

Analyse des paramètres optiques des aérosols atmosphériques, de leur distribution et de leur albédo de diffusion par les mesures photométriques au Mali

Cheick DIARRA* et Abdramane BA

Laboratoire de Spectroscopie Optique et de Sciences de l'Atmosphère - Département de Physique, Faculté des Sciences et Techniques (FST) - Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTTB), BP : E3206 Bamako, Mali

* Correspondance, courriel : cheick_boua@yahoo.fr

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse des paramètres optiques des aérosols atmosphériques, de leur distribution en taille et de leur albédo de diffusion simple à l'échelle locale de deux stations photométriques solaires, Agoufou et IER_Cinzana, du réseau mondial AERONET au Mali. Les résultats indiquent que les valeurs plus élevées des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$) correspondent aux plus faibles valeurs de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} ($0,0 < \tau_{a500} < 0,5$) et vice versa ($\alpha_{440-870} < 0,5$ pour $0,0 < \tau_{a500} < 4,0$). Ce qui indique la prédominance de la poussière minérale au-dessus des localités. Les fréquences de distribution des paramètres optiques des aérosols et la distribution en taille des aérosols, $dV/d\ln r$ (en $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$), montrent que l'atmosphère au-dessus des deux localités, est caractérisée par une mixture d'aérosols grossiers prédominants et d'aérosols fins. Les valeurs enregistrées de l'albédo de diffusion simple ω_0 (sans unité) des aérosols localement existants indiquent qu'ils diffusent beaucoup plus les rayonnements solaire et terrestre qu'ils n'en absorbent.

Mots-clés : *aérosols atmosphériques, AERONET, EOA, coefficient d'Angström, distribution en taille, albédo de diffusion simple, poussière minérale, feux de biomasse.*

Abstract

Analysis of optical parameters of atmospheric aerosols, their distribution and their scattering albedo by photometric measurements in Mali

This study takes on the analysis of optical parameters of atmospheric aerosols, their size distribution and their single scattering albedo at the local scale of two solar photometric sites, Agoufou and IER_Cinzana, of the worldwide network AERONET in Mali. The results indicate that the high values of the daily averages of Angström coefficient $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$) correspond to the lower values of aerosol optical thickness τ_{a500} ($0,0 < \tau_{a500} < 0,5$) and vice versa ($\alpha_{440-870} < 0,5$ for $0,0 < \tau_{a500} < 4,0$). That indicates the predominance of mineral dust over the locations. The frequencies of distribution of aerosol optical parameters and the aerosol size distribution $dV/d\ln r$ (in $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) show that the atmosphere over the two locations is characterized by a mixture of both predominant coarse aerosols and fine aerosols.

Cheick DIARRA et Abdramane BA

The registered values of single scattering albedo ω_0 (without unity) of locally existent aerosols indicate that they scatter a lot the solar and terrestrial radiations that they don't absorb them.

Keywords : *atmospheric aerosols, AERONET, AOT, Angström coefficient, size distribution, single scattering albedo, mineral dust, biomass burning.*

1. Introduction

Les aérosols atmosphériques représentent l'ensemble des particules solides et liquides en suspension dans l'atmosphère, dont la taille varie généralement de 0.01 μm à 100 μm (millionième de mètre) et qui y séjournent plusieurs heures au moins. Les aérosols peuvent être d'origine naturelle ou anthropique (aérosols issus des activités humaines). Ils peuvent influencer sur le climat de diverses façons : directement par diffusion ou par absorption du rayonnement et indirectement en agissant comme noyaux de condensation pour la formation des nuages ou en modifiant les propriétés optiques et la durée de vie des nuages [1]. Les aérosols atmosphériques sont des particules submillimétriques présentant une large variété de taille et de composition chimique. Leur concentration dépend fortement de la situation géographique, des conditions météorologiques et environnementales [2]. 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 [3].

