



CARACTERISATION DE TYPES D'AEROSOLS ATMOSPHERIQUES PAR L'ANALYSE DE DONNEES PHOTOMETRIQUES DU RESEAU AERONET EN AFRIQUE DE L'OUEST

CHARACTERIZATION OF TYPES OF ATMOSPHERIC AEROSOLS BY THE ANALYSIS OF PHOTOMETRIC DATA OF THE AERONET NETWORK IN WEST AFRICA

| Cheick Diarra ^{*1} | Adama Habib Coulibaly ¹ | and | Mody Sow ¹ |

¹Laboratoire d'Optique, de Spectroscopie et de Sciences Atmosphériques (LOSSA) | Département d'Etudes et de Recherche (DER) de Physique | Faculté des Sciences et Techniques (FST) | Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTTB) | Bamako (Mali) BP : E3206 | Tél : (00223) 20 22 32 44 – Fax : (00223) 20 23 81 68 |

| Received | 08 December 2018 |

| Accepted 25 January 2019 |

| Published 01 February 2019 |

| ID Article | Cheick-ManuscriptRef.1-ajira081218 |

Résumé

Introduction : Les activités humaines contribuent aux changements climatiques en causant des modifications à l'atmosphère de la Terre par des quantités émises de gaz à effet de serre (G.E.S.), de particules appelées aérosols atmosphériques. **Objective** : Cette étude porte sur la caractérisation de types d'aérosols atmosphériques par l'analyse de données photométriques du réseau AERONET en Afrique de l'Ouest. **Méthodes** : Deux paramètres optiques sont considérés dans cette étude : l'épaisseur optique des aérosols donnée à la longueur d'onde $\lambda = 440$ nm, notée τ_{440} ; et le coefficient d'Angström, pris à l'intervalle spectral 440-870 nm, noté $\alpha_{440-870}$. Les données considérées dans cette étude correspondent aux mesures de six stations photométriques du réseau mondial AERONET en Afrique de l'Ouest. Ces stations sont celles d'Agoufou, de Banizoumbou, de Cap-Vert, de Dakar, d'IER_Cinzana, et d'Ilorin. **Résultats** : Les résultats de l'étude indiquent de larges variabilités observées sur les variations des deux paramètres optiques pour l'ensemble des six stations photométriques. De plus, les résultats indiquent que l'atmosphère au-dessus de la sous-région est constituée d'une mixture d'aérosols de deux modes, mode grossier et d'accumulation. Les aérosols du mode grossier sont issus de la poussière minérale localement générée et renforcée par la poussière désertique provenant du Sahara. **Conclusion** : Les aérosols du mode d'accumulation sont issus des activités anthropiques, surtout les activités des feux de biomasse, le transport, l'agriculture et d'autres activités socio-économiques menées dans la sous-région.

Mots clés : Aérosols atmosphériques, AERONET, épaisseur optique des aérosols, coefficient d'Angström, mode grossier, mode d'accumulation, poussière minérale, feux de biomasse.

Abstract

Background: Human activities contribute to climate change by causing changes in the Earth's atmosphere through emitted amounts of greenhouse gases (GHGs), particles called atmospheric aerosols. **Objective**: This study takes on the characterization of aerosol types by analysis of photometric data of AERONET network in West Africa. **Methods**: Two optical parameters are considered in this study: aerosol optical thickness, given to wavelength $\lambda = 440$ nm, noticed τ_{440} , and Angström coefficient communally named Angström exponent, given in the spectral interval 440-870 nm, noticed $\alpha_{440-870}$. The considered data in this study correspond to six photometric sites from the worldwide network AERONET in West Africa. These sites are, sites of Agoufou, Banizoumbou, Cap-Verde, Dakar, IER_Cinzana, and Ilorin. The results of study indicate large variabilities observed of τ_{440} and $\alpha_{440-870}$ variations for the whole of the six photometric sites. **Results**: results indicate that the atmosphere over the West African region is constituted by a mixture of aerosols of two modes, coarse mode and accumulation mode. The aerosols of coarse mode are issue from mineral dust locally generated and reinforced by desert dust from Sahara. **Conclusion**: The aerosols of accumulation mode are issue from anthropic activities, in particularly biomass burning activities, transport, and agriculture, and from others socio-economic activities managed in the region.

Keywords: Atmospheric aerosols, AERONET, aerosol optical thickness, Angström coefficient, coarse mode, accumulation mode, mineral dust, biomass burning.

1. INTRODUCTION

Les activités humaines contribuent aux changements climatiques en causant des modifications à l'atmosphère de la Terre par des quantités émises de gaz à effet de serre (G.E.S.), de particules appelées aérosols atmosphériques. Les gaz à effet

de serre (G.E.S.) et les aérosols affectent le climat de la planète en altérant le rayonnement solaire pénétrant dans l'atmosphère et le rayonnement infrarouge thermique de la Terre partant vers l'atmosphère. Ces deux rayonnements entrent dans le bilan énergétique global de la Terre. La modification du contenu atmosphérique par le changement de propriétés des G.E.S. et des aérosols peut conduire à un réchauffement ou un refroidissement du système climatique global, qui est un système complexe interactif et constitué par l'atmosphère, l'hydrosphère, les terres émergées et la biosphère [1]. Depuis le début de l'ère industrielle (vers 1750), l'ensemble des effets dus aux activités humaines a été sur le climat une influence de réchauffement. L'impact de l'homme sur le climat durant cette ère dépasse beaucoup plus de celui dû aux changements connus dans les processus naturels tels que les changements solaires, les éruptions volcaniques [1].

Les aérosols atmosphériques sont des particules présentes dans l'atmosphère avec de tailles, de concentrations et de compositions chimiques très variées. Certains aérosols sont directement émis dans l'atmosphère tandis que d'autres sont formés à partir des composants atmosphériques. Les aérosols atmosphériques sont d'origine naturelle (comme, la poussière minérale produite à la surface des terres, les aérosols de sel marin, les particules de poussière des éruptions volcaniques et les particules issues des réactions biochimiques dans l'atmosphère) et d'origine anthropogénique (comme les particules des feux de biomasse, les aérosols de la pollution industrielle et urbaine, la suie). Les concentrations des aérosols atmosphériques, leurs propriétés optiques sont l'une des larges sources d'incertitude dans les évaluations courantes et les prédictions de changement climatique global [2].

Les aérosols atmosphériques sont des particules submillimétriques présentant une large variété de taille et de composition chimique. Leurs concentrations dépendent fortement de la situation géographique et des conditions météorologiques et environnementales de leurs zones de production [3]. La connaissance des caractéristiques des aérosols à l'échelle globale, l'évolution de leurs interactions avec d'autres paramètres atmosphériques et avec le rayonnement solaire sont importantes pour les recherches sur l'atmosphère [4] et sur l'environnement. Les aérosols peuvent influencer le climat de deux façons : directement en diffusant et en absorbant le rayonnement et indirectement en agissant comme noyaux de condensation pour la formation des nuages ou en modifiant les propriétés optiques des nuages et leur durée de vie [5].

Les aérosols atmosphériques ont été reconnus comme d'importants agents du forçage climatique et jouent un rôle critique dans le changement climatique global [6]. Ils ont une influence significative du bilan radiatif de la planète aux échelles locale, régionale et globale [7]. La connaissance des caractéristiques des aérosols à l'échelle globale, l'évolution de leurs interactions avec d'autres paramètres atmosphériques et avec la radiation solaire sont d'une importance capitale pour les recherches sur l'atmosphère [4]. À cause de leur grande variabilité spatiale et temporelle, la détection des aérosols présente une difficulté considérable, par conséquent, des efforts ont été réalisés pour améliorer la caractérisation des aérosols en utilisant des mesures in-situ dans l'atmosphère [4], et des observations continues sont indispensables depuis les satellites, les réseaux d'instruments basés au sol et les campagnes dédiées [8]. À l'échelle globale, quatre principaux types d'aérosols peuvent être détectés avec leurs différentes caractéristiques physico-chimiques, optiques et radiatives, ce sont : les aérosols des feux de biomasse, de la pollution industrielle et urbaine, des aérosols de poussière désertique et les aérosols marins [8]. Les instruments, les radiomètres solaires Sun-Sky basés au sol produisent des mesures fiables et continues sur les propriétés optiques des aérosols ambiants à l'entrée de la colonne atmosphérique d'une localité donnée [8].

Un réseau mondial des radiomètres solaires Sun-Sky, encore appelés les photomètres solaires, nommé Aerosol Robotic Network (AERONET) a été établi par la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Le réseau AERONET est un réseau de télédétection au sol, de mesures photométriques solaires avec plus de 300 stations dans le monde [9a,9b,10,11]. Commencé depuis 1994, quatorze (14) stations photométriques ont été implantées en Afrique de l'Ouest par le module Photométrie de Traitement Opérationnel pour la Normalisation Satellitaire (PHOTONS) du réseau AERONET [8-12]. Le but du réseau AERONET est de caractériser les propriétés des aérosols en constituant une base de données continue et utile pour la climatologie de aérosols [9a], de valider les données obtenues des observations satellitaires [5-10]. Il produit des données sur les propriétés des aérosols qui sont l'épaisseur optique des aérosols, en anglais Aerosol Optical Thickness (AOT) ou Aerosol Optical Depth (AOD) ; le coefficient d'Angström α encore appelé le coefficient de taille ou la distribution en taille ; l'albédo de diffusion simple ; le facteur d'asymétrie ; l'indice de réfraction ; la fonction de phase ; le forçage radiatif à partir des mesures de l'extinction spectrale du rayonnement solaire directement transmis et des produits d'inversion [4-10]. L'épaisseur optique des aérosols, notée τ_λ et le coefficient d'Angström, noté α , sont les paramètres clés pour l'étude de la climatologie des aérosols. Le paramètre épaisseur optique des aérosols, obtenu à partir des données de l'irradiance directement transmise, mesurée par les photomètres solaires de type CIMEL du réseau AERONET, est un indicateur de quantités d'aérosols dans la colonne verticale de l'atmosphère et constitue le principal paramètre pour évaluer le forçage radiatif et son impact sur le climat. Le coefficient d'Angström α , déterminé à partir de

la dépendance spectrale de l'EOA, est un bon indicateur de la taille des particules [13] et ses variations [4]. C'est une mesure de la dépendance spectrale de l'épaisseur optique des aérosols (τ_λ) et est inversement reliée à la taille des particules, c'est-à-dire, un coefficient d'Angström plus petit indique la taille de particule large et vice versa [14].

Des études récentes ont montré que les applications utiles des mesures du coefficient d'Angström a pour la caractérisation des propriétés physiques et radiatives des aérosols. Les valeurs du coefficient d'Angström a proches de zéro sont associées au large chargement de grosses particules [15], comme celles de la poussière désertique du Sahara avec de grandes épaisseurs optiques. Alors que les valeurs de α , proches de 2,0 [15] et plus, indiquent la population de particules est largement celle des noyaux d'Aitken [4]. Cependant, la caractérisation des propriétés des aérosols en Afrique de l'ouest, est importante car cette région est adjacente à la fois du désert du Sahara qui est la plus large source de poussière dans le monde et de la savane africaine qui est une source majeure des émissions des feux de biomasse (les aérosols et les traces de gaz) dans le monde [10]. En plus, des importantes quantités de poussière, de fumée et de la pollution localement générées en cette partie de l'Afrique et qui sont dues à la croissance rapide des populations et des activités économiques, sont associées des quantités de combustibles fossiles. La climatologie des aérosols dans la région est influencée par le vent (le harmattan) chargé de poussière du Sahara et les activités des feux de biomasse à cause de la végétation typiquement caractérisée par la savane [10]. Les vents Harmattan, vents d'Est ou du Nord-est, sont les principaux mécanismes pour le transport de la poussière et soufflent durant toute la saison sèche dans la région Ouest africaine. La période hivernale est caractérisée par la présence de la mousson, qui est un système de vents périodiques des régions tropicales dans le monde. La mousson ouest-africaine est des plus importants systèmes de circulation atmosphérique à grande échelle. C'est un système sensible qui peut être perturbé par différents facteurs à travers le système un large rang d'échelle [16].

