de l'Atlantique tropical sud et équatorial, où les températures sont trop élevées pendant l'été boréal. Ce problème n'est pas nouveau (Richter and Xie 2008 ; Richter et al. 2014 ; Xu et al. 2014 ; Voldoire et al., 2019). Une question importante se pose : ces déficiences sont-elles moins marquées dans les simulations forcées AMIP ?

En outre, ces déficiences semblent également être liées à la résolution spatiale des modèles. Le gradient est/ouest de la couverture nuageuse basse et, par conséquent, de rayonnement solaire, est influencé par l'interaction entre le flux de mousson et la topographie. Alors que les modèles climatiques globaux ne prennent pas suffisamment en compte la topographie, ce qui entraîne un déplacement des minima de rayonnement solaire vers l'est. Une question cruciale se pose : les modèles climatiques régionaux, caractérisées par une représentation plus réaliste de la topographie, produisent-ils un champ de rayonnement solaire correspondant mieux aux observations ? La réponse à ces questions est essentielle pour affiner notre compréhension de la performance des modèles CMIP6 dans la simulation du rayonnement solaire et pour identifier des pistes potentielles d'amélioration.

Dans le cadre de futures études, il serait intéressant de considérer l'utilisation des simulations AMIP, Ces simulations ont montré leur efficacité par rapport aux modèles couplés (Camberlin et al., 2023 ; Zhou et al., 2019). De plus, une étude de la variabilité des aérosols et

des précipitations dans les modèles CMIP6 permet d'explorer la relation avec la variabilité du rayonnement solaire, un aspect qui n'a pas été exploré dans notre étude. En outre, l'utilisation des modèles climatiques régionales (RCM) à très haute résolution pourrait être envisagée. Ces modèles, en simulant les processus atmosphériques à une échelle spatiale plus fine, permettent une représentation plus détaillée des phénomènes météorologiques régionaux. Leur utilisation pourrait fournir des informations plus précises sur la variabilité du rayonnement solaire dans la région, complétant ainsi les résultats obtenus à partir des modèles CMIP6.

De plus, le cycle annuel moyen du rayonnement solaire de la moyenne multi-modèle dans le nord-est du Gabon-Congo (figure IV.3) montre une augmentation du rayonnement solaire à partir de juillet plutôt que septembre, contrairement aux observations. Cette augmentation précoce soulève des questions quant à la précision des modèles à identifier le début et la fin de la saison sèche nuageuse. Cela pourrait faire l'objet de futures recherches.

D'ailleurs, étant donné le rôle important du rayonnement solaire dans le bilan radiatif de la Terre et la vulnérabilité de l'Afrique centrale au changement climatique, une étude de l'évolution future du rayonnement solaire dans la région s'avère nécessaire. Cependant, pour que l'on puisse tirer des conclusions sur cette évolution future, il est crucial de rectifier le biais de la SST de l'Atlantique tropical sud et équatorial. Un tel travail nous permettra de comprendre l'évolution future du rayonnement solaire selon les différentes projections des modèles climatiques CMIP6. Il est essentiel de comprendre les implications de ces scénarios pour prendre des décisions éclairées et élaborer des stratégies visant à atténuer les menaces potentielles qui pèsent sur la forêt.

Au final, Cette étude ainsi que celles à venir devraient fournir toutes les informations permettant à répondre à la question suivante : Est-ce que le changement climatique pourrait atténuer la couverture nuageuse dans la région, et par conséquent déstabiliser la forêt ?

Références Bibliographiques

Ali, G., Bao, Y., Ullah, W., Ullah, S., Guan, Q., Liu, X., Li, L., Lei, Y., Li, G., & Ma, J. (2020). Spatiotemporal trends of aerosols over urban regions in Pakistan and their possible links to meteorological parameters. Atmosphere, 11(3). https://doi.org/10.3390/atmos11030306

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, January 1998.

Audry, S. (2012). Meteorological data, Nyong, Cameroon [Data set]. Theia. https://doi.org/10.6096/BVET.CMR.METEO.

Babar, B., Graversen, R., & Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. Solar Energy, 182(August 2018), 397–411. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058

Bader, David C.; Leung, Ruby; Taylor, Mark; McCoy, Renata B. (2019). E3SM-Project E3SM1.1 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191211.Earth System Grid Federation. https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11485

Bedia, J., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2013). Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections. Global and Planetary Change, 107, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.005

Bellouin, N., Davies, W., P. Shine, K., Quaas, J., Mülmenstädt, J., M. Forster, P., Smith, C., Lee, L., Regayre, L., Brasseur, G., Sudarchikova, N., Bouarar, I., Boucher, O., & Myhre, G. (2020). Radiative forcing of climate change from the Copernicus reanalysis of atmospheric composition. Earth System Science Data, 12(3), 1649–1677. https://doi.org/10.5194/essd-12-1649-2020

Benedetti, A., Kaiser, J. W., and Morcrette, J.-J.(2011). Global Climate, Aerosols in: State of the Climate in 2010, Bull. Am. Meteorol. Soc., 92, S65–S67.

Bigot, S., Philippon, N., Gond, V., Moron, V et al. (2016) Etat actuel des réseaux de mesures éco-climatiques en Afrique Centrale. 29 ème Colloque de l'AIC, eds Camberlin P, Richard Y (Dijon), pp 101–106.

Blanc, P., Gschwind, B., Lefevre, M., & Wald, L. (2014). Twelve monthly maps of ground Albedo parameters derived from MODIS data sets. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 3, 3270–3272. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947177

Boilley, A., & Wald, L. (2015). Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. Renewable Energy, 75, 135–143. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.042

Boiyo, R.; Kumar, K.R.; Zhao, T. Statistical intercomparison and validation of multisensory aerosol optical depth retrievals over three AERONET sites in Kenya, East Africa, Atmospheric Research, Volume 197, 2017, Pages 277-288. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.012.

Bojanowski, J. S., & Musiał, J. P. (2020). Dissecting effects of orbital drift of polar-orbiting satellites on accuracy and trends of climate data records of cloud fractional cover. Atmospheric Measurement Techniques, 13(12), 6771–6788. https://doi.org/10.5194/amt-13-6771-2020

Bojanowski, J.S.; Stöckli, R.; Duguay-Tetzlaff, A.; Finkensieper, S.; Hollmann, R. Performance Assessment of the COMET Cloud Fractional Cover Climatology across Meteosat Generations. Remote Sens. 2018, 10, 804. https://doi.org/10.3390/rs10050804

Boluwade, A. (2023). Spatial-Temporal Evaluation of Satellite-Derived Rainfall Estimations for Water Resources Applications in the Upper Congo River Basin. Research Square. https://doi.org/doi.org/10.21203/rs.3.rs-3148561/v1

Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S., Bonnet, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., D'Andrea, F., … Vuichard, N. (2020). Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(7), 1–52. https://doi.org/10.1029/2019MS002010

Boyard-Micheau, J., Camberlin, P., Philippon, N., & Moron, V. (2013). Regional-scale rainy season onset detection: A new approach based on multivariate analysis. Journal of Climate, 26(22), 8916–8928. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00730.1

Buffat, R., & Grassi, S. (2016). Validation of CM SAF SARAH solar radiation datasets for Switzerland. Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015. https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455044

Bush, E. R., Jeffery, K., Bunnefeld, N., Tutin, C., Musgrave, R., Moussavou, G., Mihindou, V., Malhi, Y., Lehmann, D., Ndong, J. E., Makaga, L., & Abernethy, K. (2020). Rare ground data confirm significant warming and drying in western equatorial Africa. PeerJ, 2020(4), 1–29. https://doi.org/10.7717/peerj.8732

Camberlin, P., Barraud, G., Bigot, S., Dewitte, O., Makanzu Imwangana, F., Maki Mateso, J. C., Martiny, N., Monsieurs, E., Moron, V., Pellarin, T., Philippon, N., Sahani, M., & Samba, G. (2019). Evaluation of remotely sensed rainfall products over Central Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *145*(722), 2115–2138. https://doi.org/10.1002/qj.3547

Camberlin, P., Togbedji, C. F., Pergaud, J., Berger, A., Aellig, R., Fink, A. H., Knippertz, P., Moron, V., & Philippon, N. (2023). The representation of dry-season low-level clouds over Western Equatorial Africa in reanalyses and historical CMIP6 simulations. Climate Dynamics, 0123456789. https://doi.org/10.1007/s00382-023-06714-w

Cao. Q, Hao. Z, Shao. Q, Hao. J, Nyima. T, Variability of onset and retreat of the rainy season in mainland China and associations with atmospheric circulation and sea surface temperature, Journal of Hydrology, Volume 557, 2018, Pages 67-82, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.026.

Cazorla, A.; Bahadur, R.; Suski, K.J.; Cahill, J.F.; Chand, D.; Schmid, B.; Ramanathan, V.; Prather, K.A. Relating aerosol absorption due to soot, organic carbon, and dust to emission sources determined from in-situ chemical measurements mixing state of the particles. Atmos. Chem. Phys. 2013, 13, 9337–9350, https://doi.org/10.5194/acp-13-9337-2013

Chakraborty, S., Guan, B., Waliser, D. E., & Da Silva, A. M. (2022). Aerosol atmospheric rivers: Climatology, event characteristics, and detection algorithm sensitivities. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(12), 8175–8195. https://doi.org/10.5194/acp-22-8175-2022

Champagne, O., Aellig, R., Fink, A. H., Philippon, N., Camberlin, P., Moron, V., Knippertz, P., Seze, G., & Linden Der Van, R. (2023). Climatology of Low-Level Clouds over Western Equatorial Africa Based on Ground Observations and Satellites. *Journal of Climate*, *36*, 4289–4306. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0364.12

Chtirkova, B., Folini, D., Correa, L. F., & Wild, M. (2022). Internal Variability of All-Sky and Clear-Sky Surface Solar Radiation on Decadal Timescales. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127(12). https://doi.org/10.1029/2021JD036332

Couralet, C. 2010. Community dynamics, phenology and growth of tropical trees in the rain forest Reserve of Luki, Democratic Republic of Congo. PhD thesis. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Belgium. 173 pp.

Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., & Crook, R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. Energy and Environmental Science, 4(9), 3101–3109. https://doi.org/10.1039/c1ee01495a

Cui, M., Introduction to the K-Means Clustering Algorithm Based on the Elbow Method. Geoscience and Remote Sensing (2020) Vol. 3: 9-16. DOI: http://dx.doi.org/10.23977/geors.2020.030102.

De Vincenzi, M., Fasano, G., (2020). Monitoring coastal areas: a brief history of measuring instruments for solar radiation. Firenze University Press, 676-687, https://doi.org/10.36253%2F978-88-5518-147-1.67.

De Wasseige C., Tadoum M., Eba'a Atyi R. et Doumenge C. (2015). Les forêts du Bassin du Congo - Forêts et changements climatiques. Weyrich. Belgique. 128 p. Dépôt légal : D2015/8631/43. ISBN: 978-2-87489-356-8

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., Berg, L. Van De, Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., & Dee, D. P. (2011). The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. April, 553–

597. https://doi.org/10.1002/qj.828

Dezfuli, A. (2017). Climate of western and central equatorial Africa. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science, 66 pp. doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.511

Dezfuli, A. K., Ichoku, C. M., Huffman, G. J., Mohr, K. I., Selker, J. S., Giesen, N. van de, Rebecca, H., & Frank, O. . (2017). Validation of IMERG Precipitation in Africa. J. Hydrometeor, 18, 2817–2825. https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0139.1

Doelling, D. R., Loeb, N. G., Keyes, D. F., Nordeen, M. L., Morstad, D., Nguyen, C., Wielicki, B. A., Young, D. F., & Sun, M. (2013). Geostationary enhanced temporal interpolation for ceres flux products. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 30(6), 1072–1090. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00136.1

Doelling, D. R., Sun, M., Nguyen, L. T., Nordeen, M. L., Haney, C. O., Keyes, D. F., & Mlynczak, P. E. (2016). Advances in geostationary-derived longwave fluxes for the CERES synoptic (SYN1deg) product. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 33(3), 503–521. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0147.1

Dommo, A., Philippon, N., Vondou, D. A., Sèze, G., & Eastman, R. (2018). The June-September low cloud cover in Western Central Africa: Mean spatial distribution and diurnal evolution, and associated atmospheric dynamics. *Journal of Climate*, *31*(23), 9585–9603. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0082.1

Dommo, A., Vondou, D. A., Philippon, N., Eastman, R., Moron, V., & Aloysius, N. (2022). The ERA5's diurnal cycle of low-level clouds over Western Central Africa during June–September: Dynamic and thermodynamic processes. Atmospheric Research, 280(April), 106426. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106426

Dos Santos, V., Juca Oliveira, R. ., Datok, P., Sauvage, S., Paris, A., Gosset, M., & Sanchez-Perez, J. . (2022). Journal of Hydrology : Regional Studies Evaluating the performance of multiple satellite-based precipitation products in the Congo River Basin using the SWAT model. Journal of Hydrology: Regional Studies, 42(June). https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101168

Drame, M. S., Ceamanos, X., Roujean, J. L., Boone, A., Lafore, J. P., Carrer, D., & Geoffroy, O. (2015). On the importance of aerosol composition for estimating incoming solar radiation: Focus on the Western African stations of Dakar and Niamey during the dry season. Atmosphere, 6(11), 1608–1632. https://doi.org/10.3390/atmos6111608

Driemel, A., Augustine, J., Behrens, K., Colle, S., Cox, C., Cuevas-agulló, E., Denn, F. M., Duprat, T., Fukuda, M., & Grobe, H. (2018). Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992 – 2017). January, 1491–1501. https://doi.org/10.5194/essd-10-1491-2018

Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., Krasting, J. P., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Shevliakova, E., Stock, C. A., Zadeh, N., Balaji, V., Blanton, C., Dunne, K. A., Dupuis, C., Durachta, J., Dussin, R., … Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall Coupled Model Description and Simulation Characteristics. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(11), 1–56. https://doi.org/10.1029/2019MS002015

Dunning, C.M., Black, E. and Allan, R.P. (2016) The onset and ces- sation of seasonal rainfall over Africa. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 121, 11405–11424. https://doi.org/10. 1175/JCLI-D-18-0102.1.

Dybbroe, A., Karlsson, K. G., & Thoss, A. (2005). NWCSAF AVHRR cloud detection and analysis using dynamic thresholds and radiative transfer modeling. Part I: Algorithm description. Journal of Applied Meteorology, 44(1), 39–54. https://doi.org/10.1175/JAM-2188.1

Ehrendorfer, M. (1987). A regionalization of Austria's precipitation climate using principal component analysis. *Journal of Climatology*, *7*(1), 71–89. https://doi.org/10.1002/joc.3370070107

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geosci. Model Dev. 9, 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016.

FAO. FAOCLIM-2, 2001. World-wide Agroclimatic Database. Agrometeorology Group – SDRN – FAO Rome, Italy. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

FAO., (2016). Vivre et se nourrir de la forêt en Afrique centrale. Rome, Italy. 251 p. ISBN : 978-92-5-209489-0.

Farneti, R., Stiz, A. & Ssebandeke, J.B. Improvements and persistent biases in the southeast tropical Atlantic in CMIP models. npj Clim Atmos Sci 5, 42 (2022). https://doi.org/10.1038/s41612-022-00264-4

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Frappart, F.; Wigneron, J.-P.; Li, X.; Liu, X.; Al-Yaari, A.; Fan, L.; Wang, M.; Moisy, C.; Le Masson, E.; Aoulad Lafkih, Z.; et al. Global Monitoring of the Vegetation Dynamics from the Vegetation Optical Depth (VOD): A Review. *Remote Sens.* 2020, *12*, 2915. https://doi.org/10.3390/rs12182915

Fu, Q., & Liou, K. (1992). On the Correlated k-Distribution Method for Radiative Transfer in Nonhomogeneous Atmospheres. Journal of the Atmospheric Sciences, 2139–2156. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<2139:OTCDMF>2.0.CO;2

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, 1–21. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Gettelman, A.; Hannay, C.; Bacmeister, J.T.; Neale, R.B.; Pendergrass, A.G.; Danabasoglu, G.; Lamarque, J.; Fasullo, J.T.; Bailey, D.A.; Lawrence, D.M.; et al. High Climate Sensitivity in the Community Earth System Model Version 2 (CESM2). Geophys. Res. Lett. 2019, 46, 8329–8337. https://doi.org/10.1029/2019GL083978

Golaz, J.-C., P. M. Caldwell, L. P. Van Roekel, M. R. Petersen, Q. Tang, J. D. Wolfe and co-authors (2019). *The DOE E3SM coupled model version 1: Overview and evaluation at standard resolution*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11. https://doi.org/10.1029/2018MS001603

Golaz, J.-C., Van Roekel, L. P., Zheng, X., Roberts, A. F., Wolfe, J. D., Lin, W., et al. (2022). The DOE E3SM Model version 2: Overview of the physical model and initial model evaluation. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 14, e2022MS003156, https://doi.org/10.1029/2022MS003156.