Les concentrations des aérosols et leurs propriétés optiques sont l'une des larges sources d'incertitude dans les récentes évaluations et les prévisions du changement climatique global [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, la télédétection au sol la télédétection satellitaire et la modélisation du transport des aérosols. 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 [3]. Durant les deux dernières décennies, les campagnes et champs de mesures considérables utilisant les détections des satellites, les instruments aéroportés et au sol ont conduit à des connaissances scientifiques significatives sur les propriétés globales des aérosols et leur distribution. Les instruments (les radiomètres sun-sky) basées 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 [3].

Un réseau mondial des radiomètres sun-sky, encore appelés les photomètres solaires, nommé Aerosol Robotic Network (AERONET) a été établi par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) à travers le programme Photométrie de Traitement Opérationnel pour la Normalisation Satellitaire (PHOTONS). Le réseau est considérablement augmenté par des différentes collaborations des agences nationales, des instituts, des universités, des scientifiques et des associés à travers le monde. 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, de valider les données obtenues des observations satellitaires. Il produit des données sur les propriétés des aérosols qui sont l'épaisseur optique des aérosols EOA, en anglais Aerosol Optical thickness AOT ou Aerosol Optical Depth AOD ; le coefficient d'Angström encore appelé le coefficient de taille ; 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 de la radiation solaire directement transmise et des produits d'inversion [5]. L'épaisseur optique des aérosols EOA, notée $\tau_{a, \lambda}$ et le coefficient d'Angström, noté α , sont les paramètres clés pour l'étude de la climatologie des aérosols. Le paramètre EOA, obtenu à partir des données de l'irradiance directement transmise, mesurée par les photomètres solaires 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 et ses variations [3]. Des études récentes ont montré que les applications utiles des mesures du coefficient d'Angström α pour la caractérisation des propriétés physiques et radiatives des aérosols [6]. Les valeurs du coefficient d'Angström α proches de zéro sont associées au large chargement de grosses particules, comme celles de la poussière désertique sahélienne et saharienne avec de grandes épaisseurs optiques. Alors que les valeurs de α , proches de 2,0 et plus, indiquent que la population des aérosols correspond à celle des particules fines [6]. La distribution en taille détermine le nombre de particules ayant le même rayon et présente les différents modes d'aérosols contenus dans une colonne atmosphérique, qui sont : le mode de nucléation (ou mode d'Aitken) de rayon compris entre 0,01 μm et 0,1 μm ; le mode d'accumulation de rayon compris entre 0,1 μm et 1 μm ; le mode grossier de rayon compris entre 1 μm et 100 μm . Les deux premiers modes (mode de nucléation et mode d'accumulation) constituent les aérosols fins et le mode grossier correspond aux grosses particules, voire des particules géantes. L'albédo de diffusion simple est un paramètre clef pour évaluer les effets radiatifs des aérosols [7].

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 au Nord, qui est la plus large source de poussière dans le monde et vers le Sud, 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 [5]. 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 croissante rapide des populations et des activités économiques, sont associées des quantités de combustibles fossiles. Le climat de l'Afrique de l'Ouest est reparti principalement en deux saisons, une saison sèche et une saison pluvieuse. Ce climat est caractérisé par les annonces des contrastes saisonniers régulés par la zone de convergence intertropicale (ZCIT). La ZCIT se manifeste à la surface par la zone de transition entre l'air sec et l'air humide des régions équatoriales [5], appelé le front intertropical (FIT). 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.

2. Matériel et méthodes

2-1. Description géographique des stations

Cette étude présente les résultats d'analyse des données photométriques de quelques années des deux stations photométriques solaires Agoufou et IER_Cinzana, implantées au Mali. Les deux stations photométriques sont du réseau mondial AERONET dont la partie française nommée PHOTONS (PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire), s'occupe des deux stations et d'autres

stations photométriques solaires en Afrique de l'Ouest, telles que les stations photométriques solaires Banizoumbou (Niger), Dakar (Sénégal), Djougou (Benin), Ouagadougou (Burkina Faso). Le programme PHOTONS est développé par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (France). Les périodes d'études sont : de janvier 2004 à juin 2009 pour la station Agoufou ; de juin 2004 à décembre 2009 pour la station d'IER_Cinzana. Les coordonnées géographiques des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana sont ainsi données. La station d'Agoufou ($15,34540^{\circ}$ N ; $1,47912^{\circ}$ O ; 305,0 m d'élévation) 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 (*Figure 1a*). La station d'IER_Cinzana ($13,27843^{\circ}$ N ; $5,93387^{\circ}$ 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 (*Figure 1b*).