2. Description géographique des stations

Cette étude présente les résultats d'analyse des données issues des mesures de plusieurs années de six stations photométriques solaires du réseau mondial AERONET, implantées en Afrique de l'Ouest. Ces stations photométriques solaires sont: la station d'Agoufou (Mali), la station de Banizoumbou (Niger), la station de Cap-Vert (Cap-Vert), la station de Dakar (Sénégal), la station d'IER Cinzana (Mali), la station d'Ilorin (Nigéria). Toutes les stations photométriques du réseau mondial AERONET sont brièvement décrites sur son site web (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

La station d'Agoufou, de coordonnées géographiques (latitude : 15,34540° Nord ; longitude : 1,47912° Ouest ; élévation : 305,0 m), est située sur une dune de sable près du village Agoufou, dont elle porte le nom, qui est à 30 km d'Hombori qui est une commune rurale de nord-ouest dans la région de Mopti au Mali. La station de Banizoumbou de coordonnées géographiques (latitude : 13,54117° Nord ; longitude : 2,66475° Est ; élévation : 250,0 m), est localisée sur un petit plateau d'une aire (zone) sablée, cultivée et proche du village Banizoumbou, qui est situé à 60 km à l'Est de Niamey (Niger). La station de Cap-Vert de coordonnées géographiques (latitude : 16,732° Nord ; longitude : 22,93550° Est ; élévation : 60,0 m), se trouve dans l'archipel de Cap-Vert, située dans l'océan Atlantique. L'instrument est implanté sur le toit d'un bâtiment de 8 à 10 m de haut de l'Institut National de Météorologie et de Géophysique (INMG) de Cap-Vert. La station de Dakar, de coordonnées géographiques (latitude : 14,39417° Nord ; longitude : 4,3400° Est ; élévation : 10,0 m), est située sur le toit d'un bâtiment de 12 m de haut sur le site côtier de la station géophysique de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), à M'Bour, localité à 90 km au Sud de Dakar (Sénégal). La station d'IER_Cinzana, de coordonnées géographiques (13,27843° N ; 5,93387° O ; 285,0 m d'élévation), est située dans un champ de culture de la station de recherche agronomique de l'Institut d'Economie Rurale (IER) à 5 km du village Cinzana-Gare qui est à 35 km au Sud-est dans la région de Ségou au Mali. La station d'Ilorin, de coordonnées géographiques (latitude : 8,3200° Nord ; longitude : 4,3400° Est ; élévation : 350,0 m), est implantée sur le toit du Département de Physique de l'Université d'Ilorin à Ilorin (Nigéria), localité située dans l'extrémité supérieure de la zone de savane guinéenne et sous l'influence de l'alternance annuelle du passage vers le Nord et vers le Sud de la zone de convergence intertropicale (ZCIT).

3. Instrumentation, données AERONET et méthodologie

3.1. Instrumentation : Les données considérées dans cette étude sont des mesures effectuées par des radiomètres solaires Sun-Sky C-318, encore appelés les photomètres solaires C-318, du groupe industriel français CIMEL Electronique et qui sont largement utilisés dans le réseau mondial AERONET [9a]. Le réseau AERONET a permis l'établissement du cycle saisonnier du contenu intégral vertical (Aerosol optical depth) de la poussière minérale et des feux de biomasse dans différentes stations de l'Afrique de l'Ouest [9b]. Les données du réseau AERONET sont largement utilisées comme référence pour la validation des satellites [17] et pour les études d'évaluation des modèles, les caractéristiques de mesure sont très bien comprises et documentées [12]. Ces instruments de télédétection au sol, les radiomètres Sun-Sky, sont

décrits en détail dans les travaux de Holben et al., (1998), ainsi que brièvement dans d'autres études. Cependant, une description brève est ainsi donnée. Les radiomètres Sun-Sky de type CIMEL C-318 effectuent des mesures solaires directes sous un angle de vue de $1,2^\circ$ chaque 15 minutes à 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, et 1020 nm (longueurs d'onde nominales). Une série de mesures nécessite 8 à 10 secondes et les mesures sont prises en triplet à des intervalles de 30 secondes [3]. Les mesures d'extinction sont utiles pour les valeurs de l'épaisseur optique des aérosols à chaque longueur d'onde, exceptée la longueur d'onde 940 nm qui est utilisée pour mesurer la quantité totale de vapeur d'eau pour précipitations en centimètres [9a, 9b, 18].

3.2. Données AERONET et méthodologie : Dans cette étude, les données sont obtenues à partir des mesures de six stations photométriques solaires du réseau mondial AERONET, implantées en Afrique de l'Ouest. Les données considérées représentent les paramètres optiques des aérosols, l'épaisseur optique des aérosols τ et le coefficient d'Angström α (coefficient de taille des particules). Les données sont disponibles sur le site web du réseau (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Les données AERONET [9a-19] sont de deux types : données directes de l'algorithme "Direct Sun Algorithm" et leurs produits d'inversion. Les données AERONET sont aussi de deux versions : Version 1 (version d'essai) et Version 2 (version actuelle). L'archive du réseau AERONET est divisée en trois niveaux de qualité [20] : le premier niveau (Level 1.0) ; le deuxième niveau (Level 1.5) et le troisième niveau (Level 2.0). Les données du niveau Level 1.0 sont des données brutes non examinées. Les données du niveau Level 1.5 sont des données automatiquement examinées, mais non inspectées, c'est-à-dire, tous les cas de nuages et de gaz ne sont pas éliminés. Les données du niveau Level 2.0 sont des données de qualité assurée, c'est-à-dire, des données automatiquement traitées en éliminant les cas des nuages et des gaz, puis manuellement inspectées [9a]. Dans cette étude, nous avons utilisé les données de niveau (Level 2.0) de la Version 2 de l'algorithme "Direct Sun Algorithm". Les données disponibles de l'épaisseur optique des aérosols τ pour les six stations sont automatiquement fournies suivant les longueurs d'onde standard du réseau AERONET : 440, 675, 870 et 1020 nm. Mais, nous avons considéré les valeurs de l'épaisseur optique des aérosols à la longueur d'onde $\lambda = 440$ nm, notée τ_{440} . Les données de l'épaisseur optique des aérosols à cette longueur d'onde sont les plus élevées, donc plus significatives. Les données du coefficient d'Angström α sont directement fournies suivant les intervalles spectraux : 440-870 nm, 440-675 nm, 500-870 nm. Les valeurs du coefficient d'Angström suivant l'intervalle spectral 440-870 nm, noté $\alpha_{440-870}$, sont beaucoup plus constantes dans la bande spectrale 440-870 nm que les autres et sont les seules prises en compte dans cette étude et dans beaucoup d'autres études. Pour l'analyse et l'interprétation des résultats, nous avons pris en compte d'abord les moyennes journalières de ces paramètres optiques des aérosols, puis leurs moyennes mensuelles, et leurs moyennes annuelles durant les différentes périodes d'étude des stations photométriques considérées.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, les données sur les paramètres optiques des aérosols, pour les six stations photométriques, sont analysées et interprétées durant les différentes périodes d'étude considérées. Ce sont d'abord les moyennes journalières des paramètres optiques des aérosols qui sont considérées, puis les moyennes mensuelles, et les moyennes annuelles mentionnées dans différents tableaux.

4.1. Variations des moyennes journalières des paramètres optiques des aérosols

4.1.1. Variations des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols : Les variations des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} de différentes stations photométriques sont représentées sur la figure 1 ci-dessous. Ces variations sont étudiées à des intervalles de 360 jours représentant une année pour la période d'étude considérée de chaque station photométrique.

Pour la station d'Agoufou, la plupart des valeurs de moyennes journalières sont comprises entre 0,0 et 1,0 durant toutes les années de la période considérée (de 2003 à 2009). Il existe aussi des valeurs élevées de l'épaisseur optique τ_{440} qui sont comprises entre 1,0 et 2,0 ($1,0 \leq \tau_{440} \leq 2,0$). Il y a des valeurs les plus élevées de τ_{440} comprises entre 2,5 et 4,0 ($2,5 \leq \tau_{440} \leq 4,0$). Pour la station de Banizoumbou, la majorité des valeurs de moyennes journalières de l'épaisseur optique τ_{440} est comprise entre 0,0 et 1,0 durant toute la période considérée (de 2002 à 2011). Plusieurs valeurs de τ_{440} sont comprises entre 1,0 et 2,0. Il existe certaines valeurs de τ_{440} qui dépassent 2,0 ($\tau_{440} > 2,0$) et les plus élevées sont comprises entre 2,5 et 4,0 ($2,5 \leq \tau_{440} \leq 4,0$). Pour la station de Cap-Vert, presque la totalité des valeurs de moyennes journalières de l'épaisseur optique τ_{440} sont comprises entre 0,0 et 1,0 durant toute la période considérée (de 2000 à 2011). Certaines valeurs de l'épaisseur optique τ_{440} sont comprises entre 1,0 et 1,5 ($1,0 \leq \tau_{440} \leq 1,5$). Les valeurs de τ_{440} les plus élevées sont comprises entre 1,5 et 3,0 ($1,5 \leq \tau_{440} \leq 3,0$). Pour la station de Dakar, la plupart des valeurs de moyennes journalières sont comprises entre 0,0 et 1,0 durant toute la période considérée (de 2003 à 2011). Il y a des valeurs de

moyennes journalières de l'épaisseur optique τ_{440} qui sont comprises entre 1,0 et 2,0 ($1,0 \leq \tau_{440} \leq 2,0$). Quelques valeurs les plus élevées de τ_{440} sont comprises entre 2,0 et 4,0 ($2,0 \leq \tau_{440} < 4,0$). Pour la station IER_Cinzana, la majorité des valeurs de moyennes journalières de l'épaisseur optique τ_{440} est comprise entre 0,0 et 1,0 durant la période considérée (de 2004 à 2011). Il y a plusieurs valeurs de τ_{440} qui sont comprises entre 1,0 et 1,5. Il existe encore des valeurs de τ_{440} plus élevées, dépassant 2,0 ($\tau_{440} > 2,0$) et la plus élevée est de l'ordre de 4,5. Pour la station d'Ilorin, la majeure partie des valeurs de moyennes journalières de l'épaisseur optique τ_{440} est comprise entre 0,0 et 1,5 durant la période d'étude considérée (de 2005 à 2012). Plusieurs valeurs de l'épaisseur optique τ_{440} sont comprises entre 1,5 et 2,5 ($1,5 \leq \tau_{440} \leq 2,5$). Les valeurs les plus élevées de τ_{440} sont comprises entre 2,5 et 4,0 ($2,5 \leq \tau_{440} < 4,0$). Notons que pour l'ensemble des stations photométriques considérées, les moyennes journalières de l'épaisseur optique τ_{440} ne couvrent pas entièrement les 360 jours annuels durant leurs périodes d'étude. Ce qui présente des discontinuités dans les allures des variations des moyennes journalières de τ_{440} , remarquables à Agoufou, au Cap-Vert, surtout à Ilorin. Les stations photométriques considérées dans cette étude, présentent des valeurs des moyennes journalières de τ_{440} , avec de larges variabilités durant leurs périodes d'études. La plus grande partie des moyennes journalières de τ_{440} , formant des nuages de points est comprise entre les valeurs 0,0 et 1,5 pour les stations d'Agoufou, de Banizoumbou, d'IER_Cinzana et d'Ilorin. Pour les deux stations, la station de Dakar et celle de Cap-Vert, la partie majeure des moyennes journalières de τ_{440} , formant des nuages de points est comprise entre les valeurs 0,0 et 1,0.