Gond, Valéry & Betbeder, Julie & Fayolle, Adeline & Viennois, Gaëlle & Cornu, Guillaume & Réjou-Méchain, Maxime & Baghdadi, Nicolas & Bénédet, Fabrice & Doumenge, Charles & Gourlet-Fleury, Sylvie. (2016). Poster forest types in Central Africa.

Gupta, S. K., Ritchey, N. A., Wilber, A. C., Whitlock, C. H., Gibson, G. G., & Stackhouse, P. W. (1999). A climatology of surface radiation budget derived from satellite data. Journal of Climate, 12(8 PART 2), 2691–2710. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2691:ACOSRB>2.0.CO;2

Gutknecht, Elodie. Interactions côte-large dans le système de l'upwelling du Benguela par modélisation couplée physique/biogéochimique. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. HAL Id : tel-01025551, https://theses.hal.science/tel-01025551

Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Müller, R., & Beyer, H. G. (2003). Solar energy assessment using remote sensing technologies. Remote Sensing of Environment, 86(3), 423–432. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00083-X

He, J., Hong, L., Shao, C., & Tang, W. (2023). Global evaluation of simulated surface shortwave radiation in CMIP6 models. Atmospheric Research, 292(March), 106896. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106896

Henry, Archibald. (2022). How Climate Change Fuels Instability in Central Africa. United states institute of peace. https://www.usip.org/

Hersbach, H., & Dee, D. (2016). ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter 147, ECMWF. ECMWF Newsletter, Vol. 147(147), 7.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., … Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Sabater, J. M., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., & Dee, D. (2019). Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. ECMWF Newsletter, 159, 17–24. https://doi.org/10.21957/vf291hehd7

Hess, M., Koepke, P., & Schult, I. (1998). Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. Bulletin of the American Meteorological Society, 79(5), 831–844. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<2139:OTCDMF>2.0.CO;2

Hinrichsen, K. (1994). The Ångström formula with coefficients having a physical meaning. Solar Energy, 52(6), 491–495. https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90656-4

Hourdin, F., Rio, C., Grandpeix, J.-Y., Madeleine, J.-B., Cheruy, F., Rochetin, N., et al. (2020a). LMDZ6: Improved atmospheric component of the IPSL coupled model. Journal ofAdvances in Modeling Earth Systems, 12, e2019MS001892. https://doi.org/10.1029/2019MS001892

Hourdin, F., Rio, C., Jam, A., Traore, A.-K., & Musat, I. (2020b). Convective boundary layer control of the sea surface temperature in the tropics. Journal ofAdvances in Modeling Earth Systems, 12, e2019MS001988. https://doi.org/10.1029/2019MS001988

Hubau, W., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Affum-Baffoe, K., Beeckman, H., Cuní-Sanchez, A., Daniels, A. K., Ewango, C. E. N., Fauset, S., Mukinzi, J. M., Sheil, D., Sonké, B., Sullivan, M. J. P., Sunderland, T. C. H., Taedoumg, H., Thomas, S. C., White, L. J. T., Abernethy, K. A., Adu-Bredu, S., … Zemagho, L. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. Nature, 579(7797), 80–87. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0

Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., 2017. Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation

Huld, T., Moner-girona, M., & Kriston, A. (2017). *Geospatial Analysis of Photovoltaic Mini-Grid System Performance*. 1–21. https://doi.org/10.3390/en10020218

Jiang, H., Yang, Y., Bai, Y., & Wang, H. (2020). Evaluation of the Total, Direct, and Diffuse Solar Radiations from the ERA5 Reanalysis Data in China. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 17(1), 47–51. https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2916410

Julsrud, I. R., Storelvmo, T., Schulz, M., Moseid, K. O., & Wild, M. (2022). Disentangling Aerosol and Cloud Effects on Dimming and Brightening in Observations and CMIP6. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127(21), 1–22. https://doi.org/10.1029/2021JD035476

Karlsson, K. G., Anttila, K., Trentmann, J., Stengel, M., Fokke Meirink, J., Devasthale, A., Hanschmann, T., Kothe, S., Jaäskelaïnen, E., Sedlar, J., Benas, N., Van Zadelhoff, G. J., Schlundt, C., Stein, Di., Finkensieper, S., Häkansson, N., & Hollmann, R. (2017). CLARA-A2: The second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(9), 5809–5828. https://doi.org/10.5194/acp-17-5809-2017

Karlsson, Karl-Göran; Anttila, Kati; Trentmann, Jörg; Stengel, Martin; Solodovnik, Irina; Meirink, Jan Fokke; Devasthale, Abhay; Kothe, Steffen; Jääskeläinen, Emmihenna; Sedlar, Joseph; Benas, Nikos; van Zadelhoff, Gerd-Jan; Stein, Diana; Finkensieper, Stephan; Håkansson, Nina; Hollmann, Rainer; Kaiser, Johannes; Werscheck, Martin (2020): CLARA-A2.1: CM SAF cLoud, Albedo and surface RAdiation dataset from AVHRR data - Edition 2.1, Satellite Application Facility on Climate Monitoring. https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V002_01

Karlsson, Karl-Göran; Riihelä, Aku; Trentmann, Jörg; Stengel, Martin; Solodovnik, Irina; Meirink, Jan Fokke; Devasthale, Abhay; Jääskeläinen, Emmihenna; Kallio-Myers, Viivi; Eliasson, Salomon; Benas, Nikos; Johansson, Erik; Stein, Diana; Finkensieper, Stephan; Håkansson, Nina; Akkermans, Tom; Clerbaux, Nicolas; Selbach, Nathalie; Schröder, Marc; Hollmann, Rainer (2023): CLARA-A3: CM SAF cLoud, Albedo and surface RAdiation dataset from AVHRR data - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V003.

Kato, S., Rose, F. G., Rutan, D. A., Thorsen, T. J., Loeb, N. G., Doelling, D. R., Huang, X., Smith, W. L., Su, W., & Ham, S. H. (2018). Surface irradiances of edition 4.0 Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) data product. Journal of Climate, 31(11), 4501–4527. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0523.1

Kay, J. E., DeRepentigny, P., Holland, M. M., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Blanchard-Wrigglesworth, E., Deser, C., Jahn, A., Singh, H., Smith, M. M., Webster, M. A., Edwards, J., Lee, S. S., Rodgers, K. B., & Rosenbloom, N. (2022). Less Surface Sea Ice Melt in the CESM2 Improves Arctic Sea Ice Simulation With Minimal Non-Polar Climate Impacts. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *14*(4), 1–19. https://doi.org/10.1029/2021MS002679

Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B. E., Kambezidis, H., Mihalopoulos, N., Sanchez-Lorenzo, A., Meleti, C., Raptis, P. I., Pierros, F., & Nabat, P. (2018). Long-term series and trends in surface solar radiation in Athens, Greece. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(4), 2395–2411. https://doi.org/10.5194/acp-18-2395-2018

Kearsley, E., Verbeeck, H., Stoffelen, P., Janssens, S. B., Yakusu, E. K., Kosmala, M., De Mil, T., Bauters, M., Kitima, E. R., Ndiapo, J. M., Chuda, A. L., Richardson, A. D., Wingate, L., Ilondea, B. A., Beeckman, H., van den Bulcke, J., Boeckx, P., & Hufkens, K. (2024). Historical tree phenology data reveal the seasonal rhythms of the Congo Basin rainforest. In Plant-Environment Interactions (Vol. 5, Issue 2). https://doi.org/10.1002/pei3.10136

Kriebel, K. T., Gesell, G., Kästner, M., & Mannstein, H. (2003). The cloud analysis tool APOLLO: Improvements and validations. International Journal of Remote Sensing, 24(12), 2389–2408. https://doi.org/10.1080/01431160210163065

Kriebel, K. T., Saunders, R. W., & Gesell, G. (1989). Optical properties of clouds derived from fully cloudy AVHRR pixels. Beitr. Phys. Atmosph, 62(3), 165–171.

Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., & Morcrette, J. J. (2013). McClear: A new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. Atmospheric Measurement Techniques, 6(9), 2403–2418. https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013

Leung, J.CH., Zhang, B., Gan, Q. et al. Differential expansion speeds of Indo-Pacific warm pool and deep convection favoring pool under greenhouse warming. npj Clim Atmos Sci 5, 97 (2022). https://doi.org/10.1038/s41612-022-00315-w

Lewis, S. L., Lopez-gonzalez, G., Sonke, B., Djuikouo, K., Ojo, L. O., Phillips, O. L., Reitsma, J. M., White, L., Comiskey, J. A., Ewango, C. E. N., Feldpausch, T. R., Hamilton, A. C., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovett, J. C., Makana, J., Malhi, Y., … Ndangalasi, H. J. (2009). Increasing carbon storage in intact African tropical forests. 457(February). Nature. https://doi.org/10.1038/nature07771

Li, D., Folini, D., & Wild, M. (2023). Assessment of Top of Atmosphere, Atmospheric and Surface Energy Budgets in CMIP6 Models on Regional Scales. Earth and Space Science, 10(4), 1–26. https://doi.org/10.1029/2022EA002758

Liang, F., & Xia, X. A. (2005). Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000. Annales Geophysicae, 23(7), 2425–2432. https://doi.org/10.5194/angeo-23-2425-2005

Liang, S., Liang, S., Zhang, X., Wang, K., Zhang, X., & Wild, M. (2010). Review on Estimation of Land Surface Radiation and Energy Budgets From Ground Measurement, Remote Sensing and Model Simulations. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3(3), 225–240. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2048556

Liebmann, B. and Marengo, J. (2001) Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. Journal of Climate, 14, 4308–4318. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2.

Liebmann, B., Bladé, I., Bond, N.A., Gochis, D., Allured, D. and Bates, G.T. (2008) Characteristics of north American summer- time rainfall with emphasis on the monsoon. Journal of Climate, 21, 1277–1294. https://doi.org/10.1175/2007JCLI17 62.1

Liebmann, B., Bladé, I., Funk, C., Allured, D., Quan, X.-W., Hoerling, M., Peterson, P. and Thiaw, W.M. (2017) Climatology and interannual variability of boreal spring wet season precipi- tation in the eastern horn of Africa and implications for its recent decline. Journal of Climate, 30, 3867–3886. https://doi. org/10.1175/JCLI-D-16-0452.1

Loeb, N. G., D. R. Doelling, H. Wang, W. Su, C. Nguyen, J. G. Corbett, L. Liang, C. Mitrescu, F. G. Rose, and S. Kato, 2018: Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) Top-of-Atmosphere (TOA) Edition-4.0 Data Product. J. Climate, 31, 895-918, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0208.1

Long, C. N., & Shi, Y. (2008). An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements. The Open Atmospheric Science Journal, 2, 23–37.

Luković, J., Chiang, J. C. H., Blagojević, D., & Sekulić, A. (2021). A Later Onset of the Rainy Season in California Geophysical Research Letters. Geophysical Research Letters, 2020, 1–9. https://doi.org/10.1029/2020GL090350

Malhi, Y., Adu-Bredu, S., Asare, R. A., Lewis, S. L., & Mayaux, P. (2013). African rainforests: Past, present and future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *368*(1625). https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0312

Mallet, M., Nabat, P., Johnson, B., Michou, M., Haywood, J. M., Chen, C., & Dubovik, O. (2021). Climate models generally underrepresent the warming by Central Africa biomass-burning aerosols over the Southeast Atlantic. *Science Advances*, *7*. https://doi.org/DOI:10.1126/sciadv.abg9998

Marteau, R., Moron, V., & Philippon, N. (2009). Spatial coherence of monsoon onset over western and central Sahel (1950–2000). Journal of Climate, 22, 1313–1324. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2383.1

Mayer, B., & Kylling, A. (2005). Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - Description and examples of use. Atmospheric Chemistry and Physics, 5(7), 1855–1877. https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005

Medvigy, D., and C. Beaulieu, 2012: Trends in Daily Solar Radiation and Precipitation Coefficients of Variation since 1984. J. Climate, 25, 1330–1339, https://doi.org/10.1175/2011JCLI4115.1.

Mercado, L. M., Bellouin, N., Sitch, S., Boucher, O., Huntingford, C., Wild, M., & Cox, P. M. (2009). Impact of Changes in Diffuse Radiation on the Global Land Carbon Sink. *Nature*, *458*. 1014-1017. 10.1038/nature07949%0A

Miglietta, M. M., Huld, T., & Monforti-Ferrario, F. (2017). Local Complementarity of Wind and Solar Energy Resources over Europe: An Assessment Study from a Meteorological Perspective. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *56*(1), 217–234. https://doi.org/10.1175/jamc-d-16-0031.1

Miller, R. M., Mcfarquhar, G. M., Rauber, R. M., Brien, J. R. O., Gupta, S., Segal-rozenhaimer, M., Dobracki, A. N., Sedlacek, A. J., Burton, S. P., & Howell, S. G. (2021). Observations of supermicron-sized aerosols originating from biomass burning in southern Central Africa. Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 14815–14831. https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acp-21-14815-2021

Moron, V., Camberlin, P., Aellig, R., Champagne, O., Fink, A. H., Knippertz, P., & Philippon, N. (2023). Diurnal to interannual variability of low-level cloud cover over western equatorial Africa in May – October. *International Journal of Climatology*, 1–27. https://doi.org/10.1002/joc.8188

Muchow, R. C., Sinclair, T. R., & Bennett, J. M. (1990). Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations. Agronomy Journal, 82(2), 338–343. https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200020033x

Mueller, R., & Träger-chatterjee, C. (2014). Brief Accuracy Assessment of Aerosol Climatologies for the Retrieval of Solar Surface Radiation. Atmosphere. 959–972. https://doi.org/10.3390/atmos5040959

Mueller, R., Behrendt, T., Hammer, A., & Kemper, A. (2012). A New Algorithm for the Satellite-Based Retrieval of Solar Surface Irradiance in Spectral Bands. Remote sensing. 622–647. https://doi.org/10.3390/rs4030622

Mueller, R., Matsoukas, C., Gratzki, A., Behr, H. D., & Hollmann, R. (2009). The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance - A LUT based eigenvector hybrid approach Remote Sensing of Environment The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance. Remote Sensing of Environment, 113(5), 1012–1024. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.012

NCEI. 2015. Global Surface Summary of the Day. National Oceanic and Atmospheric Administration.

Nooni, I.K.; Ogou, F.K.; Chaibou, A.A.S.; Nakoty, F.M.; Gnitou, G.T.; Lu, J. Evaluating CMIP6 Historical Mean Precipitation over Africa and the Arabian Peninsula against Satellite-Based Observation. *Atmosphere* **2023**, *14*, 607. https://doi.org/10.3390/atmos14030607

Ocon, J. P., Ibanez, T., Franklin, J., Pau, S., Keppel, G., Rivas-torres, G., Shin, M. E., & Gillespie, W. (2021). Global tropical dry forest extent and cover: A comparative study of bioclimatic definitions using two climatic data sets. PLOS ONE. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252063

Olusegun, C., Ojo, O., Olusola, A., & Ogunjo, S. (2023). Solar radiation variability across Nigeria's climatic zones: a validation and projection study with CORDEX, CMIP5, and CMIP6 models. Modeling Earth Systems and Environment, August. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01848-6

Omotosho, J. B. (1990). Onset of thunderstorms and precipitation over northern nigeria. International Journal of Climatology, 10, 849–860. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.3370100807

Omotosho, J. B. (1992). Long-range prediction of the onset and end of the rainy season in the West African Sahel. International Journal of Climatology, 12, 369–382. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.3370120405

Onsum Moseid, K., Schulz, M., Storelvmo, T., Rian Julsrud, I., Olivié, D., Nabat, P., Wild, M., Cole, J. N. S., Takemura, T., Oshima, N., Bauer, S. E., & Gastineau, G. (2020). Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(24), 16023–16040. https://doi.org/10.5194/acp-20-16023-2020

Ouhechou, A., Philippon, N., Morel, B., Trentmann, J., Graillet, A., Mariscal, A., & Nouvellon, Y. (2023). Inter-comparison and validation against in-situ measurements of satellite estimates of incoming solar radiation for Central Africa: From the annual means to the diurnal cycles. *Atmospheric Research*, *287*, 106711. https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2023.106711

Patchali, T. E., Ajide, O. O., Matthew, O. J., Salau, T. A. O., & Oyewola, O. M. (2020). Examination of potential impacts of future climate change on solar radiation in Togo, West Africa. SN Applied Sciences, 2(12), 1–13. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03738-3

Peuch, V.-H., Rouil, L., Tarrason, L., and Elbern, H.: Towards European-scale Air Quality operational services for GMES Atmosphere, 9th EMS Annual Meeting, EMS2009-511, 9th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held 28 September–2 October 2009, Toulouse, France, EMS2009-511, 2009. https://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2009/EMS2009-511.pdf

Pfeifroth, U., Bojanowski, J. S., Clerbaux, N., & Manara, V. (2018). Satellite-based trends of solar radiation and cloud parameters in Europe. Advances in Science and Research, 15, 31–37. https://doi.org/doi.org/10.5194/asr-15-31-2018

Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2018). Trends and Variability of Surface Solar Radiation in Europe Based On Surface- and Satellite-Based Data Records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(3), 1735–1754. https://doi.org/10.1002/2017JD027418

Pfeifroth, Uwe; Kothe, Steffen; Drücke, Jaqueline; Trentmann, Jörg; Schröder, Marc; Selbach, Nathalie; Hollmann, Rainer (2023): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 3, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003.