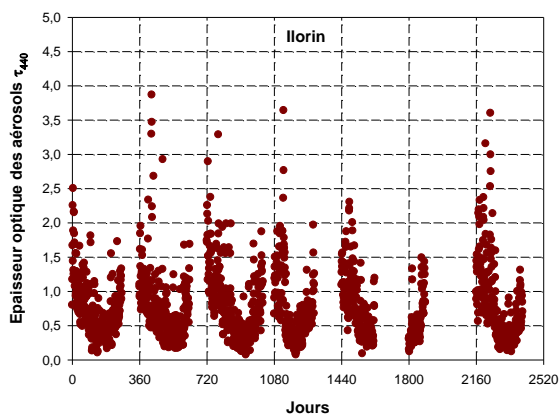
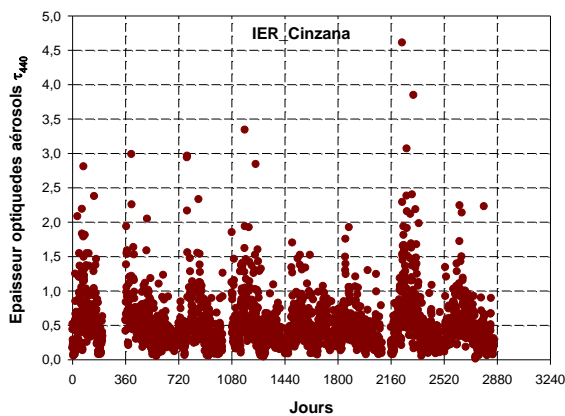
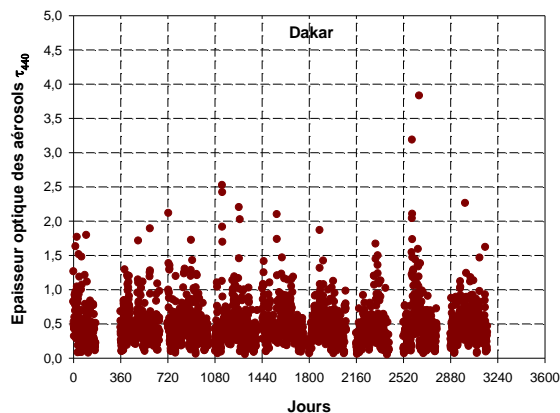
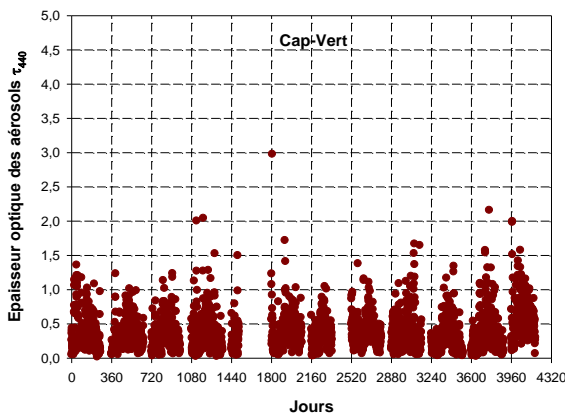
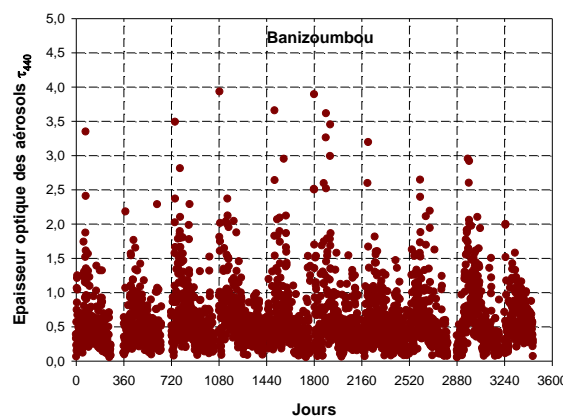
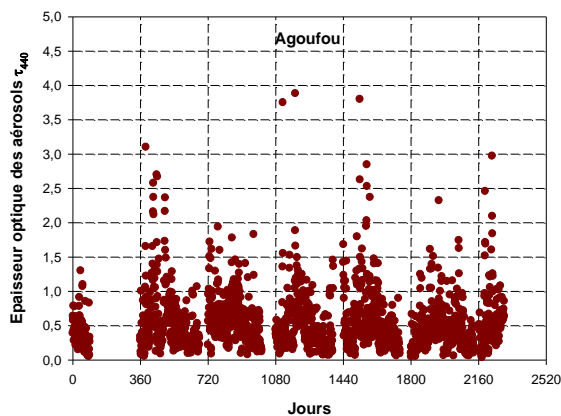


Figure 1 : Variations des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} des six stations photométriques solaires durant leurs périodes d'étude considérées.

4.1.2. Variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström des aérosols : Les variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ de différentes stations photométriques sont représentées sur la figure 2 ci-dessous. Ces variations sont aussi considérées à des intervalles de 360 jours pour chaque station photométrique.

Pour la station d'Agoufou, la plupart des valeurs des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ sont comprises entre 0,0 et 1,0 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,0$) durant la période d'étude considérée (2003-2009), avec une grande partie des valeurs de $\alpha_{440-870}$ comprise entre 0,0 et 0,5 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 0,5$). Il existe quelques valeurs plus élevées du coefficient $\alpha_{440-870}$ qui sont comprises entre 1,0 et 1,5 ($1,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,5$). De plus, il y a aussi des valeurs de $\alpha_{440-870}$ inférieures à zéro ($\alpha_{440-870} < 0,0$). Ce qui indique la contribution des particules géantes (très grosses particules de poussière désertique) dans la colonne atmosphérique au-dessus de la localité. Pour la station de Banizoumbou, la majeure partie des valeurs des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ durant la période d'étude (2002-2011) est comprise entre 0,0 et 1,0 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,0$). Il y a des valeurs plus élevées de $\alpha_{440-870}$ qui sont comprises entre 1,0 et 2,0 ($1,0 \leq \alpha_{440-870} < 2,0$). Il existe aussi des valeurs de $\alpha_{440-870}$ négatives ($\alpha_{440-870} < 0,0$). Ce qui indique la présence de grosses particules, ou même de particules géantes (particules issues de la poussière désertique par exemple) dans l'atmosphère au-dessus de la localité. Pour la station de Cap-Vert, presque la totalité des valeurs des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ durant la période d'étude (2000-2011) est comprise entre 0,0 et 1,0 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,0$). Il y a quelques valeurs plus élevées de $\alpha_{440-870}$ qui sont comprises entre 1,0 et 2,0 ($1,0 \leq \alpha_{440-870} < 2,0$). Il y a aussi des valeurs de $\alpha_{440-870}$ inférieures à zéro ($\alpha_{440-870} < 0,0$). Ce qui indique la présence dans l'atmosphère de grosses particules, voire de particules géantes, provenant de la poussière désertique. Et en plus, à cause de la situation géographique de la station de Cap-Vert dans l'Océan Atlantique, les valeurs négatives de $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} < 0,0$) suggèrent aussi la contribution des aérosols marins dans la colonne atmosphérique au-dessus de la localité. Pour la station de Dakar, durant la période d'étude (2003-2011), la majeure partie des valeurs des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ est comprise entre 0,0 et 1,0 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,0$). Il y a des valeurs plus élevées de $\alpha_{440-870}$ comprises entre 1,0 et 1,5 ($1,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,5$). De plus, quelques valeurs de $\alpha_{440-870}$ sont négatives ($\alpha_{440-870} < 0,0$). Ce qui indique la contribution des particules géantes (très grosses particules de poussière désertique) dans la composition de l'atmosphère en aérosols. Pour la station d'IER_Cinzana, la grande partie des valeurs des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ durant la période d'étude (2004-2011) est comprise entre 0,0 et 1,0 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,0$). Il y a quelques valeurs les plus élevées de $\alpha_{440-870}$ qui sont comprises entre 1,0 et 3,0 ($1,0 \leq \alpha_{440-870} < 3,0$). De plus, il existe des valeurs négatives de $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} < 0,0$) qui indiquent ainsi la présence des particules géantes (grosses particules issues de la poussière désertique) dans le contenu de l'atmosphère en aérosols au-dessus de la localité. Pour la station d'Ilorin, durant la période d'étude considérée (2005-2012), presque la totalité des valeurs des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ est comprise entre 0,0 et 1,5 ($0,0 \leq \alpha_{440-870} \leq 1,5$). Il existe quelques valeurs les plus élevées de $\alpha_{440-870}$ qui sont comprises entre 1,5 et 2,0 ($1,5 \leq \alpha_{440-870} < 2,0$). De plus, il y a très peu de valeurs négatives de $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} < 0,0$), indiquant ainsi la présence des grosses particules, voire de géantes particules (particules issues de la poussière désertique par exemple) dans le contenu de l'atmosphère en aérosols au-dessus de la localité. De même, notons que pour l'ensemble des stations photométriques considérées, les moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ ne couvrent pas entièrement les 360 jours par an durant leurs périodes d'étude. Ce qui présente des discontinuités dans les allures des variations des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ encore remarquables à Agoufou, au Cap-Vert et surtout à Ilorin. Les stations photométriques considérées dans cette étude, présentent aussi des valeurs des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$, avec de larges variabilités durant leurs périodes d'études. La majeure partie des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ formant des nuages de points pour les stations d'Agoufou, de Banizoumbou, de Cap-Vert, de Dakar et d'IER_Cinzana est comprise entre les valeurs de 0,0 et 1,0. La grande partie des moyennes journalières du coefficient d'Angström formant des nuages de points pour la station d'Ilorin est comprise entre 0,0 et 1,5.

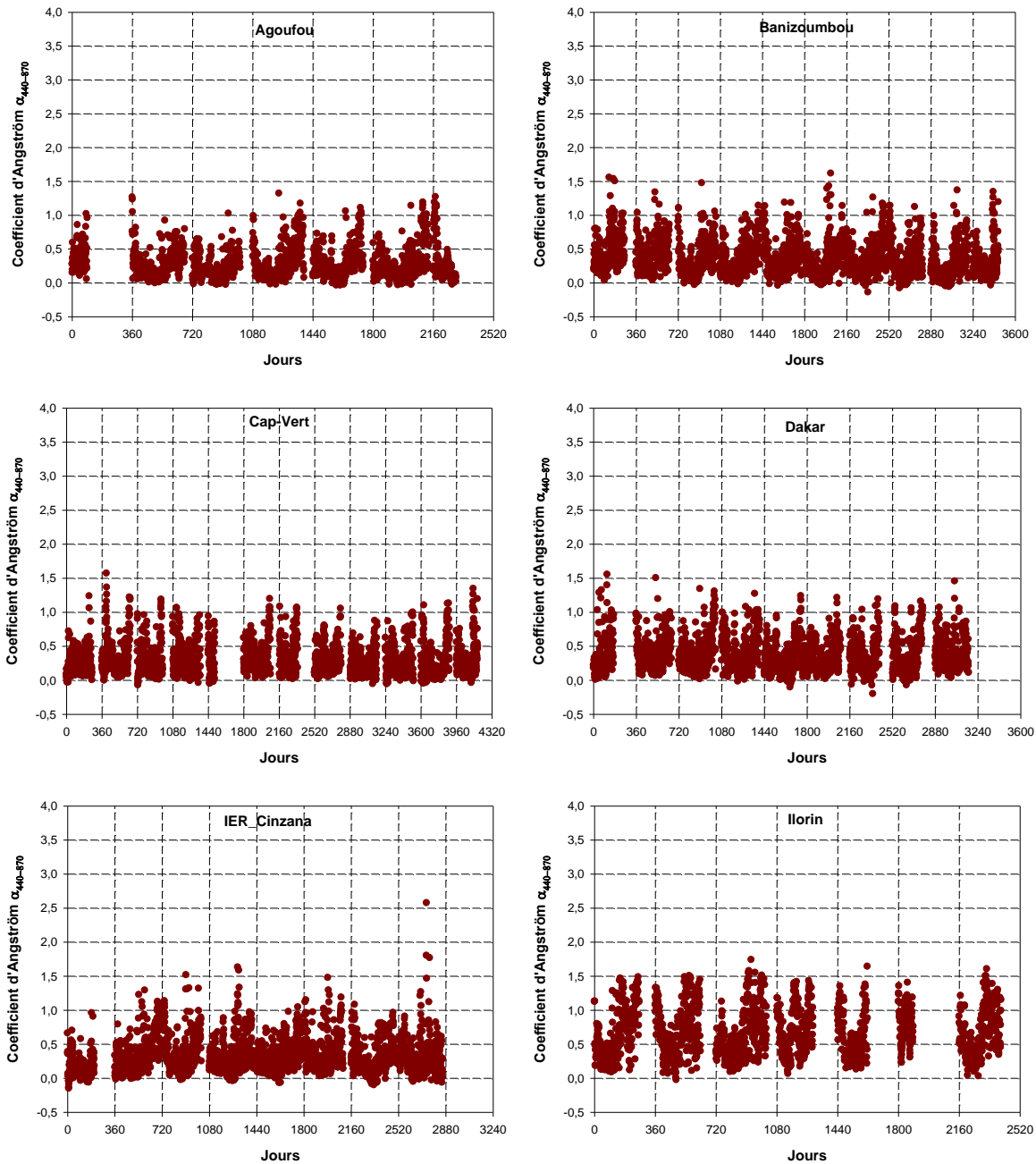


Figure 2 : Variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ de six stations photométriques solaires durant leurs périodes d'études considérées.

4.2. Fréquences de distribution des moyennes journalières des paramètres optiques des aérosols.

4.2.1. Fréquences de distribution des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols : Les histogrammes des fréquences de distribution des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} sont représentés sur la figure 3 ci-dessous.

Pour la station d'Agoufou, environ 70 % des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 19 % des moyennes de l'épaisseur optique de τ_{440} sont repartis de 0,5 et 1,0. Environ 8% de τ_{440} sont distribués entre les classes 1,0 et 1,5. Environ le reste de τ_{440} , en très faibles pourcentages, est distribué de 1,5 à 3,5 voire à 4,0. Pour la station de Banizoumbou, environ 68 % des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} sont distribués de 0,0 à 0,5. Alors que, près de 20 % des moyennes journalières de τ_{440} sont distribués de 0,5 à 1,0. Environ 9 % des moyennes journalière de sont repartis de 1,0 à 1,5. En autre environ 2 % des moyennes journalières de τ_{440} sont repartis de 1,5 à 2,0. Le reste de τ_{440} en très faibles pourcentages, est reparti de 2,5 à 4,0.

La station de Cap-Vert, environ 88 % des moyennes journalières de τ_{440} sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 9 % de τ_{440} sont repartis de 0,5 à 1,0. Le reste de τ_{440} , en très faibles pourcentages, est distribué de 1,0 à 1,5. Alors que la station de Dakar, environ 76 % des moyennes journalières de τ_{440} sont repartis de 0,0 à 0,5. Près de 19 % de τ_{440} sont repartis de 0,5 à 1,0. Environ 4,5 % des moyennes journalières de τ_{440} sont repartis de 1,0 à 1,5. Environ 1 % de τ_{440} est reparti est distribué de 1,5 à 2,0. Pour la station IER_Cinzana, environ 74 % des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 18 % de τ_{440} sont repartis de 0,5 à 1,0. Près de 4 % de sont distribués de 1,0 à 1,5. Environ 1 % de τ_{440} est distribué de 1,5 à 2,0 essentiellement, et jusqu'au delà de 4,5. Pour la station Ilorin, près de 48 % des moyennes journalières de τ_{440} sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 28 % de τ_{440} sont repartis de 0,5 à 1,0. Environ 17 % de τ_{440} sont distribués de 1,0 à 1,5. Près de 3 % de τ_{440} sont distribués de 1,5 à 2,0. Environ 1 % de τ_{440} est reparti de 2,0 à 2,5. Le reste de l'épaisseur optique, en très faibles pourcentages, est distribué de 2,5 à 4,0.

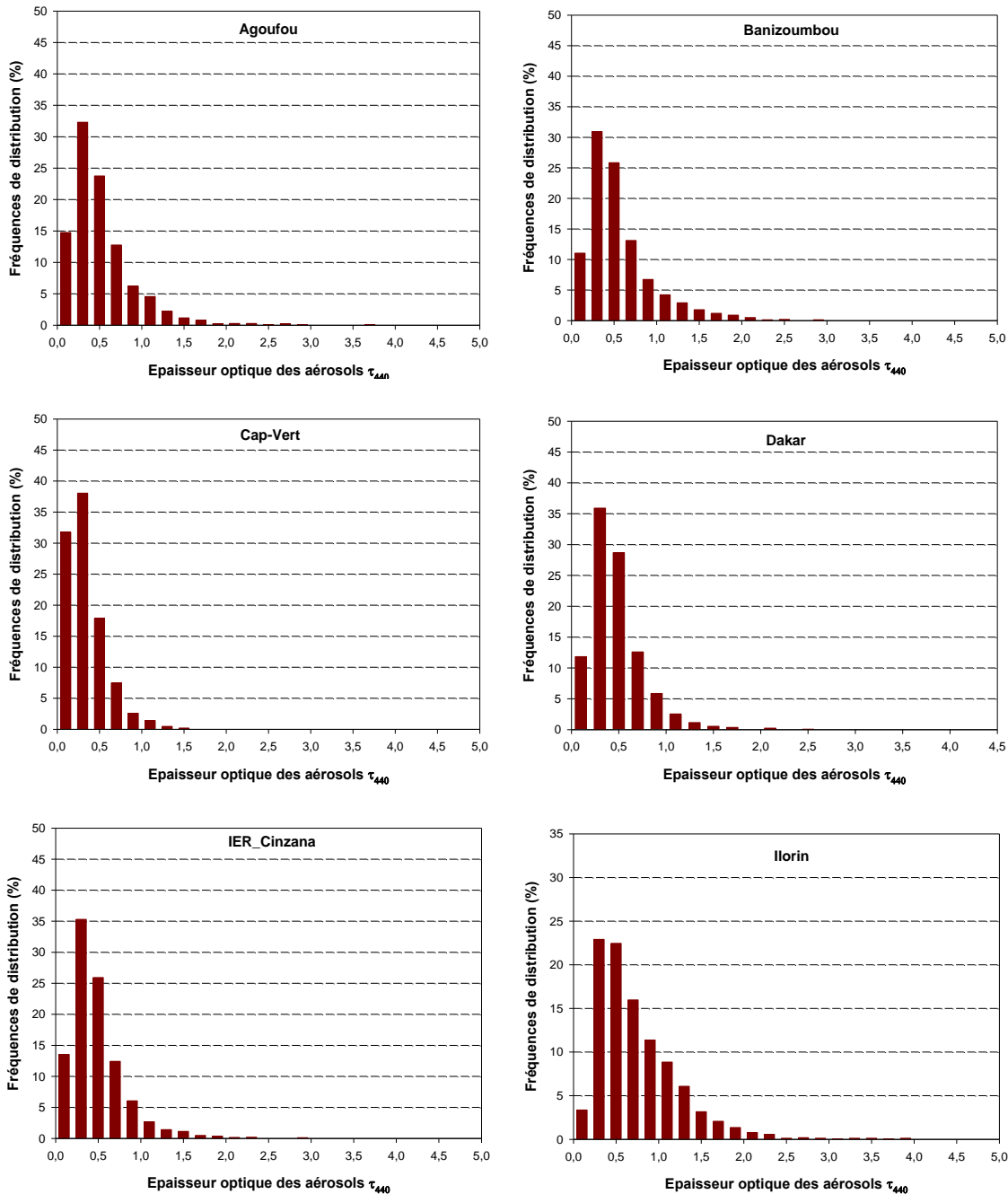
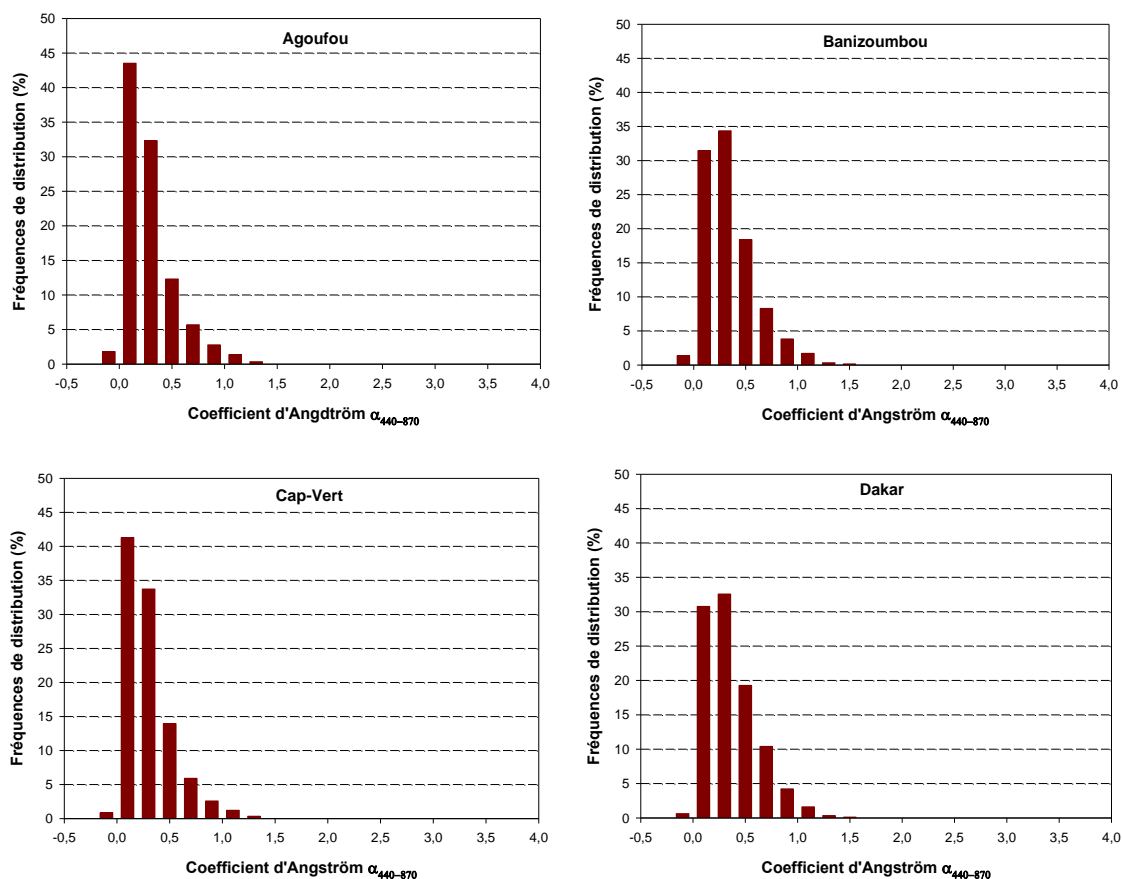


Figure 3 :Fréquences de distribution des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} de six stations photométriques solaires durant leurs différentes périodes d'étude considérées.

4.2.2. Fréquences de distribution des moyennes journalières du coefficient d'Angström des aérosols : Les histogrammes des fréquences de distribution (en %) des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ des six stations photométriques considérées sont représentées sur la figure 4 ci-dessous.