Pfeifroth, Uwe; Kothe, Steffen; Müller, Richard; Trentmann, Jörg; Hollmann, Rainer; Fuchs, Petra; Werscheck, Martin (2017): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 2, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002.

Pfeifroth, Uwe; Kothe, Steffen; Trentmann, Jörg; Hollmann, Rainer; Fuchs, Petra; Kaiser, Johannes; Werscheck, Martin (2019): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 2.1, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01.

Philippon, N., Cornu, G., Monteil, L., Gond, V., Moron, V., Pergaud, J., Sèze, G., Bigot, S., Camberlin, P., Doumenge, C., Fayolle, A., & Ngomanda, A. (2019). The light-deficient climates of western Central African evergreen forests. *Environmental Research Letters*, *14*(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5d8

Philippon, N., Ouhechou, A., Camberlin, P., Trentmann, J., Fink, A. H., Maloba, J. D., Morel, B., & Samba, G. (2022). Characterization of Sunshine Duration in Western Equatorial Africa: In Situ Measurements versus SARAH-2 Satellite Estimates. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *61*(2), 185–201. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0072.1

Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J. A., Meyer, R., Gueymard, C., Súri, M., Martín, L., Mieslinger, T., Blanc, P., Grant, I., Boland, J., Ineichen, P., Remund, J., Escobar, R., Troccoli, A., Sengupta, M., Nielsen, K. P., Renne, D., Geuder, N., & Cebecauer, T. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. Solar Energy, 132, 25–37. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.001

Polo, Jesús, Martín, A. M., & Dominguez, J. (2019). Solar Resources Mapping. In Green Energy and Technology. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97484-2_8

Posselt, R., Mueller, R. W., Stöckli, R., & Trentmann, J. (2012). Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring - the CM-SAF retrieval in international comparison. Remote Sensing of Environment, 118, 186–198. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.016

Power, H. C. (2003). Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration. Theoretical and Applied Climatology, 76(1–2), 47–63. https://doi.org/10.1007/s00704-003-0005-8

Power, H. C., and D. M. Mills (2005), Solar radiation climate change over South Africa and an assessment of the radiative impact of volcanic eruptions, Int. J. Climatol., 25, 295–318, doi:10.1002/joc.1134.

Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., & Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. Meteorologische Zeitschrift, 26(1), 33–57. https://doi.org/10.1127/metz/2016/0781

Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Atmosphere: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, *294*(5549), 2119–2124. https://doi.org/10.1126/science.1064034

Richter I, Xie SP (2008) On the origin of equatorial Atlantic biases in coupled general circulation models. Clim Dyn 31:587–598. https://doi.org/10.1007/s00382-008-0364-z

Richter I, Xie SP, Behera SK, Masumoto Y (2014) Equatorial Atlantic variability and its relation to mean state biases in CMIP5. Clim Dyn 42(1):171–188. DOI 10.1007/s00382-012-1624-5

Ruellan, S., Cachier, H., Gaudichet, A., Masclet, P., & Lacaux, J. (1999). Airborne aerosols over central Africa during the Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants (EXPRESSO). Journal of Geophysical Research, 104, 30673–30690. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999JD900804.

Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(24), 9899–9904. https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108

Salah, Z., Shalaby, A., Steiner, A.L. et al. Study of aerosol direct and indirect effects and auto-conversion processes over the West African monsoon region using a regional climate model. Adv. Atmos. Sci. 35, 182–194 (2018). https://doi.org/10.1007/s00376-017-7077-3

Schulz, J., Albert, P., Behr, H. D., Caprion, D., Deneke, H., Dewitte, S., Dürr, B., Fuchs, P., Gratzki, A., Hechler, P., Hollmann, R., Johnston, S., Karlsson, K. G., Manninen, T., Müller, R., Reuter, M., Riihelä, A., Roebeling, R., Selbach, N., … Zelenka, A. (2009). Operational climate monitoring from space: The EUMETSAT satellite application facility on climate monitoring (CM-SAF). Atmospheric Chemistry and Physics, 9(5), 1687–1709. https://doi.org/10.5194/acp-9-1687-2009

Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchisteguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J. F., Moine, M. P., Msadek, R., … Madec, G. (2019). Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(12), 4182–4227. https://doi.org/10.1029/2019MS001791

Shepherd, T. G., Polichtchouk, I., Hogan, R. J., & Simmons, A. J. (2018). Report on Stratosphere Task Force. ECMWF Technical Memorandum No. 824, June, 32.

Sianturi, Y., Marjuki, & Sartika, K. (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. AIP Conference Proceedings, 2223(December 2020). https://doi.org/10.1063/5.0000854

Soni, V. K., Pandithurai, G., & Pai, D. S. (2012). Evaluation of long-term changes of solar radiation in India. International Journal of Climatology, 32(4), 540–551. https://doi.org/10.1002/joc.2294

Soula, S., Kasereka, J. K., Georgis, J. F., & Barthe, C. (2016). Lightning climatology in the Congo Basin. Atmospheric Research, 178–179, 304–319. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.006

Stanhill, G., & Cohen, S. (2001). *Global dimming : a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences*. *107*, 255–278.

Stöckli, R., Bojanowski, S., John, V. O., Duguay-tetzlaff, A., Schulz, J., Hollmann, R., &

Bourgeois, Q. (2019). Cloud Detection with Historical Geostationary Satellite Sensors for Climate Applications. Remote Sensing, 11(9), 1–21. https://doi.org/10.3390/rs11091052

Stöckli, Reto; Duguay–Tetzlaff, Anke; Bojanowski, Jedrzej; Hollmann, Rainer; Fuchs, Petra; Werscheck, Martin (2017): CM SAF ClOud Fractional Cover dataset from METeosat First and Second Generation - Edition 1 (COMET Ed. 1), Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CFC_METEOSAT/V001, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CFC_METEOSAT/V001.

Tadić, L., Bonacci, O., & Brleković, T. (2019). An example of principal component analysis application on climate change assessment. Theoretical and Applied Climatology, 138(1–2), 1049–1062. https://doi.org/10.1007/s00704-019-02887-9

Tai, A.P.K.; Mickley, L.J.; Jacob, D.J. Correlations between fine particulate matter (PM2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM2.5 to climate change. Atmos. Environ. 2010, Volume 44, Issue 32, pages 3976–3984. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060.

Tan, S., Chen, B., Wang, H., Che, H., Yu, H., & Shi, G. (2022). Variations in Aerosol Optical Properties over East Asian Dust Storm Source Regions and Their Climatic Factors during 2000–2021. Atmosphere, 13(6). https://doi.org/10.3390/atmos13060992

Tang, W. (2019). Dataset of high-resolution (3 hour, 10 km) global surface solar radiation (1983-2018). National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center 10.11888/Meteoro.tpdc.270112 18406.11.Meteoro.tpdc.270112

Tang, W., Yang, K., He, J., & Qin, J. (2010). Quality control and estimation of global solar radiation in China. Solar Energy, 84(3), 466–475. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.006

Tatebe, H.; Ogura, T.; Nitta, T.; Komuro, Y.; Ogochi, K.; Takemura, T.; Sudo, K.; Sekiguchi, M.; Abe, M.; Saito, F.; et al. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. Geosci. Model Dev. 2019, 12, 2727–2765. https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019

Tory, K. J., and R. A. Dare, 2015: Sea Surface Temperature Thresholds for Tropical Cyclone Formation. J. Climate, 28, 8171–8183, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00637.1.

Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, 4(1), 17–22. https://doi.org/10.1038/nclimate2067

Trolliet, M., Walawender, J. P., Bourlès, B., Boilley, A., Trentmann, J., Blanc, P., Lefèvre, M., & Wald, L. (2018). Downwelling surface solar irradiance in the tropical Atlantic Ocean: A comparison of re-analyses and satellite-derived data sets to PIRATA measurements. Ocean Science, 14(5), 1021–1056. https://doi.org/10.5194/os-14-1021-2018

Tsalefac M., HiolHiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D., Scholte P., PokamW.et al. (2015). Climat d'Afrique centrale : passé, présent et futur. Chapitre 2 In Les forêts du Bassin du

Congo - Forêts et changements climatiques. Eds. De Wasseige C., Tadoum M., Eba'a Atyi R. et Doumenge C. Weyrich. Belgique. 128 p.

Urraca, R., Gracia-Amillo, A. M., Huld, T., Martinez-de-Pison, F. J., Trentmann, J., Lindfors, A. V., Riihelä, A., & Sanz-Garcia, A. (2017). Quality control of global solar radiation data with satellite-based products. Solar Energy, 158(May), 49–62. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.032

Van De Giesen, N., Hut, R., & Selker, J. (2014). The Trans-African Observatory (TAHMO). WIREs Water, 1(341–348). https://doi.org/10.1002/wat2.1034

Verhegghen, A., Mayaux, P., Wasseige, C. De, & Defourny, P. (2012). Mapping Congo Basin vegetation types from 300 m and 1 km multi-sensor time series for carbon stocks and forest areas estimation. Biogeosciences. 5061–5079. https://doi.org/10.5194/bg-9-5061-2012

Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Guérémy, J. F., Michou, M., Moine, M. P., Nabat, P., Roehrig, R., Salas y Mélia, D., Séférian, R., Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., … Waldman, R. (2019). Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(7), 2177–2213. https://doi.org/10.1029/2019MS001683

Wang, K., Dickinson, R. E., Wild, M., & Liang, S. (2010). *Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002 : 1 . Model development*. *115*(1). https://doi.org/10.1029/2009JD013671

Wang, Y., Trentmann, J., Yuan, W., & Wild, M. (2018). Validation of CM SAF CLARA-A2 and SARAH-E surface solar radiation datasets over China. Remote Sensing, 10(12), 1–18. https://doi.org/10.3390/rs10121977

Wang, Z., Wang, C., Yang, S., Lei, Y., Che, H., Zhang, X., & Wang, Q. (2022). Evaluation of surface solar radiation trends over China since the 1960s in the CMIP6 models and potential impact of aerosol emissions. Atmospheric Research, 268, 105991. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105991

Washington, R., James, R., Pearce, H., Pokam, W. M., & Moufouma-Okia, W. (2013). Congo basin rainfall climatology: Can we believe the climate models? Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 368(1625). https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0296

Wei, H. H., Subramanian, A. C., Karnauskas, K. B., DeMott, C. A., Mazloff, M. R., & Balmaseda, M. A. (2021). Tropical Pacific Air-Sea Interaction Processes and Biases in CESM2 and Their Relation to El Niño Development. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *126*(6), 1–14. https://doi.org/10.1029/2020JC016967

Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Iii, R. B. L., Smith, G. L., & Cooper, J. E. (1996). Clouds and the Earth ' s Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment.

Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 114(12), 1–31. https://doi.org/10.1029/2008JD011470

Wild, M., Folini, D., Hakuba, M. Z., Schär, C., Seneviratne, S. I., Kato, S., Rutan, D., Ammann, C., Wood, E. F., & König-Langlo, G. (2015). The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Climate Dynamics*, *44*(11–12), 3393–3429. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2430-z

Wild, M., Folini, D., Scha, C., Loeb, N., Dutton, E. G., & Ko, G. (2012). *The global energy balance from a surface perspective*. 3107–3134. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1569-8

Wild, M., Ohmura, A., Gilgen, H., & Roeckner, E. (1995). Validation of General Circulation Model Radiative Fluxes Using Surface Observations. Journal of Climate, 8(5), 1309–1324. https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1309:VOGCMR>2.0.CO;2

Wild, M., Ohmura, A., Schär, C., Müller, G., Folini, D., & Schwarz, M. (2017). *The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017 : a database for worldwide measured surface energy fluxes*. 601–613.

WMO. (2020). State of the Climate in Africa 2019. WMO-No. 1253, 37 p. https://library.wmo.int/idurl/4/57196

WMO. (1996). Climatological Normals (CLINO) for the period 1961–1990. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.

Wu, H., Xu, X., Luo, T., Yang, Y., Xiong, Z., & Wang, Y. (2023). Variation and comparison of cloud cover in MODIS and four reanalysis datasets of ERA-interim, ERA5, MERRA-2 and NCEP. Atmospheric Research, 281(June 2022), 106477. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106477

Xia, F., Zuo, J., Sun, C., & Liu, A. (2023). *The Atlantic Meridional Mode and Associated Wind – SST Relationship in the CMIP6 Models. Atmosphere* **2023**, *14*, 359. https://doi.org/10.3390/atmos14020359

Xu Z, Chang P, Richter I et al (2014) Diagnosing southeast tropical Atlantic SST and ocean circulation biases in the CMIP5 ensemble. Clim Dyn 43:3123–3145. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2247-9

Yang, D., & Bright, J. M. (2020). Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years. Solar Energy, 210(April), 3–19. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.016

Yang, D., Yagli, G. M., & Quan, H. (2018). Quality Control for Solar Irradiance Data. International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2018, 208–213. https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2018.8467892

Yang, X., Wu, J., Chen, X., Ciais, P., Maignan, F., Yuan, W., Piao, S., Yang, S., Gong, F., Su, Y., Dai, Y., Liu, L., Zhang, H., Bonal, D., Liu, H., Chen, G., Lu, H., Wu, S., Fan, L., …

Wright, S. J. (2021). A comprehensive framework for seasonal controls of leaf abscission and productivity in evergreen broadleaved tropical and subtropical forests. The Innovation, 2(4), 100154. https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100154

Yao, B., Teng, S., Lai, R., Xu, X., Yin, Y., Shi, C., & Liu, C. (2020). Can atmospheric reanalyses (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics? Atmospheric Research, 244, 105091. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105091

Yellott, J. I., (1979). The historical development and present status of solar radiation measuring instruments. Sun II, vol. 3, pp. 2169–2173.

You, Q., Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Folini, D., Fraedrich, K., Ren, G., & Kang, S. (2013). Decadal variation of surface solar radiation in the Tibetan Plateau from observations, reanalysis and model simulations. Climate Dynamics, 40(7–8), 2073–2086. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1383-3

Yu, Y., Shi, J., Wang, T., Letu, H., Yuan, P., Zhou, W., & Hu, L. (2019). Evaluation of the Himawari-8 Shortwave Downward Radiation (SWDR) Product and its Comparison With the CERES-SYN, MERRA-2, and ERA-Interim Datasets. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(2), 519–532. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2851965

Zhang, X., Liang, S., Wild, M., & Jiang, B. (2015). Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. Remote Sensing of Environment, 165, 186–202. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.015

Zhang, X., Lu, N., Jiang, H., & Yao, L. (2020). Evaluation of Reanalysis Surface Incident Solar Radiation Data in China. Scientific Reports, 10(1), 1–20. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60460-1

Zhao, L., Lee, X., & Liu, S. (2013). Correcting surface solar radiation of two data assimilation systems against FLUXNET observations in North America. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 118(17), 9552–9564. https://doi.org/10.1002/jgrd.50697

Zhou, X., Ray, P., Boykin, K., Barrett, B. S., & Hsu, P. C. (2019). Evaluation of surface radiative fluxes over the tropical oceans in AMIP simulations. *Atmosphere*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/atmos10100606

Annexe A

Cette annexe fournit des informations générales sur l'enregistreur de durée d'ensoleillement Campbell Stockes, suivies d'une description des observatoires qui fournissent des données de stations météorologiques, et d'une définition du filtre Stavisky Golay mentionné dans le chapitre.

1. L'enregistreur Campbell-Stokes

L'enregistreur Campbell-Stokes ou bien l'Héliographe Campbell-Stokes, nommé d'après ses inventeurs John Francis Campbell et George Gabriel Stokes, est un instrument météorologique utilisé pour quantifier la durée de l'irradiation solaire directe reçue en un lieu géographique spécifique au cours d'une période donnée (figure A.1). Composé d'une sphère de verre enfermée dans un cadre en bois, cet instrument concentre la lumière du soleil sur un support d'enregistrement spécialisé. En traversant le ciel, la lumière du soleil laisse une trace sur le support d'enregistrement, dont la longueur correspond à la durée de l'ensoleillement pendant la période d'observation.