Pour la station d'Agoufou, environ 2 % des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ inférieures à zéro sont repartis de -0,1 à 0,0. Environ 88 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 8,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,5 à 1,0. Environ 1,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ est reparti de 1,0 à 1,5. Pour la station de Banizoumbou, près de 1,5 % des moyennes journalières négatives du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ est reparti de -0,1 à 0,0. Environ 84 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 12 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,5 à 1,0. Environ 2,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont repartis de 1,0 à 1,5.

Pour la station de Cap-Vert, près de 0,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ est reparti de -0,1 à 0,0. Environ 90 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,0 à 0,5. Environ 8,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont repartis de 0,5 à 1,0. Près que 1,5 % des moyennes journalières de sont repartis de 1,0 à 1,5. Pour la station de Dakar, près de 0,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont repartis de -0,1 à 0,0. Environ 82 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,0 à 0,5 et 0,5 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont repartient entre 0,0 à 1,0. Près de 0,5 des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ est reparti de 1,0 à 1,5. Pour la station d'IER_Cinzana, environ 2 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de -0,1 à 0,0. Environ 84 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,0 à 0,5. Près de 14 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont repartis de 0,5 à 1,0. Près de 1 % des moyennes journalières de est reparti de 1,0 à 1,5 voire 2,5. L'analyse montre aussi que la station d'Ilorin, le pourcentage des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ négatives est quasi nul. Environ 51 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,0 à 0,5. Environ 19 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 0,5 à 1,0. Et encore, près de 19 % des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ sont distribués de 1,0 à 1,5.



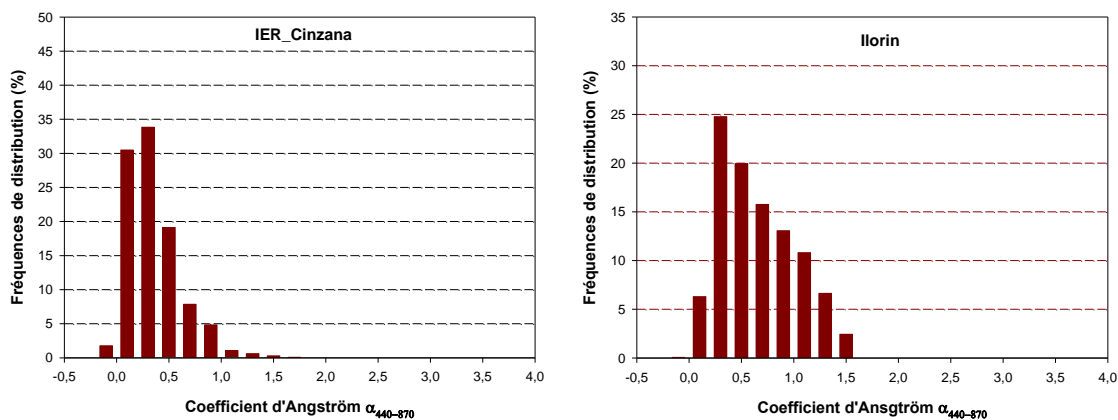


Figure 4 : Fréquences de distribution des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ des six stations photométriques solaires durant leurs différentes périodes d'étude considérées.

4.3. Variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ en fonction de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} : Les variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ en fonction de celles de l'épaisseur optique τ_{440} sont représentées sur la figure 5, ci-dessous.

Pour l'ensemble des six stations photométriques considérées (Agoufou ; Banizoumbou ; Cap-vert ; Dakar ; IER_Cinzana et Ilorin), les valeurs plus élevées des moyennes journalières du coefficient $\alpha_{440-870}$ correspondent aux faibles de l'épaisseur optique τ_{440} . Ce qui indique la contribution des grosses particules dans le contenu de l'atmosphère en aérosols au-dessus de ces localités. Ces particules, encore appelées aérosols grossiers (ou aérosols du mode grossier), sont issues de la poussière minérale très probablement en provenance du désert de Sahara. Il faut noter la contribution des aérosols marins dans le mode grossier, surtout au niveau de la station de Cap-Vert dans l'Océan Atlantique. Signalons qu'au mode grossier, il y a les cas des très grosses particules (particules géantes) issues surtout de la poussière minérale au niveau des cinq stations photométriques, à savoir les stations d'Agoufou, de Banizoumbou, de Cap-Vert, de Dakar et d'IER_Cinzana. De plus, les variations des moyennes journalières de $\alpha_{440-870}$ en fonction de celles de l'épaisseur optique τ_{440} sont caractérisées aussi par des valeurs considérables de ces deux paramètres optiques. Ce qui indique ainsi la contribution dans le contenu atmosphérique en aérosols, des particules issues des activités anthropiques, activités liées surtout aux feux de biomasse et d'autres secteurs, comme le transport et l'agriculture dans les localités considérées. Ces particules issues des activités anthropiques sont encore appelées les aérosols d'accumulation (ou aérosols du mode d'accumulation).

La contribution des aérosols d'accumulation est très significative dans la station d'Ilorin. Ce qui peut suggérer leur prédominance dans cette localité. Rappelons qu'à la présence considérable des particules d'accumulation dans la colonne atmosphérique au-dessus de ladite localité, est associée la contribution des aérosols du mode grossier (aérosols de poussière minérale ou aérosols de sel marin). Pour l'ensemble des six stations photométriques, le contenu atmosphérique est constitué d'une mixture d'aérosols des deux modes (mode d'accumulation et mode grossier). C'est surtout les aérosols du mode grossier qui sont prédominants au niveau des stations d'Agoufou, de Banizoumbou, de Cap-Vert, de Dakar et d'IER_Cinzana, tandis que la station d'Ilorin semble être marquée par la prédominance des aérosols du mode d'accumulation. Ceci peut s'expliquer par les situations géographiques respectives de ces localités et les régimes des vents localement générés.

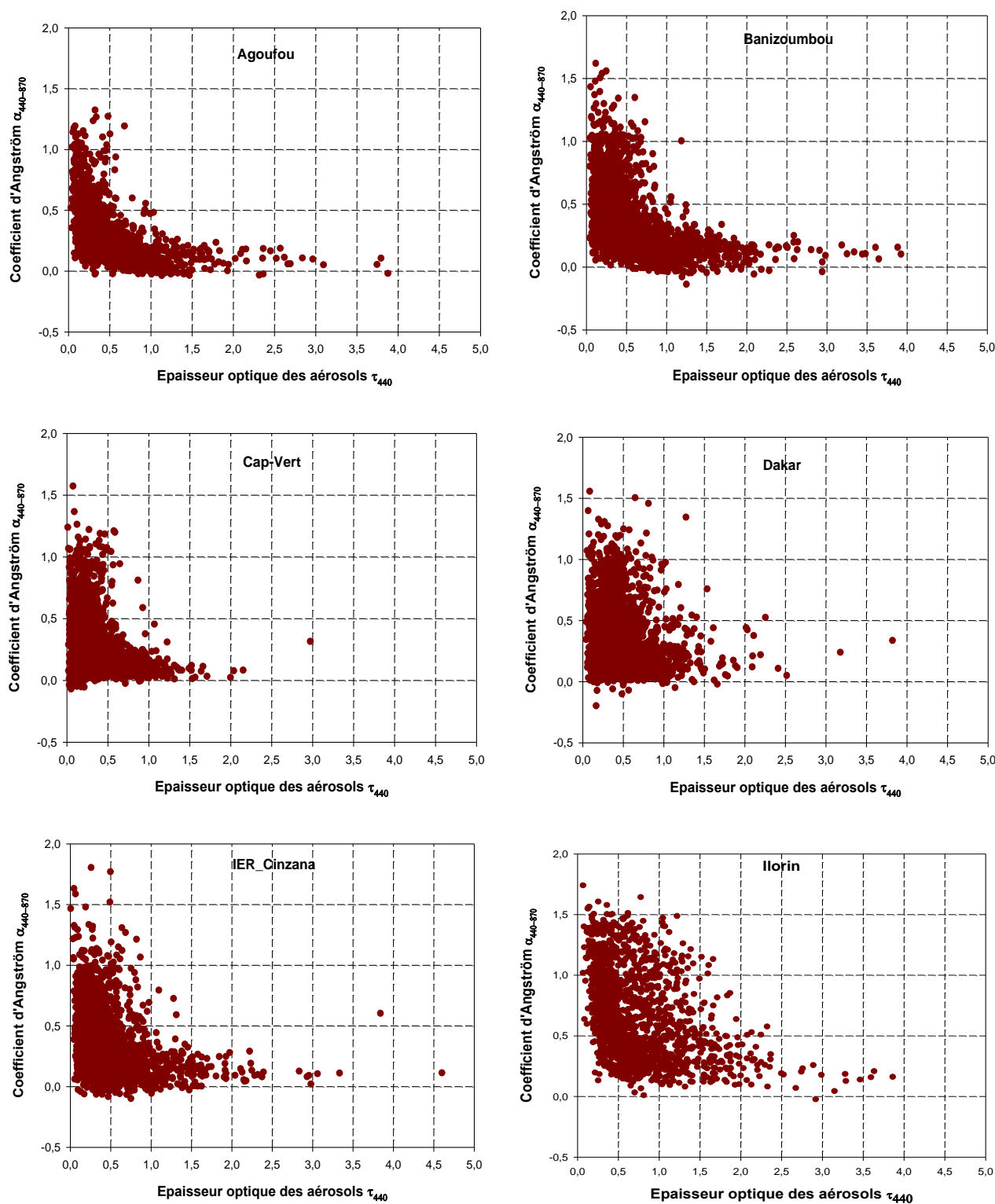


Figure 5 : Variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ en fonction de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} de différentes stations photométriques solaires.

4.3. Variations des moyennes mensuelles des paramètres optiques des aérosols

4.3.1. Variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols : Les variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} avec leurs déviations standard respectives de différentes stations photométriques sont représentées sur la figure 6 ci-dessous. Les variabilités enregistrées au niveau des six stations

photométriques ont été considérées à partir des valeurs des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} et de celles de leurs déviations standard respectives.

Pour la station d'Agoufou, les variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique τ_{440} des aérosols durant la période (2004-2009) présentent de variabilités d'un mois à un autre mois. Les mois de mars, d'avril, de mai et surtout les mois de juin et de juillet correspondent à des valeurs plus élevées de τ_{440} ($\tau_{440} \geq 0,6$). Les mois de janvier, de février, d'août, de septembre et d'octobre présentent des valeurs de τ_{440} encore élevées ($0,4 \leq \tau_{440} < 0,6$). Les mois de novembre et de décembre correspondent aux valeurs de τ_{440} moins élevées ($0,2 < \tau_{440} < 0,4$).

Pour la station de Banizoumbou, les variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique τ_{440} pendant la période (2002-2011) présentent de variabilités considérables d'un mois à un autre mois. Encore, les mois de mars, d'avril, de mai et de juin correspondent aux valeurs plus élevées de τ_{440} ($\tau_{440} \geq 0$). Les mois de janvier, de février, d'octobre et de novembre présentent des valeurs élevées de τ_{440} ($0,4 \leq \tau_{440} < 0,6$). Les mois d'août et de décembre correspondent aux valeurs moins élevées de τ_{440} ($0,2 \leq \tau_{440} < 0,4$). Pour la station de Cap-Vert, les variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique présentent aussi de variabilités d'un mois à un autre durant la période d'étude (2000-2011).

Les mois de mai, de juin, de juillet, d'août et de septembre correspondent aux valeurs plus élevées de τ_{440} ($0,4 \leq \tau_{440} < 0,6$). Les mois de mars et d'octobre présentent des valeurs élevées de τ_{440} ($0,2 < \tau_{440} < 0,4$). Les mois de janvier, de février, de novembre et de décembre correspondent aux valeurs de τ_{440} les moins élevées ($0,2 \leq \tau_{440} < 0,3$). Pour la station de Dakar, les moyennes mensuelles de l'épaisseur optique τ_{440} présentent de variabilités considérables durant la période d'étude considérée (2003-2011). Les mois de juin et de juillet présentent des valeurs de τ_{440} les plus élevées ($\tau_{440} \geq 0,6$).

Les mois de mars, d'avril et de mai correspondent aux valeurs élevées de τ_{440} ($0,4 \leq \tau_{440} < 0,6$). Les mois de janvier, de février, d'août, de septembre, de novembre et de décembre présentent les valeurs de τ_{440} les moins élevées ($0,2 < \tau_{440} < 0,4$). Pour la station d'IER_Cinzana, les variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique pendant la période considérée (2004-2011) présentent de larges variabilités d'un mois à un autre mois. Les mois de mars, d'avril, de mai et de juin correspondent à des valeurs plus élevées de τ_{440} ($0,6 \leq \tau_{440} < 0,9$).

Les mois de janvier, de février, de juillet et d'octobre présentent des valeurs de τ_{440} les moins élevées ($0,4 \leq \tau_{440} < 0,6$). Les mois d'août, de septembre, de novembre et de décembre correspondent aux valeurs les moins élevées de τ_{440} ($0,2 \leq \tau_{440} < 0,4$). Pour la station d'Ilorin, les variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique pendant la période considérée (2005-2012) présentent de larges variabilités d'un mois à un autre mois. Les mois de janvier, de février, de mars, d'avril, de novembre et de décembre correspondent aux valeurs plus élevées de τ_{440} ($0,6 \leq \tau_{440} < 0,8$). Les mois de mai, de juin, de juillet, d'août, de septembre et d'octobre présentent des valeurs de τ_{440} les moins élevées ($0,4 \leq \tau_{440} < 0,6$).

En Afrique de l'Ouest, de janvier à juin, et d'octobre à décembre la région est marquée par la présence du vent harmattan qui peut provoquer le soulèvement, le transport et l'émission d'énormes quantités de poussière minérale dans l'atmosphère. Pendant les périodes pluvieuses, plus précisément de juin à octobre, une large partie de la région est marquée par la présence de la mousson. Lorsque la mousson se déchaîne, d'énormes quantités d'aérosols peuvent être émises dans l'atmosphère et en même temps elles peuvent être éliminées par lavage. Ces deux phénomènes climatiques successifs influencent beaucoup sur les quantités d'aérosols présentes dans l'atmosphère au-dessus de la région. De plus, nous pouvons ajouter la contribution des activités menées dans les différentes localités de la région, surtout celles liées aux feux de biomasse, au transport et à l'agriculture. Tous ceux-ci peuvent être les causes des variabilités enregistrées au niveau des six stations photométriques considérées.

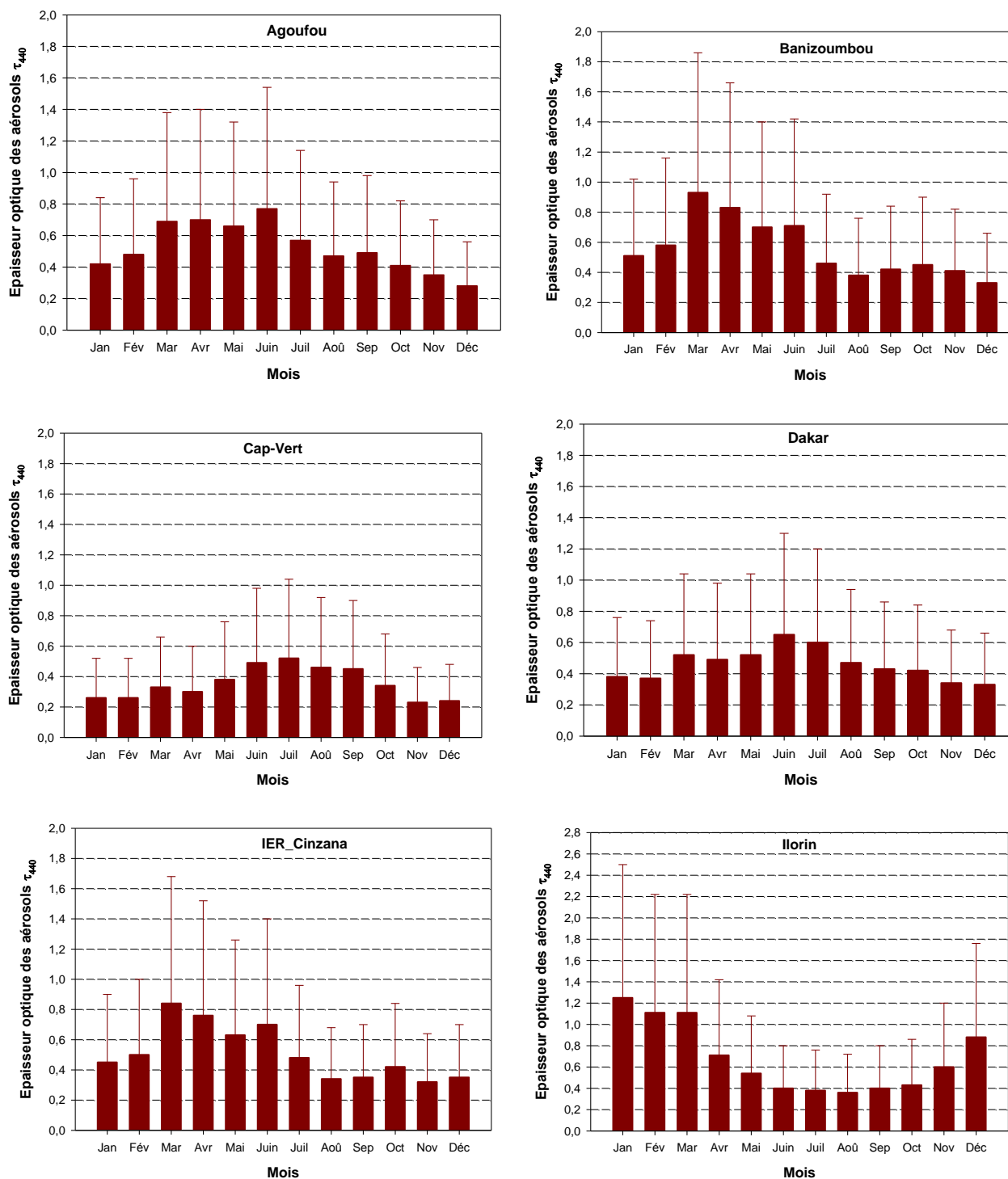


Figure 6 : Variations des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{440} de différentes stations photométriques solaires.

4.3.2. Variations des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$: Les variations des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ avec leurs déviations standard de différentes stations photométriques considérées sont représentées sur la figure 7. Ci-dessous. Les variabilités enregistrées au niveau des six stations photométriques ont été considérées à partir des valeurs des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ et de celles de leurs déviations standard respectives.

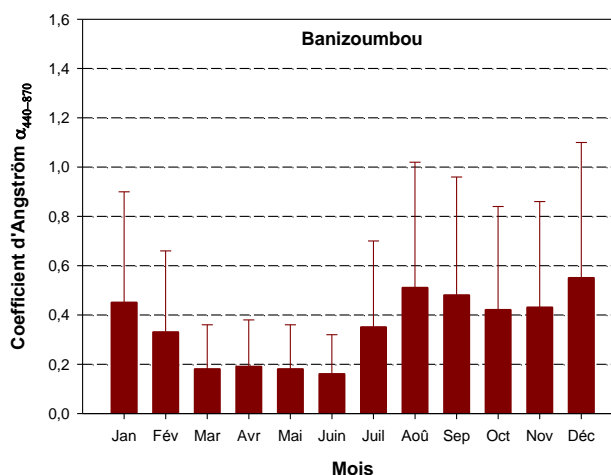
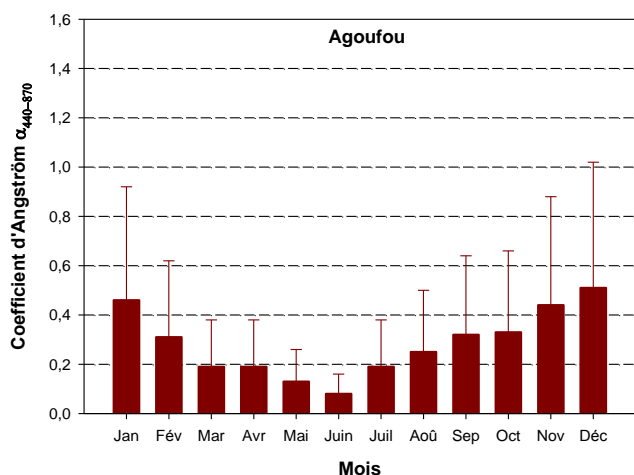
Pour la station d'Agoufou, durant la période d'étude considérée (2004-2009), les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ présentent de larges variabilités, faisant l'allure une tendance descendante de janvier à juin et une tendance ascendante de juin à décembre. Les mois de janvier, de novembre et de décembre correspondent aux valeurs

de $\alpha_{440-870}$ les plus élevées ($0,4 \leq \alpha_{440-870} < 0,6$). Les mois de février, de septembre, d'octobre présentent des valeurs élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,2 < \alpha_{440-870} < 0,4$). Les mois de mars, d'avril, de mai, de juillet correspondent aux valeurs moins élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,1 < \alpha_{440-870} < 0,2$). Le mois de juin correspond à la valeur la plus faible de $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} \sim 0,1$).

Pour la station de Banizoumbou, les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ indiquent des variabilités considérables durant la période d'étude (2002-2011). Les mois de janvier, d'août, de septembre, d'octobre, de novembre, de décembre correspondent aux valeurs plus élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,4 \leq \alpha_{440-870} < 0,6$). Les mois de février et de juillet présentent des valeurs moins élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,2 < \alpha_{440-870} < 0,4$). Les mois de mars, d'avril, de mai et de juin présentent des valeurs plus faibles ($0,0 < \alpha_{440-870} \leq 0,2$). Pour la station de Cap-Vert, durant la période d'étude considérée (200-2011), les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ indiquent des variabilités considérables.

Les mois de novembre, de décembre correspondent aux valeurs plus élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,4 \leq \alpha_{440-870} < 0,6$). Les mois de janvier, de février, de mars, d'avril, de mai et d'octobre ont des valeurs moins élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,2 \leq \alpha_{440-870} < 0,4$). Les mois de juin, de juillet, d'août et de septembre présentent des valeurs plus faibles de $\alpha_{440-870}$ ($0,0 < \alpha_{440-870} \leq 0,2$). Pour la station de Dakar, les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ indiquent des variabilités aussi considérables durant la période d'étude considérée (2003-2011). L'allure des variations des moyennes mensuelles est similaire à celle de la station d'Agoufou. Les mois de janvier, de février, de novembre et de décembre ont des valeurs plus élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,4 \leq \alpha_{440-870} < 0,6$). Les mois de mars, d'avril, de mai, de juillet, d'août, de septembre et d'octobre présentent des valeurs moins élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,2 < \alpha_{440-870} < 0,4$). Encore comme la station d'Agoufou, le mois de juin correspond à la valeur la plus faible de ($\alpha_{440-870} \sim 0,2$). Pour la station d'IER_Cinzana, les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ indiquent de larges variabilités durant la période d'étude considérée (2004- 2011). Les mois de janvier, de juillet, d'août, de novembre et de décembre ont des valeurs plus élevées de ($0,4 \leq \alpha_{440-870} < 0,6$) ; Les mois de février, de mars, d'avril, de mai, de juillet, d'octobre présentent des valeurs moins élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,2 \leq \alpha_{440-870} < 0,4$).