Figure A. 1 - Photo de l'enregistreur Campbell-Stokes, Source : Bureau of Meteorology Campbell-Stokes recorder (Darwin Airport Met Office, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Campbell-Stokes_recorder.jpg?uselang=fr).

2. Collecte de données météorologiques en Afrique Centrale : Contributions des observatoires et laboratoires

- TAHMO : le Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (Van De Giesen et al., 2014) vise à développer un vaste réseau cohérent de stations météorologiques (https://tahmo.org/technical-information/) à travers l'Afrique subsaharienne. Actuellement, il n'y a que 7 stations implantées en Afrique centrale occidentale, qui sont principalement situées au Cameroun. Nous avons retenu les 3 stations fournissant les plus longues périodes d'enregistrement (voir tableau I.1) situées au Cameroun et à l'ouest de la RDC, à savoir Edea, Mbandaka, et Mfou (cf. Figure I.2). Les données sont fournies à une résolution de 15 ou 30 minutes. Elles sont téléchargeables gratuitement via le portail de données TAHMO.

- M-TROPICS : Les observatoires français des zones critiques (Multiscale TROPIcal CatchmentS, https://mtropics.obs-mip.fr/fr/experimental-tropical-watersheds-2-2/) surveillent plusieurs bassins versants en Inde, en Asie du Sud-Est et au Cameroun. Le site de Nsimi dans le haut bassin du Nyong au sud du Cameroun (cf. Figure I.2) est équipé d'une station météorologique automatisée depuis 2004 (Audry. 2012). Le rayonnement solaire a été mesuré du 7 avril 2004 au 13 mars 2008. Les données de rayonnement solaire incident de surface instantané (en kW/m^2) ou cumulé (kJ/m^2) sont fournies gratuitement au pas de temps journalier sur le portail de données M-TROPICS.

- SOERE F-ORE-T : le Système d'Observation et d'Expérimentation à Long Terme pour la Recherche Environnementale sur le Fonctionnement des Ecosystèmes Forestiers (http://www.gip-ecofor.org/f-ore-t/reseau.php) est un réseau français mis en place en 2002 pour l'analyse des cycles du carbone, de l'eau et des éléments minéraux dans les forêts. Le site de Pointe Noire en République du Congo est l'un des 15 sites du réseau. Des mesures du rayonnement solaire incident ont été effectuées du 26 mars 2004 au 15 juin 2006 à Kissoko sur une tour à flux et du 2 juillet 2006 au 31 décembre 2009 à Tchizalamou sur une station météorologique. Les deux sites (voir Figure I.2) sont distants de 67 km. Les données sont disponibles à une résolution de 30 minutes sur demande.

- SEEG-Lékédi : le parc de la Lékédi, au sud-est du Gabon, appartient au réseau français des Sites d'Etude en Ecologie Globale. Il possède une station météorologique automatisée Davis Vantage Pro, initialement mise en place en 2013, qui a été améliorée le 26 juillet 2018 en Vantage Pro2 qui comprend un capteur de rayonnement solaire. Les données sont acquises à une résolution de 15 minutes.

- ANPN-Lopé : l'Agence Nationale des Parcs Nationaux au Gabon (https://scienceparcsgabon.weebly.com/), chargée de la gestion, de la conservation et de la protection de la faune et des habitats du Parc National, possède 5 stations de terrain permanentes dans lesquelles des recherches sur les écosystèmes terrestres sont menées. Au sein du Parc national de la Lopé, plusieurs paramètres météorologiques sont mesurés automatiquement depuis 2012, notamment le rayonnement solaire incident à surface (Bush et al., 2020). Les données fournies au pas de temps journalier peuvent être téléchargées gratuitement à partir du DataSTORRE de l'Université de Stirling (http://hdl.handle.net/11667/133).

- CIRAD-IGE : le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) et l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) collaborent depuis 2016 pour le suivi du climat des forêts au nord de la République du Congo. Deux stations météorologiques automatisées ont été installées en mars 2016 à Pokola et Mokabi (cf. Figure I.2) sur les parcelles des sociétés forestières CIB et Rougier. Elles enregistrent un ensemble de 7 paramètres météorologiques, rayonnement solaire incident de surface inclus, à une résolution de 15 minutes.

3. Le filtre Savitzky-Golay

Le filtre de Savitzky-Golay est une technique de traitement du signal utilisée pour le lissage des données. Il porte le nom de ses inventeurs, Abraham Savitzky et Marcel J.E. Golay, qui ont publié la méthode en 1964. Ce filtre est couramment utilisé pour réduire le bruit et les

fluctuations indésirables d'un signal en éliminant les variations à court terme tout en préservant les caractéristiques à long terme du signal. Contrairement à d'autres filtres, le filtre de Savitzky-Golay est capable de préserver des caractéristiques importantes du signal, telles que les pics et les creux, tout en réduisant le bruit.

La méthode consiste à ajuster localement un polynôme aux données adjacentes à chaque point du signal. Le degré du polynôme et la taille de la fenêtre d'ajustement sont des paramètres ajustables qui influencent la nature du lissage. En général, on utilise un polynôme de faible degré (généralement linéaire ou quadratique), et la taille de la fenêtre doit être choisie judicieusement pour éviter une perte d'informations.

Dans notre cas, nous avons utilisé ce filtre pour lisser les séries temporelles des données horaires de rayonnement solaire, en choisissant un polynôme d'ordre 1 et une taille de fenêtre égale à 3. Le filtre de Savitsky Golay est disponible en python avec la fonction "savgol_filter" de la bibliothèque scipy. Un exemple d'application du filtre est présenté en figure A.2

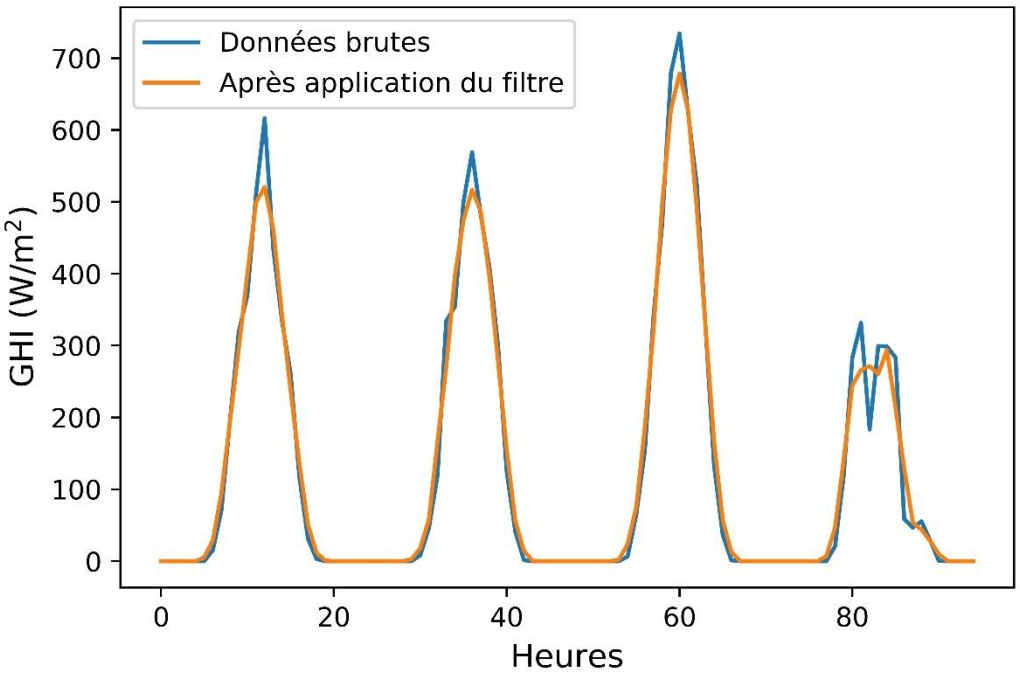

Figure A. 2 - Séries temporelles de 4 jours des données horaires provenant de la station Edéa au sud du Cameron (cf. Figure I.2), avant et après application du filtre Savitzky -Golay.

Annexe B

Cette annexe vient compléter les résultats du chapitre II qui porte sur la validation et la comparaison des estimations satellitaires du rayonnement solaire en Afrique Centrale. Elle présente en particulier les résultats et matériels supplémentaires de l'article ouhechou et al., 2023

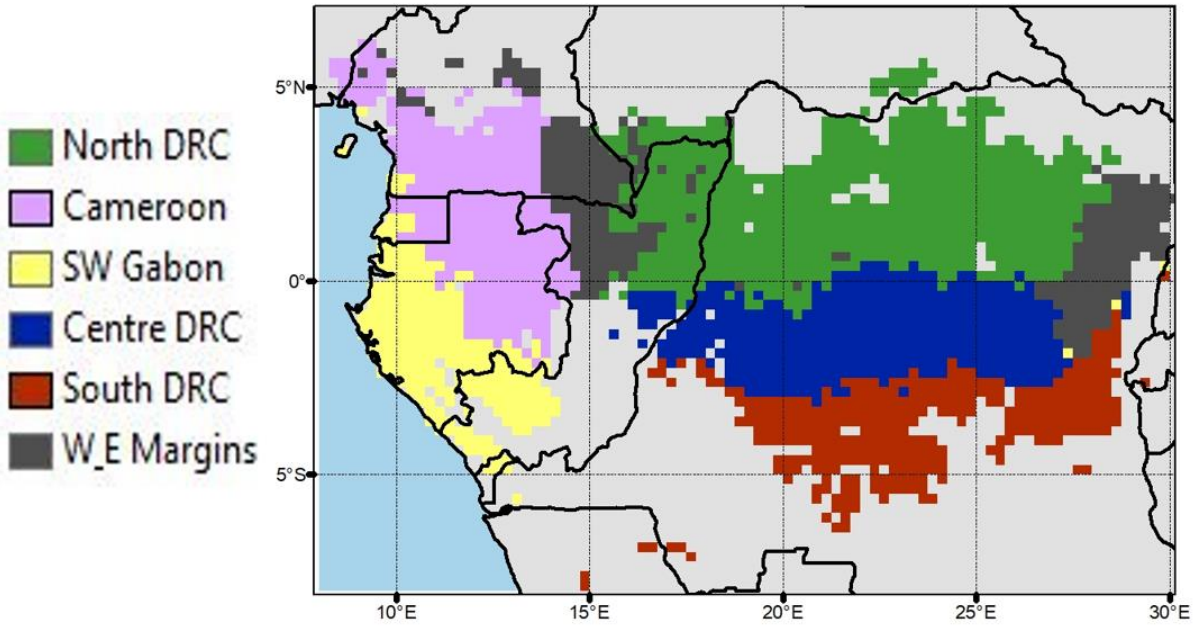

Figure B. 1 - Localisation des 6 régions éco-climatiques déterminées par Philippon et al. (2019).

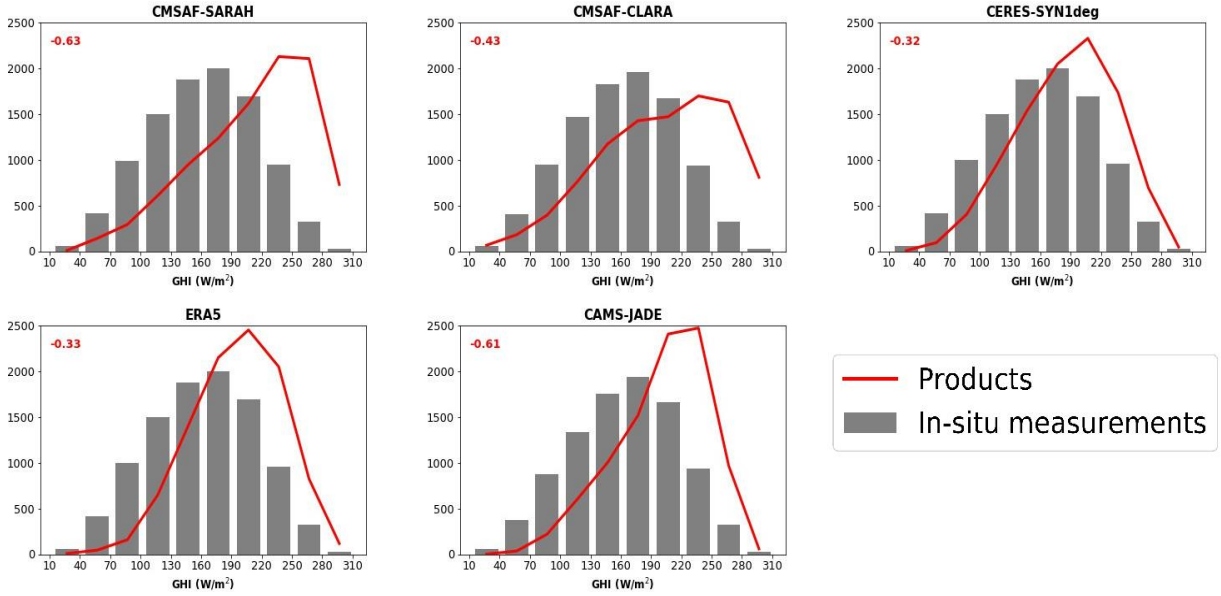

Figure B. 2 - Distributions de fréquences des valeurs journalières du rayonnement solaire pour chaque station (barres grises) et le pixel correspondant dans les 5 produits retenus.

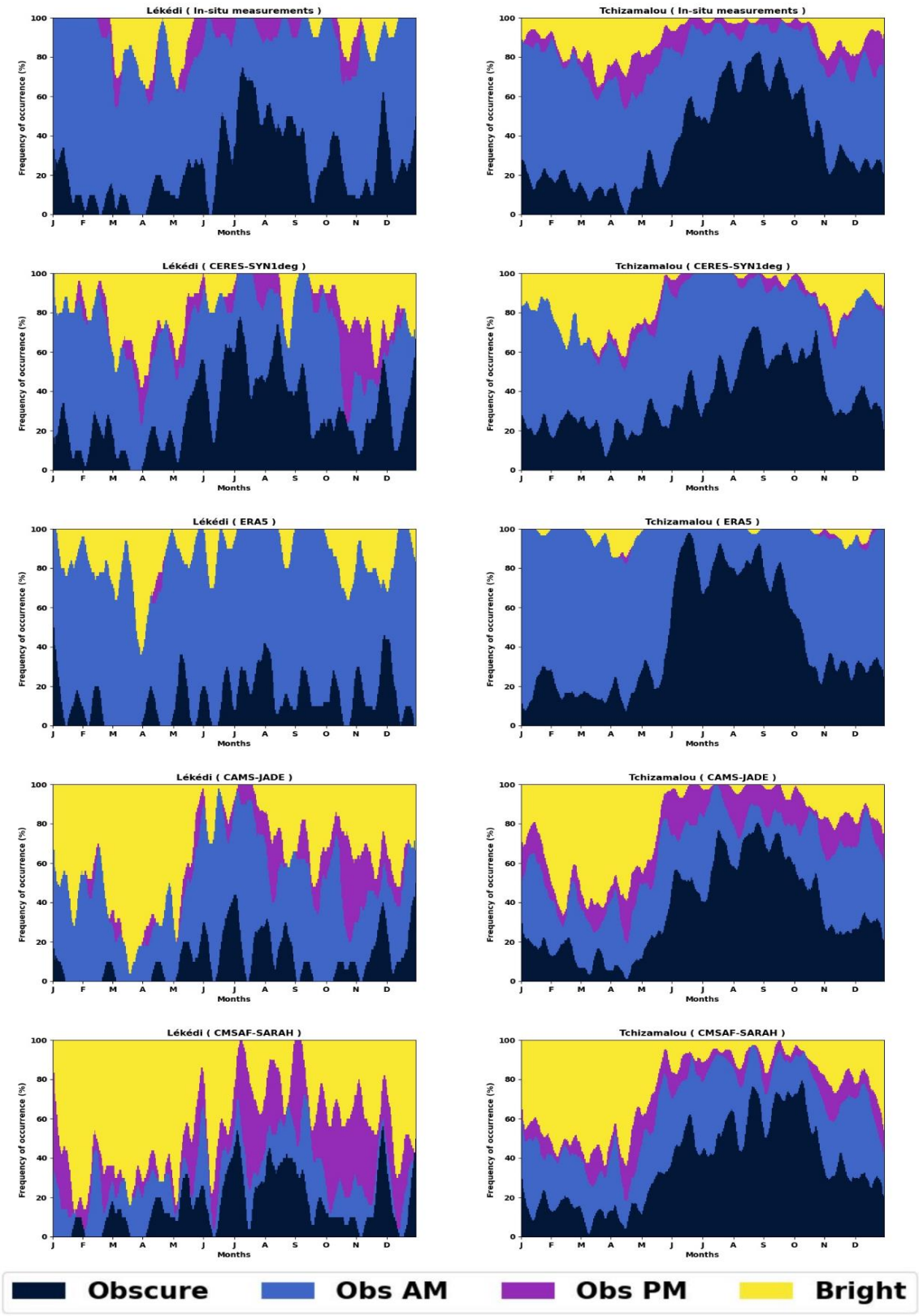

Figure B. 3 - Identique à la figure II.11 mais pour Lékédi (Gabon) et Tchizamalou (Sud de la République du Congo).

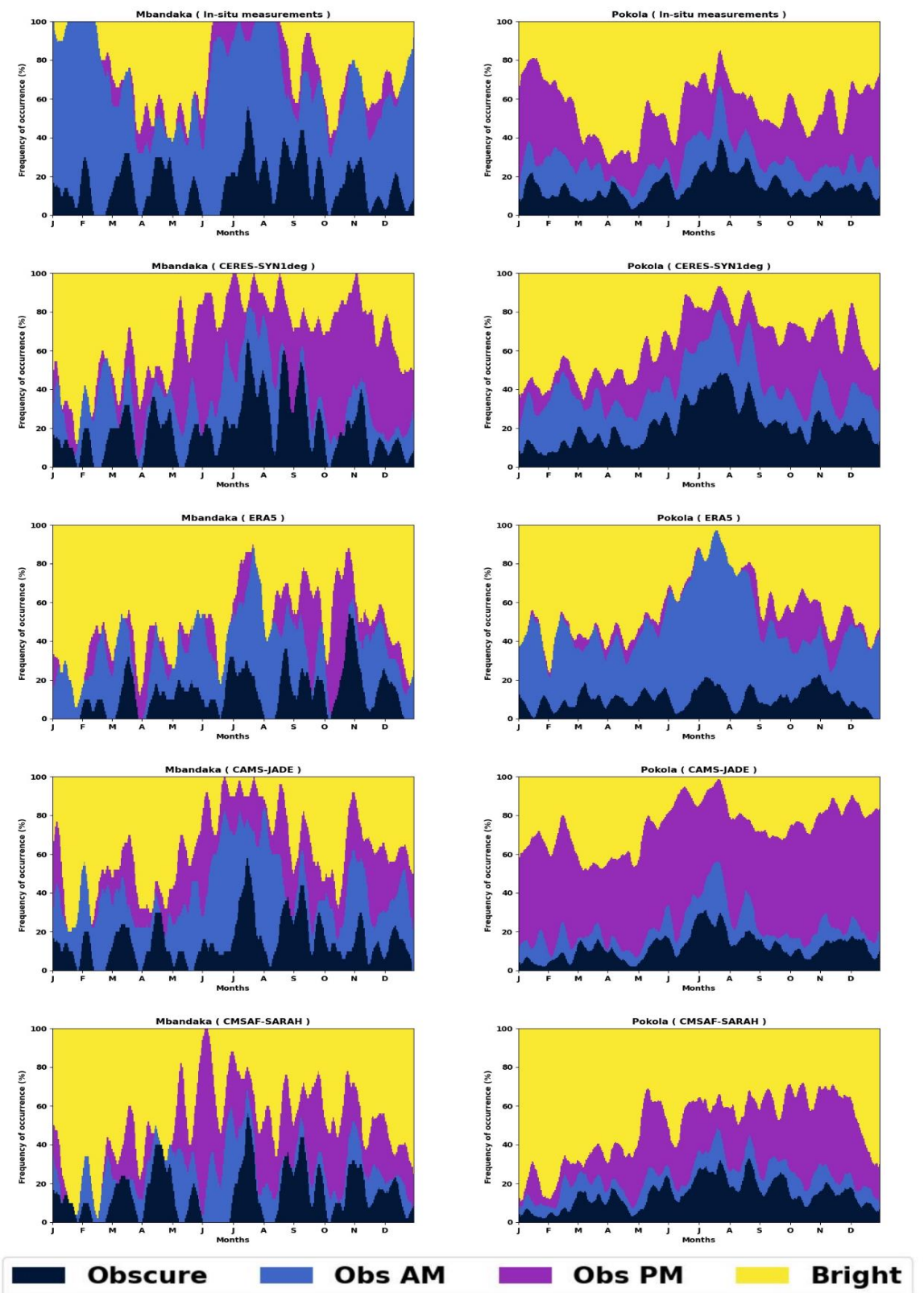

Figure B. 4 - Identique à la figure II.11 mais pour Pokola (Nord de la République du Congo) et Mbandaka (République démocratique du Congo). Entique à la figure II.11 mais pour Lékédi (Gabon) et Tchizamalou (Sud de la République du Congo).

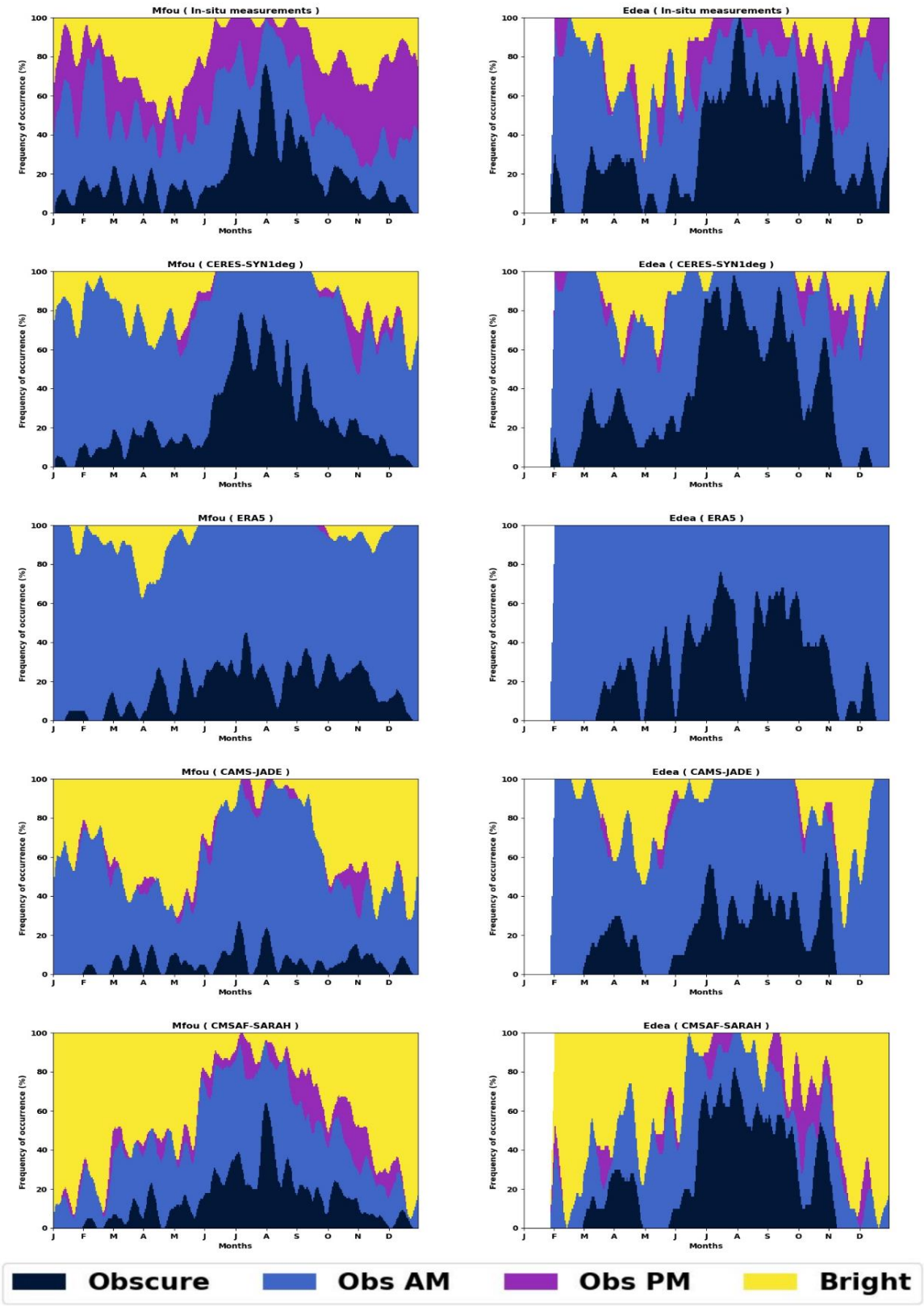

Figure B. 5 - Identique à la figure II.11 mais pour Mfou et Edea (Cameroun).

Tableau B. 1 - Scores de performance du rayonnement solaire horaire dans les 8 stations météorologiques qui fournissent le rayonnement solaire à l'échelle horaire, coefficient de corrélation (R), biais moyen et erreur quadratique moyenne corrigée du biais (bias-corrected RMSE). Toutes les corrélations sont significatives au niveau de 0,05.

	CAMS-JADE	CERES-SYN1deg	CMSAF-SARAH	ERA5
R				
Edea	0.95	0.94	0.96	0.88
Kissoko	0.92	0.92	0.96	0.89
Lekedi	0.91	0.91	0.87	0.90
Mbandaka	0.92	0.90	0.89	0.88
Mfou	0.97	0.96	0.97	0.91
Mokabi	0.94	0.97	0.86	0.92
Pokola	0.94	0.97	0.85	0.92
Tchizamalou	0.90	0.92	0.93	0.87
Bias (W/m^2)				
Edea	48.1	25.3	53.1	25.1
Kissoko	33.3	29.4	47.4	31.4
Lekedi	52.7	29.1	58.3	45.2
Mbandaka	21.8	21.7	41.5	39.1
Mfou	57.9	29.5	59.9	32.5
Mokabi	31.9	20.9	45.0	37.8
Pokola	26.4	16.7	42.1	34.9
Tchizamalou	28.5	23.4	38.2	19.5
bias-corrected RMSE (W/m^2)				
Edea	89.6	77.4	90.8	111.7
Kissoko	98.9	93.2	85.8	109.4
Lekedi	123.5	105.3	149.4	117.0
Mbandaka	108.5	118.4	135.8	135.6
Mfou	93.6	70.7	91.7	109.8
Mokabi	97.8	71.8	156.4	117.6
Pokola	97.9	67.0	163.3	115.5
Tchizamalou	109.5	95.4	94.5	112.7

Tableau B. 2 - Coefficients de corrélation entre la fréquence journalière d'occurrence des 4 types de jours présentés dans la figure III.11 à Mokabi et Kissoko.

Mokabi				
	CERES-SYN1deg	CMSAF-SARAH	ERA5	CAMS-JADE
Obscure	0.93	0.95	0.75	0.93
Obs AM	0.76	0.31	0.34	0.66
Obs PM	0.62	0.71	0.55	0.78
Bright	0.86	0.76	0.86	0.91
Kissoko				
Obscure	0.50	0.47	0.56	0.53
Obs AM	-0.05	-0.34	-0.25	-0.06
Obs PM	-0.06	-0.15	-0.14	0.03
Bright	0.41	0.38	0.48	0.44

Annexe C

Cette annexe fournit des résultats supplémentaires du chapitre III.

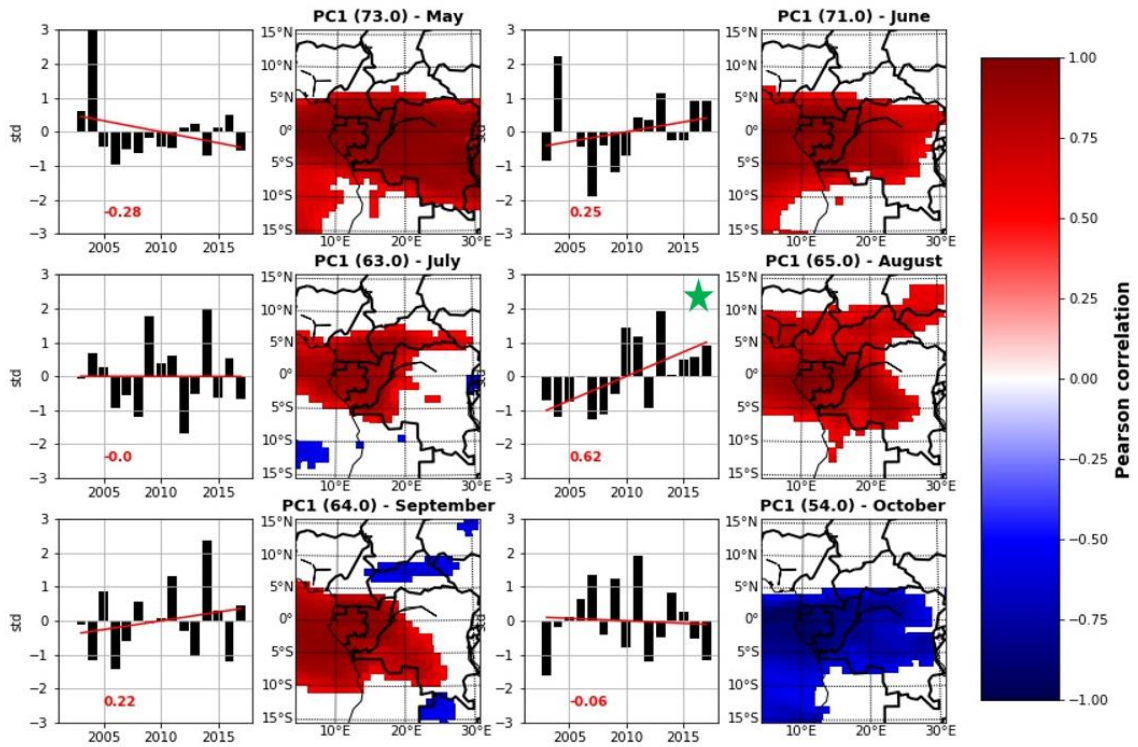

Figure C. 1 - Cartes de corrélation entre le 1er mode de variabilité de l'ACP et les AOD 550nm CAMS sur les mois MJJASO (2e et 4e colonnes ; le pourcentage de variance expliquée par le 1er mode de l'ACP est donné au-dessus de chaque carte) et pour chacune des cartes, série temporelle de variance du 1er mode de l'ACP correspondante (1ere et 3e colonnes). Les valeurs en rouge représentent les corrélations entre les 1ers modes de l'ACP et les années, et les lignes rouges présentent les tendances. Les étoiles vertes indiquent que la tendance est significative au niveau de confiance 95% par le test Mann-Kendall.

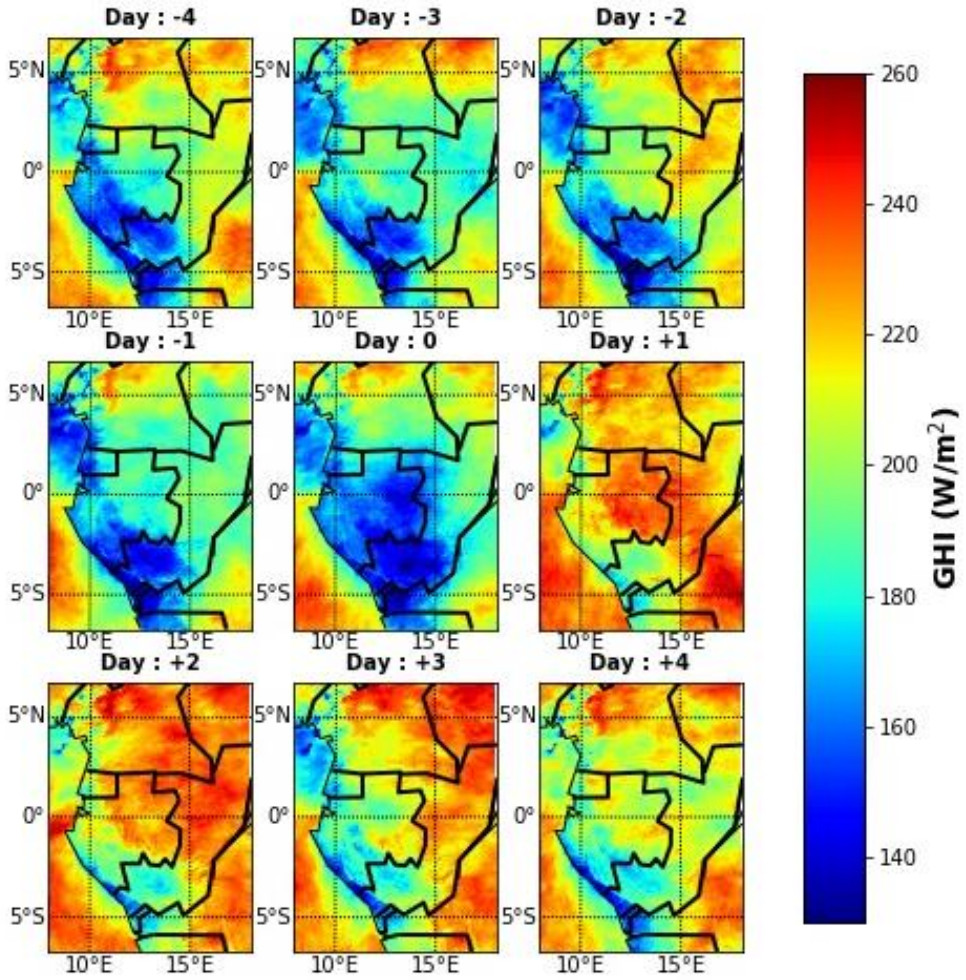

Figure C. 2 - Moyennes journalières du rayonnement solaire SARAH-2 de 4 jours avant à 4 jours après la fin de la saison sèche. Les moyennes sont calculées sur l'ensemble de la période 1983-2020.