Le mois de juin a la valeur la plus faible de ($\alpha_{440-870} \sim 0,2$). Pour la station d'Ilorin, durant la période d'étude considérée (2005-2012), les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ indiquent aussi de très larges variabilités avec des valeurs importantes. Les mois de janvier, de juillet, d'août, de septembre, de décembre présentent des valeurs plus élevées de ($0,8 \leq \alpha_{440-870} < 1,2$). Les mois de février, de juin, d'octobre, de novembre ont des valeurs élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,4 \leq \alpha_{440-870} < 0,8$). Les mois de mars, d'avril, de mai correspondent aux valeurs moins élevées de $\alpha_{440-870}$ ($0,2 < \alpha_{440-870} < 0,4$).



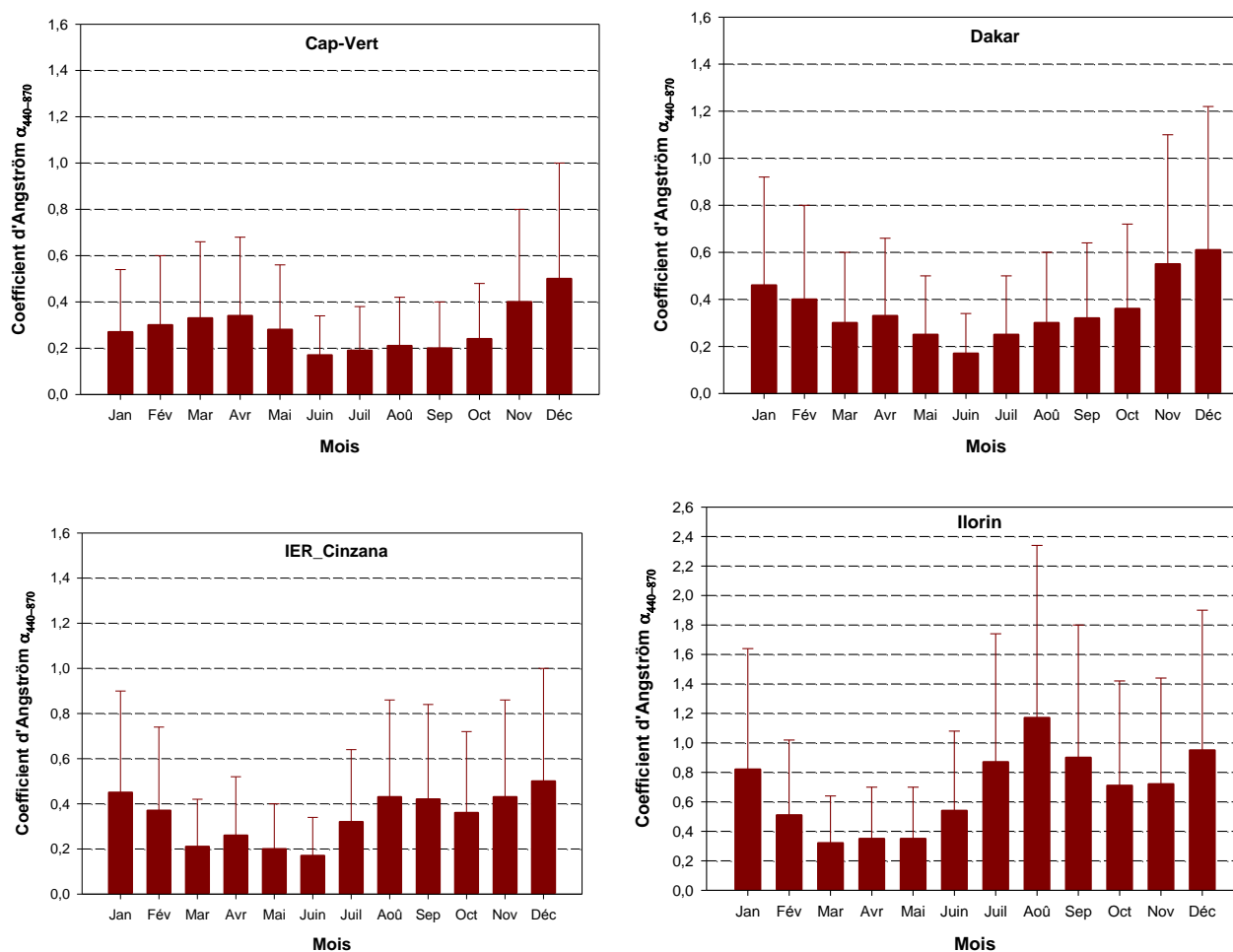


Figure 7 : Variations des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ de différentes stations photométriques solaires.

4.5. Tableaux des données annuelles et des périodes des six stations photométriques

Les tableaux ci-dessous portent les valeurs des moyennes annuelles et celles des périodes des six stations photométriques. Les paramètres considérés sont les deux paramètres optiques (épaisseur optique des aérosols τ_{440} et coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$), leurs déviations standard, et de plus les nombres de jours N_{jours} et de mois N_{mois} correspondants aux données de ces stations photométriques considérées.

Pour la station d'Agoufou, les moyennes annuelles de l'épaisseur optique τ_{440} varient de $0,4 \pm 0,20$ à $0,60 \pm 0,34$ durant la période d'étude (2003-2009). La moyenne sur la période est $\tau_{440} = 0,52 \pm 0,30$. Les moyennes annuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ varient de $0,25 \pm 0,25$ à $0,36 \pm 0,17$ durant la période d'étude considérée. La moyenne sur la période d'étude est $\alpha_{440-870} = 0,30 \pm 0,15$. Pour la station de Banizoumbou, les moyennes annuelles de l'épaisseur optique τ_{440} varient de $0,50 \pm 0,28$ à $0,62 \pm 0,43$ durant la période d'étude (2002-2011). La moyenne sur la période d'étude est $\tau_{440} = 0,56 \pm 0,31$. Les moyennes annuelles du paramètre optique $\alpha_{440-870}$ varient de $0,32 \pm 0,17$ à $0,44 \pm 0,19$ durant la période d'étude considérée. La moyenne correspondant à la période d'étude est $\alpha_{440-870} = 0,35 \pm 0,17$. Pour la station de Cap-Vert, les moyennes annuelles de l'épaisseur optique τ_{440} varient de $0,29 \pm 0,16$ à $0,38 \pm 0,24$ durant la période d'étude (2000-2011). La moyenne de la période d'étude est $\tau_{440} = 0,34 \pm 0,20$. Les moyennes annuelles du coefficient d'angström $\alpha_{440-870}$ varient de $0,22 \pm 0,15$ à $0,35 \pm 0,10$ durant la période d'étude considérée. La moyenne correspondant à la période d'étude est $\alpha_{440-870} = 0,28 \pm 0,16$. Pour la station de Dakar, les moyennes annuelles du paramètre optique τ_{440} varient de $0,39 \pm 0,20$ à $0,52 \pm 0,29$ durant la période d'étude considérée (2003-2011). La moyenne correspondant à cette période d'étude est $\tau_{440} = 0,47 \pm 0,23$. Les moyennes annuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ varient de $0,30 \pm 0,17$ à $0,35 \pm 0,10$ durant la période d'étude considérée. La moyenne correspondant à la période d'étude est $\alpha_{440-870} = 0,35 \pm 0,18$. Pour la station d'IER_Cinzana, durant la période d'étude considérée (2004-2011), les moyennes annuelles de l'épaisseur optique $\tau_{440} = 0,43 \pm 0,21$ à $0,60 \pm 0,36$. La moyenne

correspondante à la période d'étude considérée est $\tau_{440} = 0,50 \pm 0,26$. Les moyennes annuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ varient, durant la période d'étude considérée, de $0,30 \pm 0,17$ à $0,42 \pm 0,24$. La moyenne de la période d'étude est $\alpha_{440-870} = 0,35 \pm 0,20$. Pour la station d'Ilorin, durant la période d'étude considérée (2005-2012), les moyennes annuelles du paramètre optique τ_{440} varient de $0,65 \pm 0,20$ à $0,72 \pm 0,32$. La moyenne correspondante à la période d'étude est $\tau_{440} = 0,68 \pm 0,27$. Les moyennes annuelles du coefficient d'Angström varient de $0,67 \pm (0,22 + 0,26 + 0,23)/3$ à $0,77 \pm 0,21$ durant la période d'étude considérée. La moyenne de la période d'étude est $\alpha_{440-870} = 0,69 \pm 0,24$.

Tableau 1 : Valeurs des moyennes annuelles des deux paramètres optiques, celles de leurs déviations standard et les nombres de jours et de mois de données de la station Agoufou durant la période 2003-2009.

Station Agoufou						
Années	τ_{440}	$\sigma_{\tau_{440}}$	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	N _{jours}	N _{mois}
2003	0,43	$\pm 0,20$	0,36	$\pm 0,17$	92	04
2004	0,57	$\pm 0,34$	0,28	$\pm 0,14$	316	12
2005	0,56	$\pm 0,27$	0,25	$\pm 0,13$	286	12
2006	0,50	$\pm 0,31$	0,32	$\pm 0,16$	307	12
2007	0,53	$\pm 0,34$	0,28	$\pm 0,16$	302	12
2008	0,46	$\pm 0,28$	0,28	$\pm 0,16$	333	12
2009	0,60	$\pm 0,34$	0,27	$\pm 0,14$	139	06
Période 2003-2009	0,52	$\pm 0,30$	0,30	$\pm 0,15$	1775	70

Tableau 2 : Valeurs des moyennes annuelles des deux paramètres optiques, celles de leurs déviations standard et les nombres de jours et de mois de données de la station Banizoumbou durant la période 2003-2011.

Station Banizoumbou						
Années	τ_{440}	$\sigma_{\tau_{440}}$	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	N _{jours}	N _{mois}
2002	0,52	$\pm 0,26$	0,44	$\pm 0,19$	264	12
2003	0,50	$\pm 0,28$	0,40	$\pm 0,18$	288	12
2004	0,61	$\pm 0,29$	0,34	$\pm 0,17$	325	12
2005	0,61	$\pm 0,30$	0,33	$\pm 0,15$	344	12
2006	0,56	$\pm 0,33$	0,37	$\pm 0,17$	333	12
2007	0,62	$\pm 0,43$	0,32	$\pm 0,18$	338	12
2008	0,51	$\pm 0,27$	0,35	$\pm 0,17$	345	12
2009	0,55	$\pm 0,34$	0,32	$\pm 0,17$	302	12
2010	0,58	$\pm 0,32$	0,30	$\pm 0,17$	321	12
2011	0,57	$\pm 0,27$	0,31	$\pm 0,18$	218	08
Période 2002-2011	0,56	$\pm 0,31$	0,35	$\pm 0,17$	3078	116

Tableau 3 : Valeurs des moyennes annuelles des deux paramètres optiques, celles de leurs déviations standard et les nombres de jours et de mois de données de la station Cap-Vert durant la période 2000-2011.

Station Cap-Vert						
Années	τ_{440}	$\sigma_{\tau_{440}}$	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	N _{jours}	N _{mois}
2000	0,37	$\pm 0,27$	0,26	$\pm 0,14$	262	12
2001	0,33	$\pm 0,15$	0,33	$\pm 0,16$	290	12
2002	0,35	$\pm 0,17$	0,28	$\pm 0,18$	260	12
2003	0,37	$\pm 0,25$	0,28	$\pm 0,19$	259	12
2004	0,32	$\pm 0,25$	0,27	$\pm 0,19$	70	04
2005	0,37	$\pm 0,21$	0,34	$\pm 0,16$	275	12
2006	0,35	$\pm 0,15$	0,32	$\pm 0,17$	187	09
2007	0,37	$\pm 0,17$	0,30	$\pm 0,15$	271	12
2008	0,38	$\pm 0,24$	0,22	$\pm 0,12$	274	12
2009	0,29	$\pm 0,16$	0,27	$\pm 0,16$	286	12
2010	0,37	$\pm 0,24$	0,23	$\pm 0,15$	294	12
2011	0,30	$\pm 0,14$	0,35	$\pm 0,1$	199	10
Période 2000-2011	0,34	$\pm 0,20$	0,28	$\pm 0,16$	2927	131

Tableau 4 : Valeurs des moyennes annuelles des deux paramètres optiques, celles de leurs déviations standard et les nombres de jours et de mois de données de la station Dakar durant la période 2003-2011.

Station Dakar						
Années	τ_{440}	$\sigma_{\tau_{440}}$	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	N_{jours}	N_{mois}
2003	0,52	$\pm 0,29$	0,35	$\pm 0,24$	172	08
2004	0,47	$\pm 0,21$	0,40	$\pm 0,18$	301	12
2005	0,50	$\pm 0,24$	0,38	$\pm 0,18$	310	12
2006	0,46	$\pm 0,25$	0,39	$\pm 0,21$	325	12
2007	0,48	$\pm 0,22$	0,30	$\pm 0,17$	321	12
2008	0,43	$\pm 0,19$	0,32	$\pm 0,14$	285	12
2009	0,39	$\pm 0,20$	0,33	$\pm 0,18$	252	10
2010	0,51	$\pm 0,28$	0,34	$\pm 0,17$	267	12
2011	0,49	$\pm 0,21$	0,38	$\pm 0,20$	283	12
Période 2003-2011	0,47	$\pm 0,23$	0,35	$\pm 0,18$	2518	102

Tableau 5 : Valeurs des moyennes annuelles des deux paramètres optiques, celles de leurs déviations standard et les nombres de jours et de mois de données de la station IER_Cinzana durant la période 2004-2011.

Station IER_Cinzana						
Années	τ_{440}	$\sigma_{\tau_{440}}$	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	N_{jours}	N_{mois}
2004	0,43	$\pm 0,21$	0,42	$\pm 0,24$	195	07
2005	0,52	$\pm 0,26$	0,34	$\pm 0,19$	342	12
2006	0,47	$\pm 0,26$	0,40	$\pm 0,20$	300	12
2007	0,52	$\pm 0,33$	0,36	$\pm 0,21$	336	12
2008	0,46	$\pm 0,22$	0,34	$\pm 0,17$	343	12
2009	0,50	$\pm 0,21$	0,37	$\pm 0,20$	300	12
2010	0,60	$\pm 0,36$	0,30	$\pm 0,17$	334	12
2011	0,48	$\pm 0,24$	0,32	$\pm 0,23$	339	12
Période 2004-2011	0,50	$\pm 0,26$	0,35	$\pm 0,20$	2489	91

Tableau 6 : Valeurs des moyennes annuelles des deux paramètres optiques, celles de leurs déviations standard et les nombres de jours et de mois de données de la station Ilorin durant la période 2005-2012.

Station Ilorin						
Années	τ_{440}	$\sigma_{\tau_{440}}$	$\alpha_{440-870}$	$\sigma_{\alpha_{440-870}}$	N_{jours}	N_{mois}
2005	0,67	$\pm 0,24$	0,67	$\pm 0,22$	266	12
2006	0,70	$\pm 0,34$	0,68	$\pm 0,27$	271	12
2007	0,72	$\pm 0,32$	0,67	$\pm 0,26$	300	12
2008	0,69	$\pm 0,30$	0,67	$\pm 0,23$	216	10
2009	0,66	$\pm 0,26$	0,70	$\pm 0,26$	178	11
2010
2011	0,65	$\pm 0,20$	0,77	$\pm 0,21$	89	04
2012	0,67	$\pm 0,28$	0,71	$\pm 0,23$	249	12
Période 2005-2012	0,68	$\pm 0,27$	0,69	$\pm 0,24$	1569	73

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude, portée sur la caractérisation de types d'aérosols atmosphérique en Afrique de l'Ouest, indiquent que les moyennes journalières, mensuelles, voire annuelles, des deux paramètres optiques τ_{440} et $\alpha_{440-870}$ pour l'ensemble des six stations photométriques considérées, présentent de variabilités considérables de station en station. Notons que ces variabilités observées peuvent être liées aux situations géographiques et environnementales des localités des six stations photométriques, aux régimes des vents localement générés en ces zones et aussi à l'intensification et à la

fréquence de certaines activités humaines menées, qui sont sources de production des aérosols. De plus, les résultats indiquent aussi que l'atmosphère au-dessus des zones d'étude est formée d'une mixture d'aérosols du mode grossier et du mode d'accumulation. Ce qui suggère que l'atmosphère au-dessus de la région ouest-africaine est constituée d'une mixture d'aérosols de deux modes (mode grossier et mode d'accumulation). Cette mixture d'aérosols est marquée par la prédominance des aérosols grossiers partout dans ces localités ouest-africaines, sauf à Ilorin où la présence des aérosols d'accumulation est beaucoup plus significative. Rappelons que les aérosols du mode grossier, ou aérosols grossiers proviennent de la poussière minérale, surtout de la poussière désertique du Sahara transportée lors des tempêtes de sable, et du sel marin dans les zones côtières et de l'Océan Atlantique. Les aérosols du mode d'accumulation, ou aérosols d'accumulation sont issus des activités anthropiques menées dans la région, générant les aérosols. Ces activités menées sont surtout celles des feux de biomasse, le transport, l'agriculture et d'autres activités socio-économiques de la région ouest-africaine.

Remerciements et reconnaissances

Nos remerciements s'adressent aux responsables des six stations photométriques considérées en Afrique de l'Ouest, les stations d'Agoufou, de Banizoumbou, de Cap-Vert, de Dakar, d'IER_Cinzana et d'Ilorin. Ces responsables sont nommés "PersonalInvestigators P.I." et des managers de ces six stations photométriques. Nos reconnaissances s'adressent également aux responsables, PersonalInvestigators (P.I.) et managers, des stations photométriques du réseau AERONET, implantées à travers le monde. Ces responsables déploient des efforts colossaux pour maintenir les stations opérationnelles dans le monde, afin de fournir aux scientifiques et autres utilisateurs des données du réseau AERONET pour leurs différentes études et de constituer une base de données continue pour la caractérisation des aérosols atmosphériques.

6. REFERENCES

- [1] GIEC : Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse, GIEC, 2007.
- [2] Eck, T.F., B.N. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, P. Goloub, H. B. Chen, B. Chatenet, L. Gomes, X.-Y. Zhang, S.-C.Tsay, Q. Ji, D. Giles, and I. Slutsker: Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in Central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *Journal of Geophysical Research*. 2005 ; 110. D06202. doi: 10.1029/2004JD005274.
- [3] Chaâbane M.,F. Elleuch, M. Masmoudi, and K. Medhioub: Caractérisation d'un photomètre solaire conçu pour l'étude des propriétés optiques des aérosols atmosphériques, 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007.
- [4] Kambezidis H. D. and D. G. Kaskaoutis: Aerosol climatology over four AERONET sites: An overview, *Atmospheric Environment*, 2008; 42: 1892 – 1906.
- [5] Fan X.,H. Chen, P. Goloub, X. Xia, W. Zhang, and B. Chatenet: Analysis of column-integrated aerosol optical thickness in Beijing from AERONET observations. *China Particuology*. 2006; 4: 330-335.
- [6] Li J., B.E. Carlson, O. Dubovik, and A.A. Lacis : Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; 14: 12271-12289. doi: 10.51194/acp-14-2014, 2014.
- [7] J. Haywood, Overview of the Dust and Biomass-burning Experiment and African Monsoon Multidisciplinary Analysis Special Observing Period-0. *Journal of Geophysical Research*. 2008. 106(D16). doi : 10.1029/2008JD010077. Available on : URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00345814>
- [8] Shimei F.,I Chineke T.C., Nwofor O.K., Ewurum B. B., Akujor C. E.: Analysis on many-year ground based Sunphotometer (AERONET) aerosol optical properties and its similarity with satellite observations in Ilorin, Cape Verd, Agoufou and Banizoumbou in West Africa. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*. 2015; 24(7): 176-196.
- [9a] Holben B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov: AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*. 1998; 66:1-16.
- [9b] Holben B. N., D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schaffer, B. Chatenet, F. Lavenu, Y. J. Kaufman, J. V. Castle, A. Setzer, B. Markhan, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karneli, N. T. O'Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, and G. Zibordi: An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*. 2001; 106(12):067- 097.:
- [10] Ogunjobi K. O., Z. He, and C. Simmer: Spectral aerosol optical properties from AERONET Sun-photometric measurements over West Africa. *Atmospheric Research*. 2008; 88: 89–107.
- [11] Ocko I.B., and P.A. Ginoux :Comparing multiple model-derived aerosol optical properties to collocated ground-based and salittes measurement. *Atmospheric and Physics Discussions*. 2016. doi: 10.5194/acp-2016-790.
- [12] Oluleye A., Ogunjobi K.O., Bernard A., Ajayi V. O., and Akinsanola A. A.: Multiyear analysis of ground-based Sunphotometer (AERONET) aerosol optical properties and its comparison with satellite observations over West Africa. *Global Journal of Human Social Science Geography&Environmental Geosciences*. 2012; 12(10).
- [13] Gobbi G. P., Y. J. Kaufman, I. Koren, and T. F. Eck: Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007; 7: 453–458.
- [14] Kim, D., Chin, M., Yu, H., Eck, TF, Sinyuk, A., Smirnov, A. et Holben, BN: Les propriétés optiques de la poussière sur l'Afrique du Nord et la péninsule Arabique proviennent de la Ensemble de données AERONET. *Atmos. Chem. Phys*. 2011; 11(20): 10733-10741. Available on: <https://doi.org/10.5194/acp-11-10733-2011>.
- [15] Dubovik O., B.N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M.D. King, D. Tanré, and I. Slutsker: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of Atmospheric Sciences*. 2002; 59: 590 – 608.
- [16] Knippertz P., M. J. Evans, P.-R. Field, A. H. Fink, C. Lioussé, and J. H. Marsham: The possible role of local air pollution in climate change in West Africa. *Nature Climate Change*, DOI: 10.1038/NCLIMATE2727, 2015.
- [17] Yoon J., W. von Hoyningen-Huene, A. A. Kokhonorovskiy, M. Vountas, and J. P. Burrows: Trend analysis of aerosol optical thickness and Ångström exponent derived from the global AERONET spectral observations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2012; 5: 1271-1299. doi: 10.5194/amt-5-1271-2012.
- [18] Eck T.F., B.N. Holben, D. E. Ward, O. Dubovik, J. S. Reid, A. Smirnov, M. M. Mukelabai, N. C. Hsu, N. T. O'Neill, I. Slutsker: Characterization of the optical properties of biomass burning aerosols in Zambia during the 1997 ZIBBEE field campaign. *Journal of Geophysical Research*. 2001; 106(D4):3425-3448. DOI: 10.1029/2000JD900555

[19] Smirnov A., Holben B. H., Kaufman Y. J., Dubovik O., Eck T. F., Slutsker I., Pietras C., and R. N. Halthore : Optical Properties of Atmospheric Aerosol in Maritime Environments. *Journal Of The Atmospheric Sciences*. 2002; 59(1).

[20] Prats, N., VE Cachorro, A. Berjon, C. Toledano et AM De Frutos (2011), Propriétés microphysiques des aérosols à colonne intégrée d'AERONET Photomètre solaire au sud-ouest de l'Espagne. *Atmos. Chem. Phys.* 2011; 11(24), 12 535-12 574, doi: 10,5194 / acp-11-12535-2011.



Cite this article: Cheick Diarra, Adama Habib Coulibaly, and Mody Sow. CARACTERISATION DE TYPES D'AEROSOLS ATMOSPHERIQUES PAR L'ANALYSE DE DONNEES PHOTOMETRIQUES DU RESEAU AERONET EN AFRIQUE DE L'OUEST. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2019; 8(2): 34-52.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>