L'augmentation des niveaux de rayonnement solaire devient évidente dès le premier jour qui suit la fin de la saison sèche. Cette augmentation est remarquable sur l'ensemble de la région, se manifestant clairement lorsqu'on compare les moyennes des "Day 0" et " Day +1". Tout comme les résultats obtenus lors de l'analyse des dates de début (Figure III.12), une nette disparité entre les quatre jours précédant et suivant la fin de la saison sèche se distingue de manière significative. Ces observations témoignent de l'efficacité de la méthode employée.

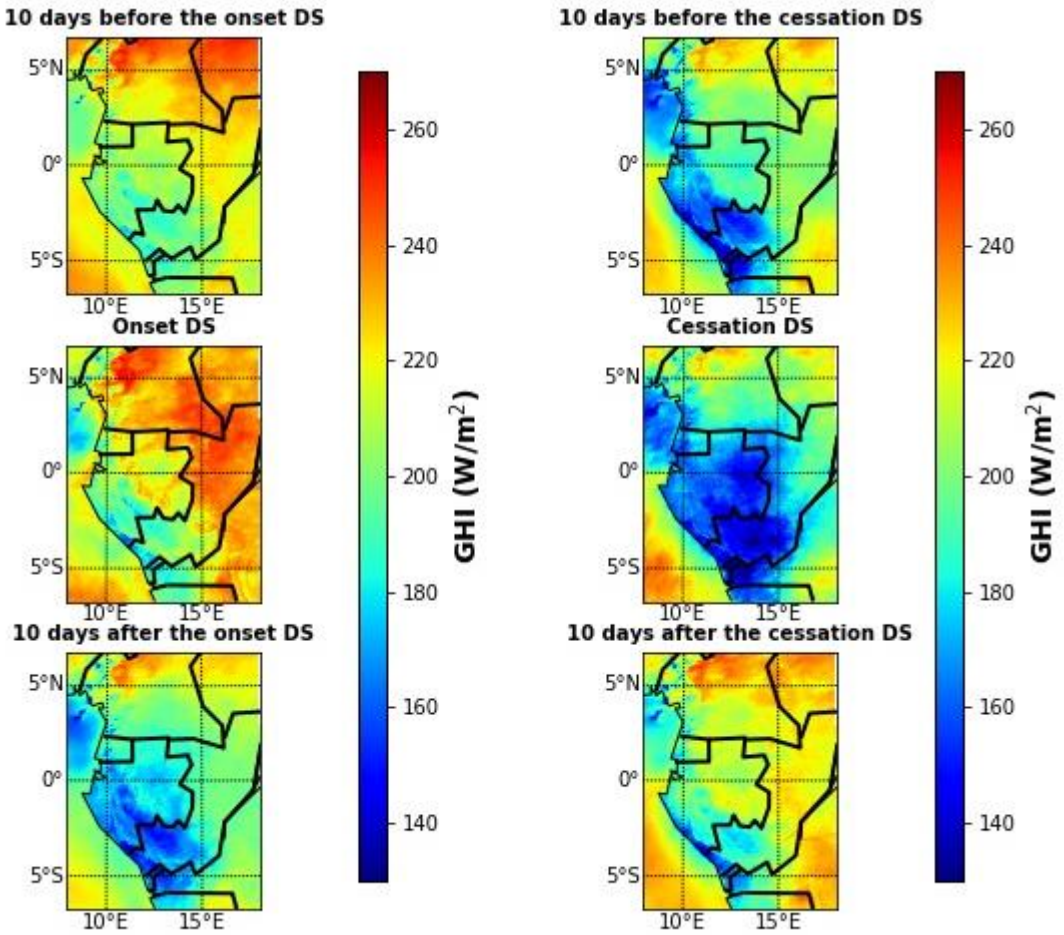

Figure C. 3 - Moyenne journalière du rayonnement solaire SARAH-2 de 10 jours avant et 10 jours après le début de la saison sèche (panneaux à gauche), la fin de la saison sèche (panneaux à droite). La moyenne est calculée sur l'ensemble de la période 1983-2020.

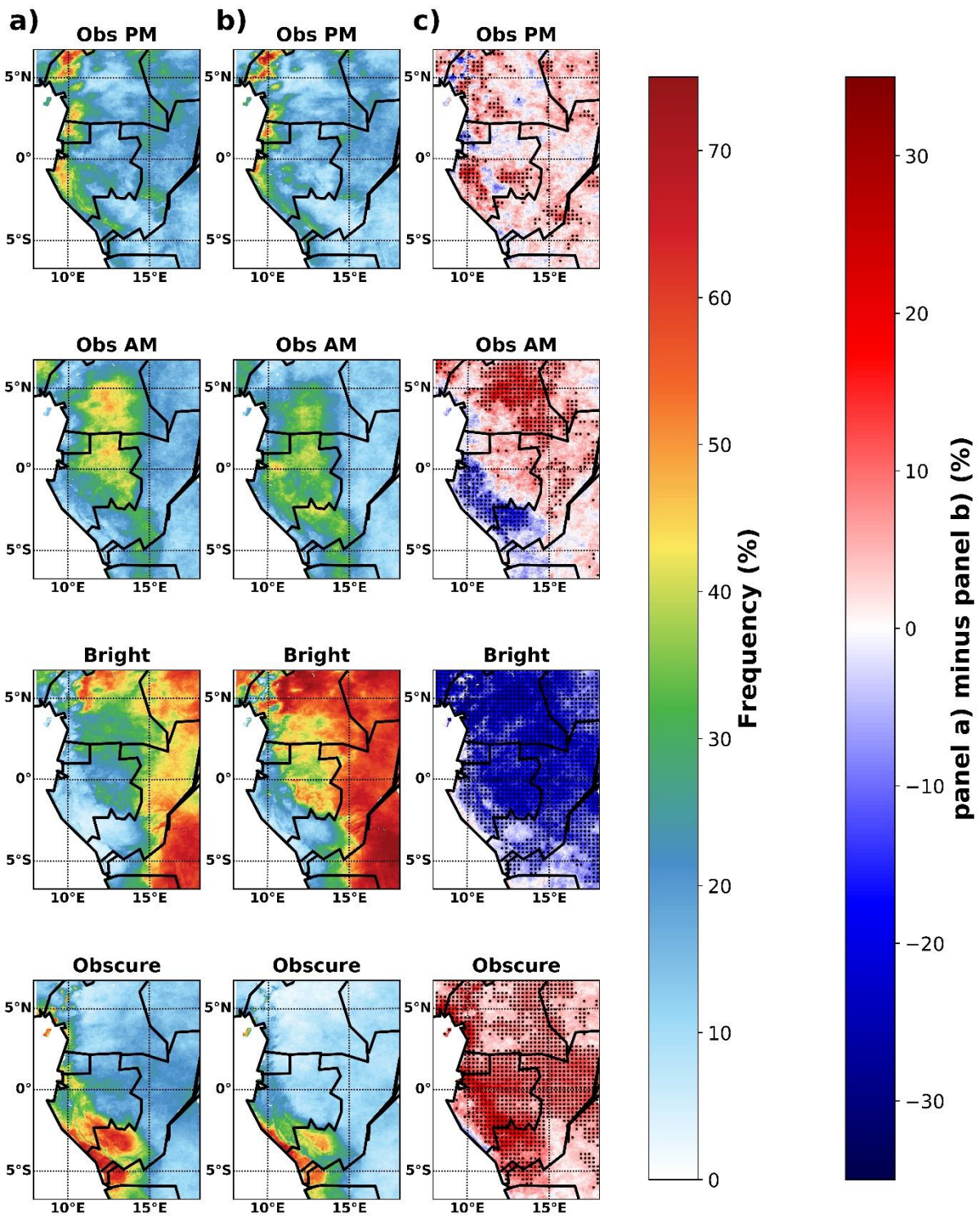

Figure C. 4 - Fréquences moyennes d'apparition des 4 types de cycle diurne de rayonnement solaire sur a) 10 jours avant et b) 10 jours après la fin de la saison sèche, en moyenne sur la période 1983-2020, c) différence entre les panneaux a et b. Noter que la date de fin de la saison sèche est dérivée pour chaque année à partir des données de rayonnement solaire SARAH-2. Les points noirs indiquent les pixels présentant des différences significatives à un niveau de confiance de 95 % selon le test t de student.

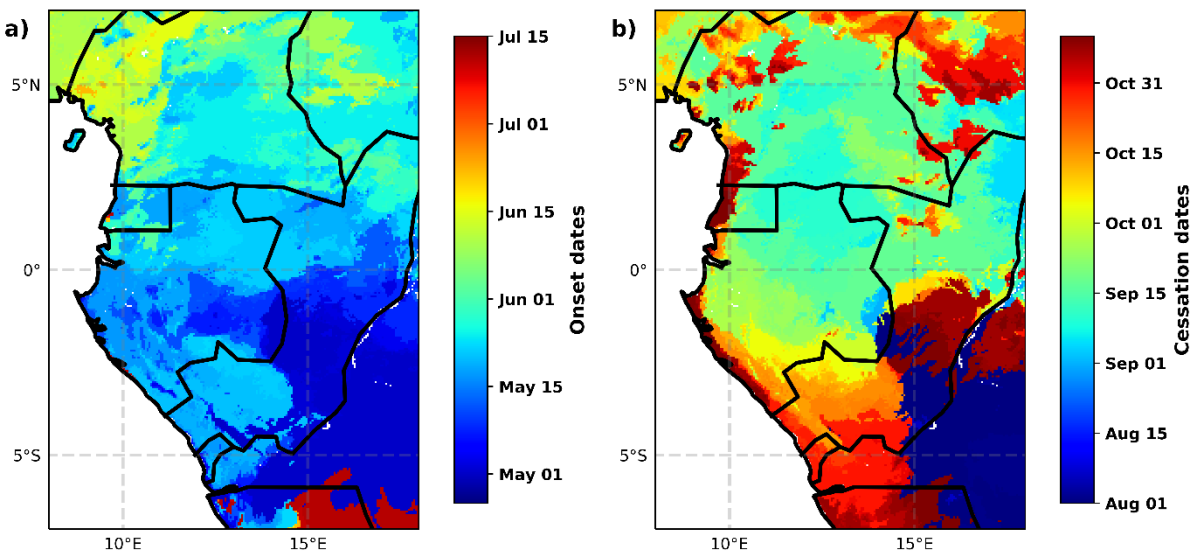

Figure C. 5 - La distribution spatiale des a) dates de début et b) de fin de la saison sèche en Afrique Centrale occidentale, calculées sur la période 1983-2020.

Nous avons calculé des dates de début et de fin de la saison sèche en appliquant la méthode des anomalies cumulées « AA » à chaque pixel de la région. En examinant les résultats concernant les dates de début, illustrés dans la figure C.5a, nous pouvons observer une certaine variabilité. Les débuts de la saison sèche varient généralement entre mi-mai et fin mai, sur une grande partie du Gabon et du sud-ouest du Congo. En direction de l'ouest du Cameroun, le long du Golfe de Guinée, les dates de début se situent autour de mi-juin. Dans le sud-est de la région, vers la République démocratique du Congo (RDC) et une partie du centre du Congo, la saison sèche débute plus tôt, vers le début mai. Cependant, dans les marges sud de la région, entre l'Angola et la RDC, des dates de début plus tardives ont été observées, ce qui est dû au fait que les pixels de ces zones n'ont pas le même cycle saisonnier de rayonnement solaire que les pixels au cœur de la région Gabon-Congo. Par conséquent, les cumuls journaliers des anomalies de rayonnement solaire pour ces pixels ne présentent pas la même forme que celle illustrée dans la figure III.11. Cette variabilité spatiale des dates de début de la saison sèche révèle l'influence de facteurs géographiques et climatiques spécifiques sur la région, qui interagissent pour déterminer les dates de transition vers la saison sèche.

Pour les dates de fin de la saison (figure C.5b), une inhomogénéité de la distribution spatiale des dates est plus marquée par rapport aux dates de début. Au Gabon, on constate que les dates de fin de saison deviennent progressivement plus tardives quand on se rapproche de l'océan. Dans la partie nord-est du pays, ces dates varient généralement autour de mi-septembre, tandis que dans la région sud-ouest, le long de la façade atlantique, cette période s'étend du début à la fin du mois d'octobre. Cependant, une complexité émerge dans le sud-est de la région (le centre du Congo et la RDC). Dans cette zone, la distribution des dates de fin de saison apparaît particulièrement inhomogène et difficile à interpréter.

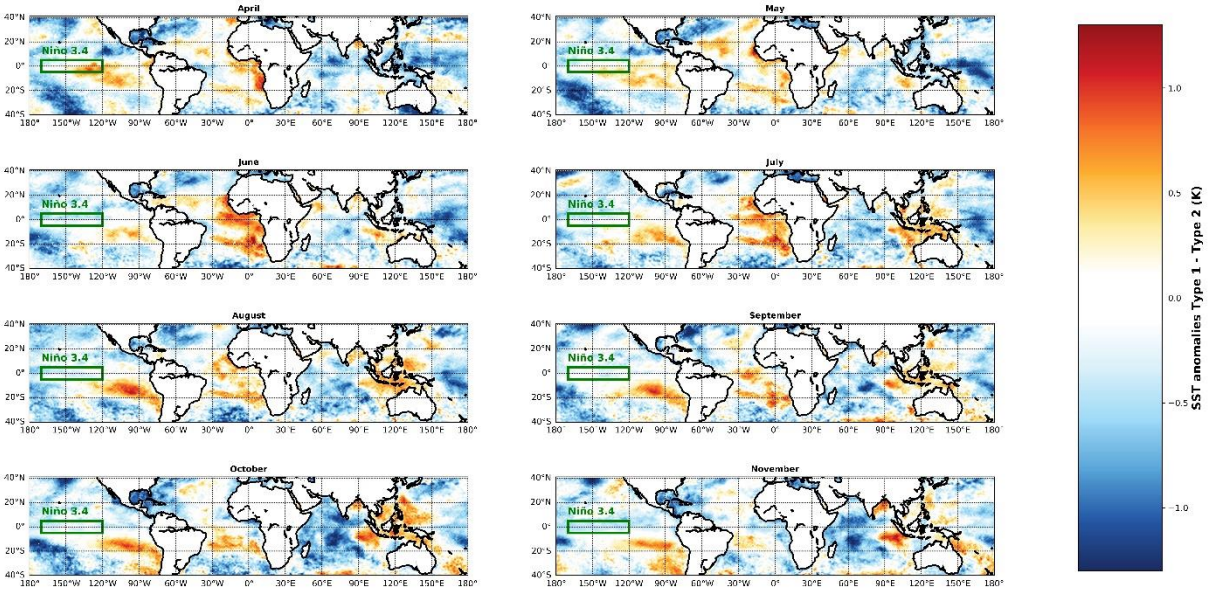

Figure C. 6 - Différence entre les anomalies mensuelles de température de surface de la mer pour les années de type 1 et celles pour les années de type 2 (le cadre vert indique la région du Niño 3.4). Toutes les différences supérieures à 0.58°C et inférieures à -0.58°C sont significatives à 95% selon le test Wilcoxon-Mann-Whitney.

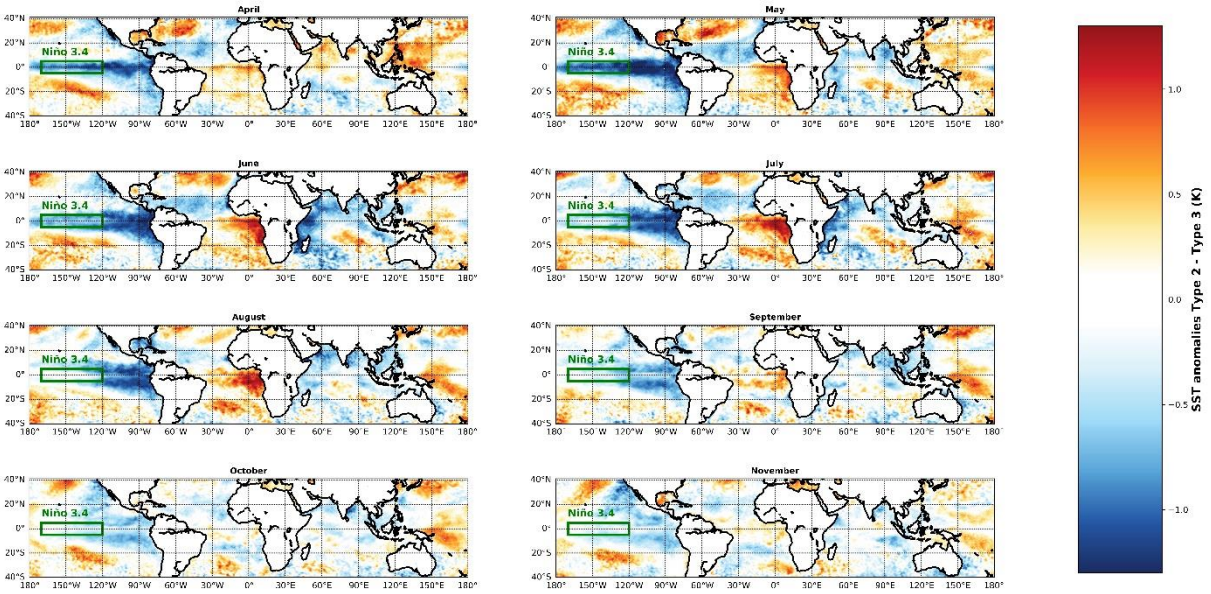

Figure C. 7 - Identique à la figure C.6 mais pour la différence entre les années de type 2 et celles de type 3.

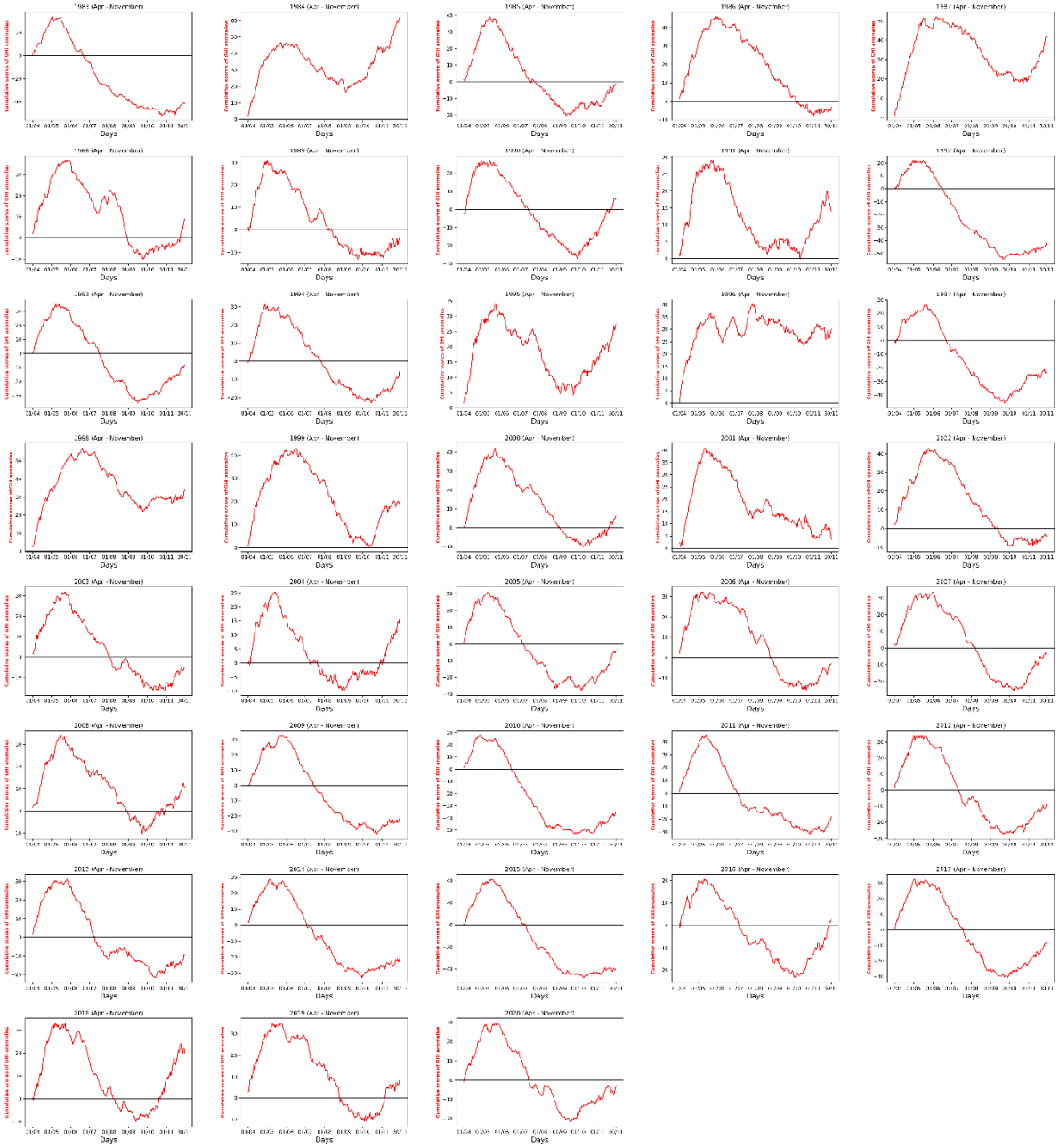

Figure C. 8 - Score cumulé des anomalies journalières du rayonnement solaire à partir de SARAH-2 (les années de 1983 à 2020).

Annexe D

Cette annexe fournit des détails supplémentaires concernant le chapitre IV. Elle comprend principalement un aperçu de la méthodologie abandonnée pour diviser la région Gabon-Congo en deux sous-régions, ainsi que d'autres résultats qui n'ont pas été présentés dans le chapitre.

1. Informations complémentaires sur l'approche de division de la région Gabon-Congo en deux sous-régions

Comme mentionné dans la section IV.2, nous avons cherché à classer les pixels de la région Gabon-Congo en deux sous-régions distinctes sur la base de la relation entre la direction du vent et la direction de la pente. Cette approche a été conçue en raison des caractéristiques topographiques de la région, en particulier le Mont Chaillu au Gabon (voir Figure 0.1), qui semble diviser la région en deux parties. En outre, la distribution spatiale moyenne du rayonnement solaire dans la région présentaient des niveaux de rayonnement solaire qui semblaient correspondre aux caractéristiques topographiques de la région (la partie sud du Mont Chaillu sur la façade atlantique présente les niveaux les plus faibles de rayonnement solaire par rapport à la partie au nord).

Pour réaliser cette classification, nous avons utilisé des données des composantes zonales et méridiennes du vent issues des réanalyses ERA5, ainsi que les données d'altitude à haute résolution de GTOPO30 (https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30). Les données d'altitude ont été initialement rééchantillonnées pour correspondre à la résolution d'ERA5. Nous avons ensuite appliqué un filtre passe-bas à ces données afin d'éliminer les variations mineures d'altitude qui n'étaient pas importantes pour le calcul de la pente. La direction et la vitesse du vent à 10 mètres de la surface ont été calculées à partir des composantes zonales et méridiennes. La figure D.1 présente les champs moyens mensuels de la vitesse et de la direction du vent à 10m dans la région.

Ensuite, nous avons déterminé la direction de la pente en degrés sur la base des données d'altitude filtrées (figure D.2). Puis, nous avons calculé la différence entre la direction du vent (en degrés) et la direction de la pente. Ce processus a été réalisé indépendamment pour chaque mois. Pour identifier les pixels où la direction de la pente et la direction du vent étaient opposées (c'est à dire une différence de 180°), nous avons sélectionné tous les pixels dans l'intervalle de (180°-45° à 180°+45°). Par la suite et pour appliquer ce résultat de classification aux modèles CMIP6, nous avons rééchantillonné les matrices de différence obtenues pour qu'elles correspondent à la résolution spatiale des modèles. Cependant, ce rééchantillonnage a conduit à un nombre très réduit de pixels par sous-région en raison de la résolution grossière des modèles CMIP6. Par conséquent, nous avons décidé d'adopter l'approche alternative utilisée dans le chapitre IV, qui consiste à diviser la région Gabon-Congo en sous-régions nord-est et sud-ouest.

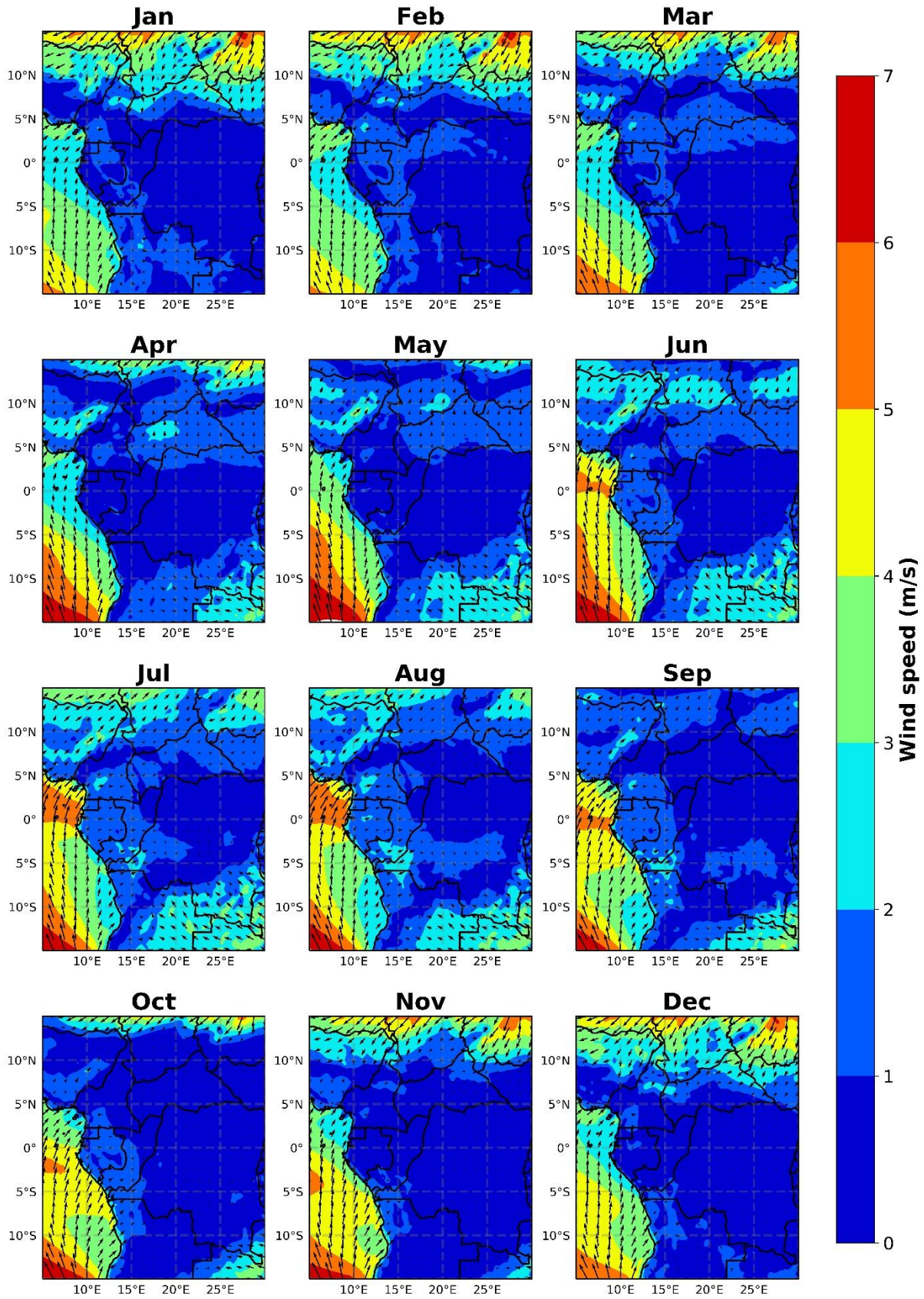

Figure D. 1 - Champs mensuels moyens de la vitesse moyenne du vent à 10 mètres de la surface (en mètres par secondes), avec la direction du vent superposée en flèches noires.

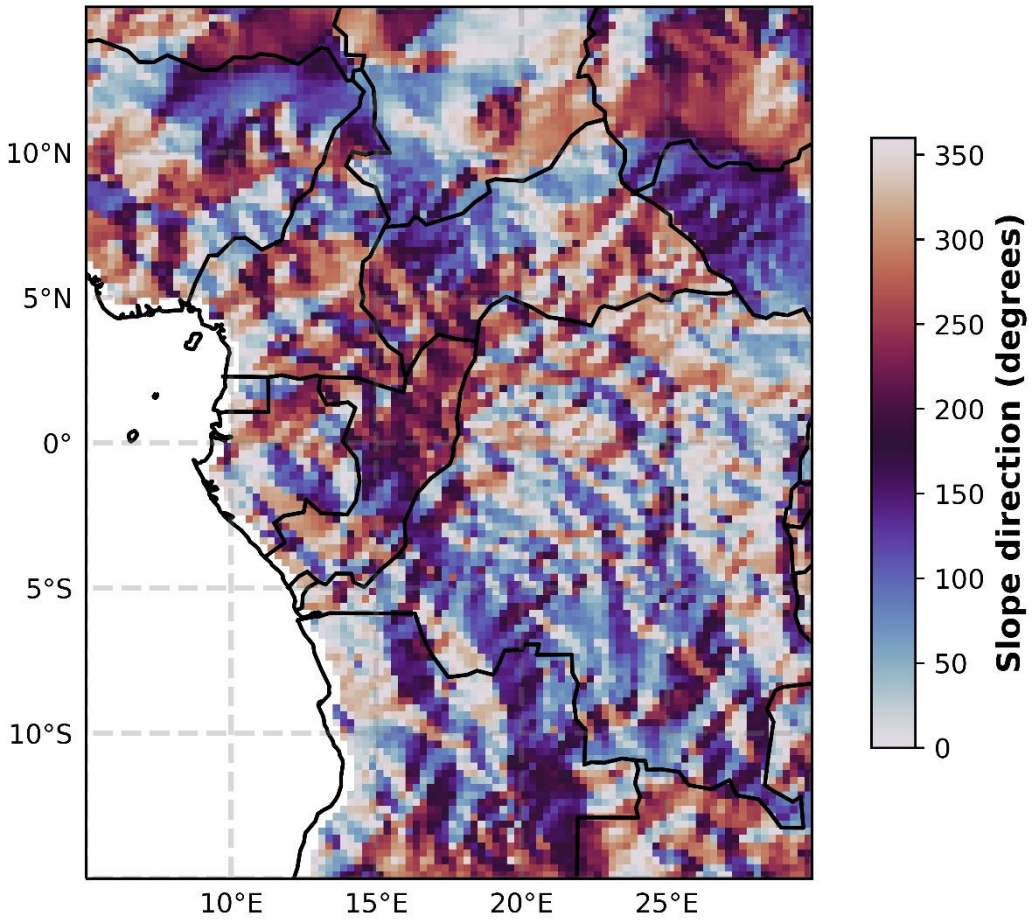

Figure D. 2 - La direction de la pente en degrés.

2. Autres résultats supplémentaires

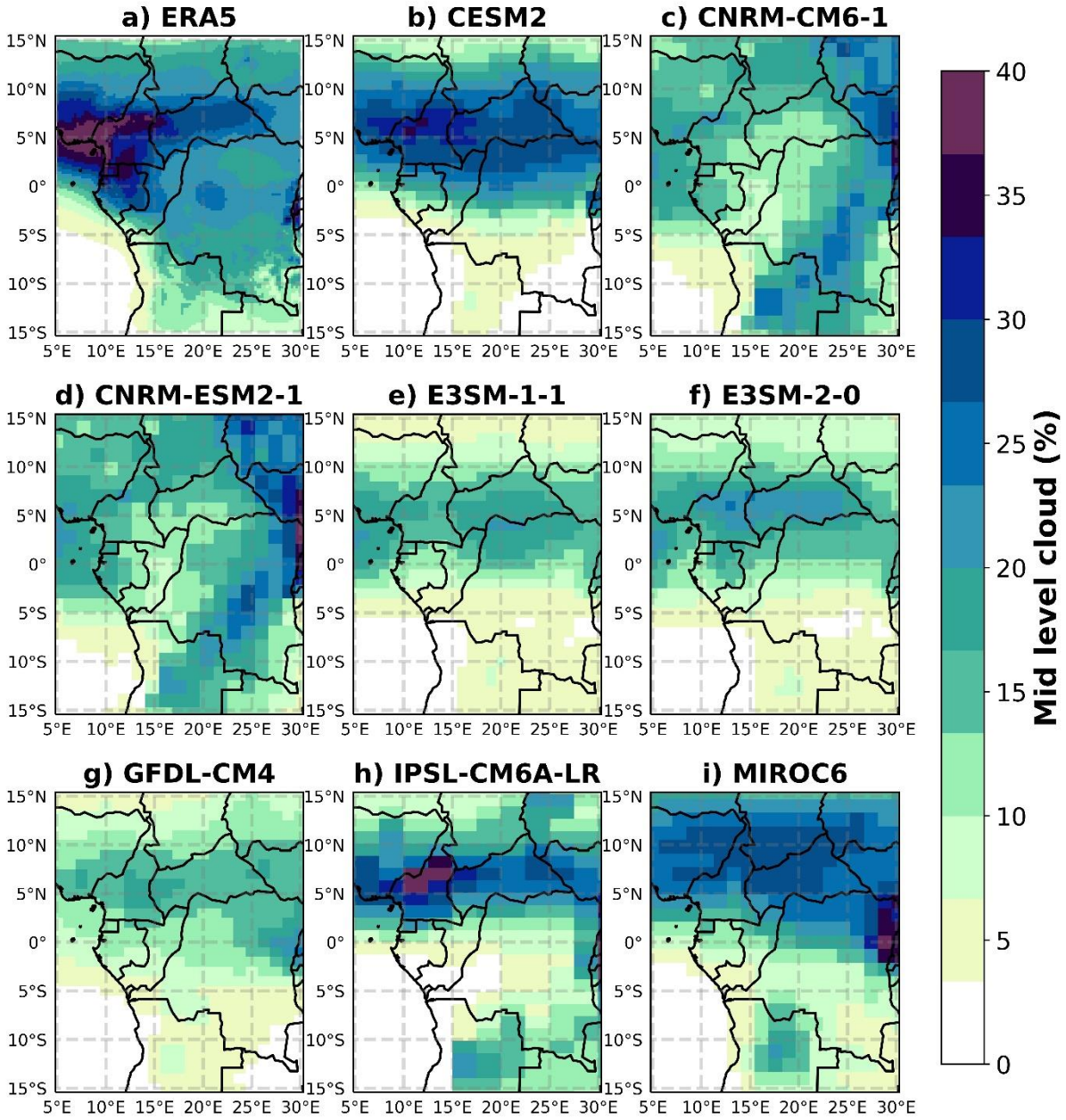

Figure D. 3 - Moyenne de la fraction nuageuse à moyenne altitude JJAS (en %) pour ERA5 (a) et les huit modèles CMIP6 (b-i). Les moyennes sont calculées sur la période 1983-2014.

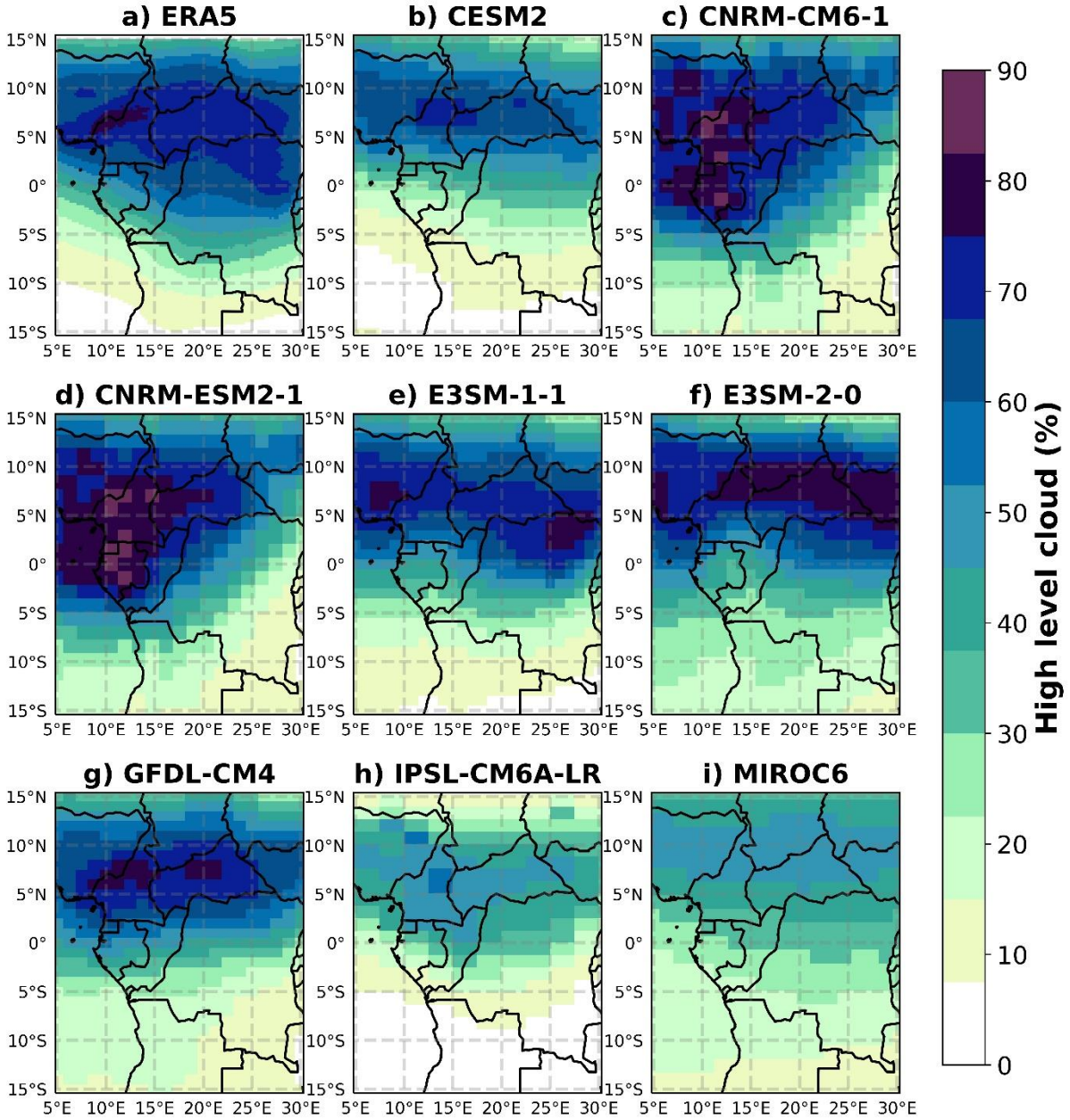

Figure D. 4 - Identique à la figure D.3 mais pour les nuages à haute altitude.

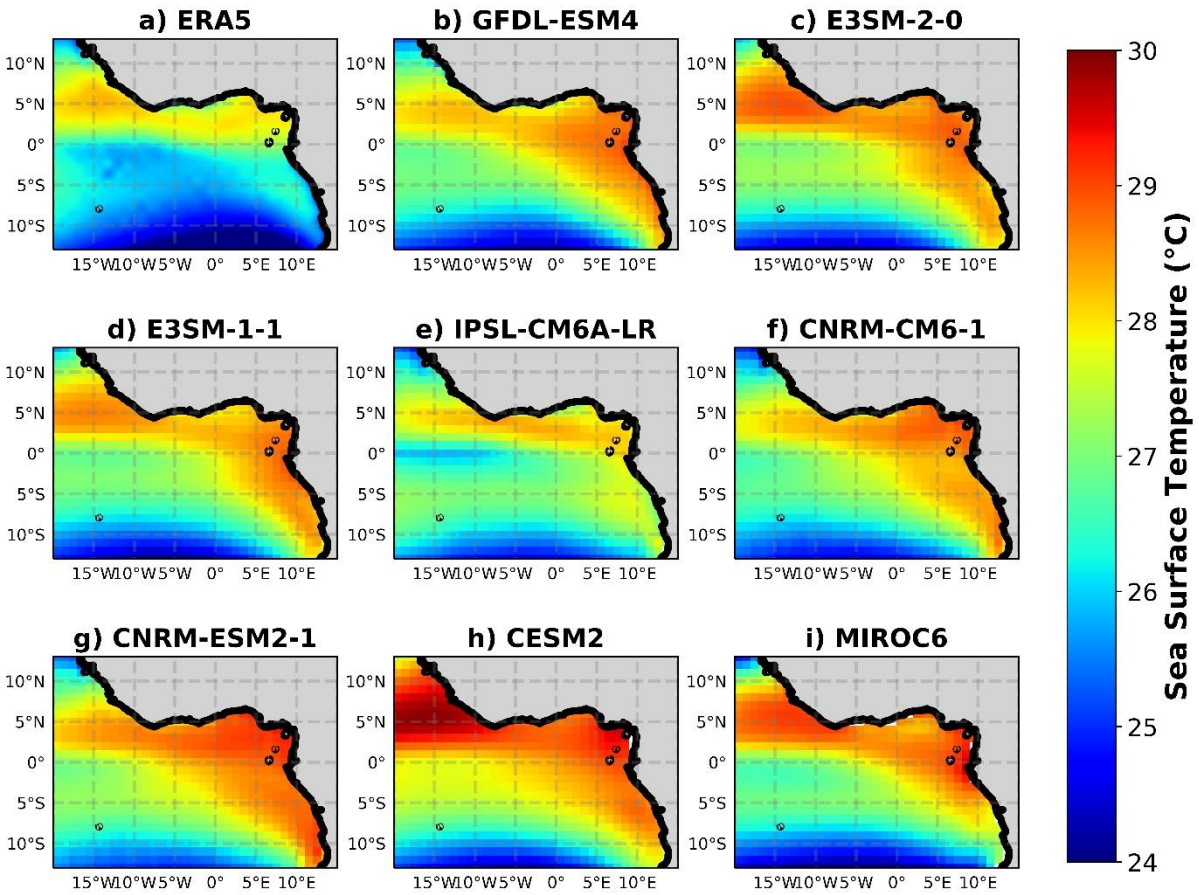

Figure D. 5 - Les champs annuels moyens de température de surface de la mer (SST en °C) sur l'océan atlantique dans a) ERA5, et b-i) les modèles CMIP6. Les moyens sont calculés pour la période 1983-2014.

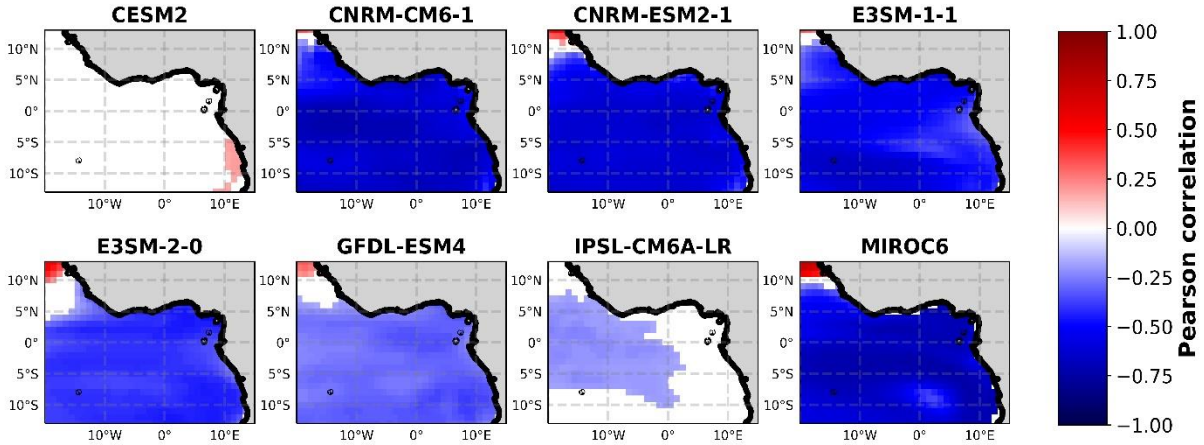

Figure D. 6 - Les champs Corrélations spatiales entre les variations interannuelles (1983-2014) de la température de surface de l'océan en JJAS et l'indice moyen JJAS de rayonnement solaire dans la région sud-est du Gabon-Congo. Uniquement les corrélations spatiales qui sont significatives au niveau de confiance de 95 % sont représentées.

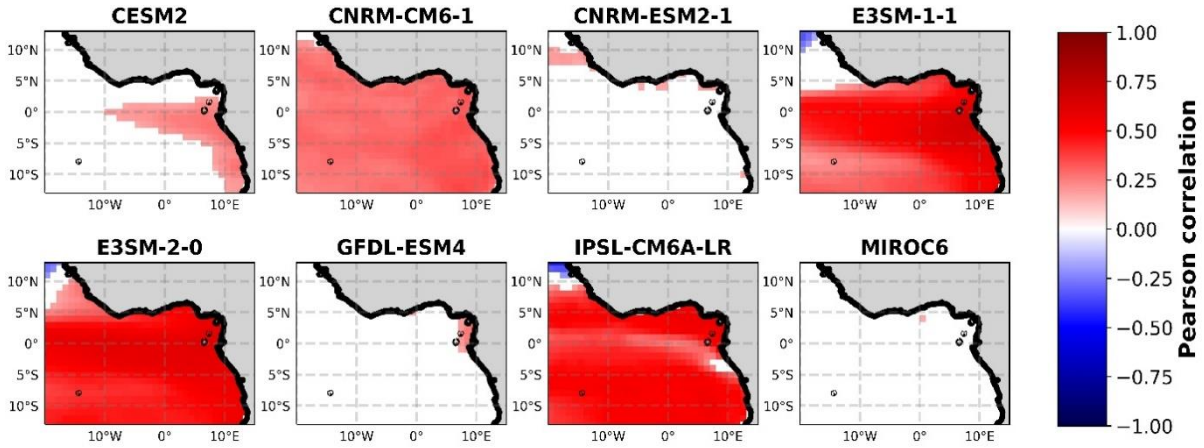

Figure D. 7 - Les champs Identique à la figure D.6 mais pour la région nord-est du Gabon-Congo.

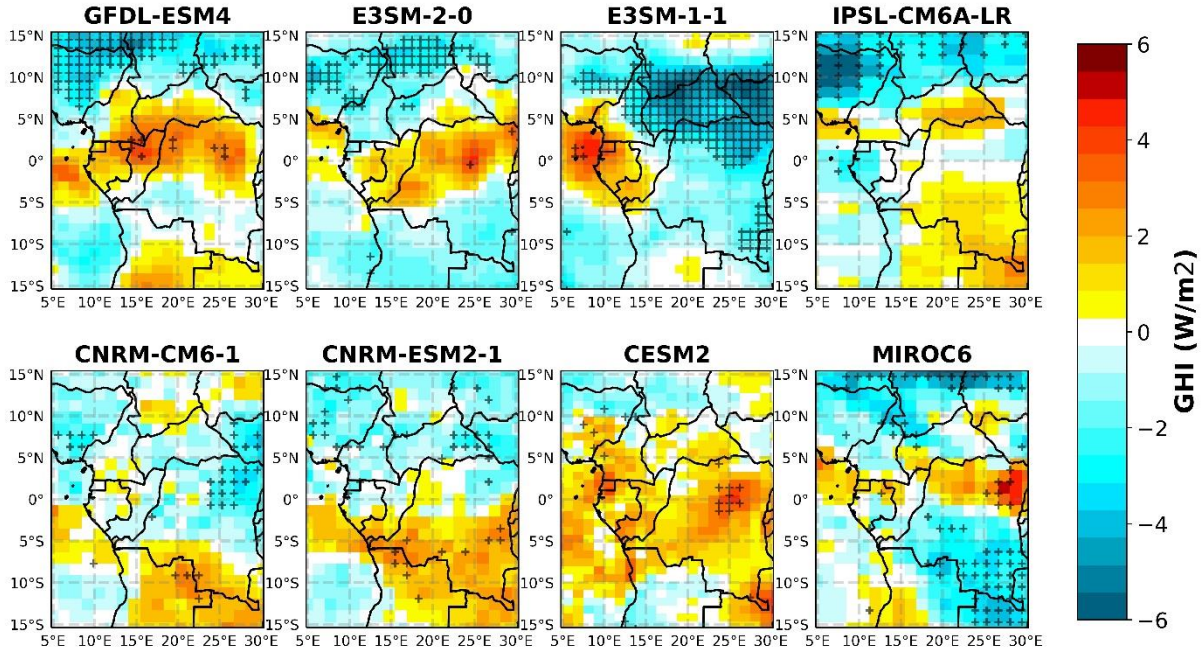

Figure D. 8 - Tendances de rayonnement solaires selon les modèles climatiques CMIP6 pour la période juin-septembre 1983-2014 (unité : W/m^2 par décennie). Les étoiles indiquent les pixels présentant des tendances significatives à un niveau de confiance de 95% selon le test de tendance de Mann-Kendall.