Figure 1 : Photos des deux stations photométriques du réseau mondial AERONET, implantées au Mali Agoufou (*Figure 1a*) et IER_Cinzana (*Figure 1b*).

2-2. Instrumentation

Les données considérées dans cette étude sont des mesures effectuées par des radiomètres 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 [9]. Ces instruments de télédétection au sol sont décrits en détail dans les travaux de Holben et al. [1998], ainsi que brièvement dans d'autres études. Les instruments installés dans les deux stations sont les photomètres solaires de type CIMEL C-318, implantés en campagne et dont une description est donnée ci-après. En version automatique, le photomètre solaire CIMEL C-318 installé sur site en campagne est doté d'un panneau solaire et de batteries rechargeables, ce qui lui confère une autonomie complète (*Figures 1a et 1b*). Il est équipé d'un robot et deux axes permettant dans les plans zénithaux et azimutaux. Les radiomètres "Sun-Sky" 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. Une série de mesures nécessite 8 à 10 secondes et les mesures sont prises en triplet à des intervalles de 30 secondes [2]. 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 [8].

2-3. Méthodologie

Dans cette étude, les données sont obtenues à partir des mesures de deux stations photométriques solaires, la station Agoufou et la station IER_Cinzana, implantées au Mali. Les deux stations sont du réseau mondial AERONET. Les données considérées représentent les paramètres optiques des aérosols, l'épaisseur optique des aérosols $\tau_{0.500}$ et le coefficient d'Angström α ; la distribution en taille des aérosols ; l'albédo de

diffusion simple des aérosols. Les données sont disponibles sur le site web du réseau (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Elles sont du niveau 2,0 (données de qualité assurée, c'est dire que, données automatiquement traitées en éliminant les cas des nuages, puis manuellement inspectées) de la Version 2 de l'algorithme "Direct Sun Algorithm" et de son inversion. Les données disponibles d'EOA pour les deux stations sont automatiquement fournies suivant les longueurs d'onde standard du réseau AERONET : 440, 675, 870 et 1020 nm. 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 consistantes dans la bande spectrale 440-870 nm que les autres et sont les seules prises en compte dans cette étude.

Dans ce présent travail, les données photométriques solaires de l'EOA sont considérées suivant la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm, notée τ_{a500} . Il n'existe pas directement de données disponibles à la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm pour les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana. La distribution en taille des aérosols, notée $dV/d\ln r$ (en $\mu m^3/\mu m^2$) et leur albédo de diffusion simple, noté ω_0 (sans unité), sont des produits de l'inversion de la version 2 de l'algorithme "Direct Sun Algorithm".

Les mesures photométriques solaires de l'épaisseur optique des aérosols EOA sont utilisées pour déterminer le coefficient de turbidité atmosphérique β et le coefficient d'Angström α (ou coefficient de taille des aérosols) à partir de la formule d'Angström (1929) :

$$\tau_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

Où τ_a est l'épaisseur optique suivant la longueur d'onde λ . Ainsi, l'expression du coefficient d'Angström α est établie en éliminant le coefficient β pour deux épaisseurs optiques $\tau_a(\lambda_1)$ et $\tau_a(\lambda_2)$ aux longueurs d'onde respectives λ_1 et λ_2 et s'écrit :

$$\alpha = -\frac{d\ln\tau_a}{d\ln\lambda} = -\frac{\ln\left(\frac{\tau_a(\lambda_2)}{\tau_a(\lambda_1)}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)} \quad (2)$$

Pour obtenir les valeurs de l'épaisseur optique des aérosols EOA à la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm (τ_{a500}), nous avons procédé par interpolation logarithmique les valeurs d'EOA à $\lambda = 440$ nm (τ_{a440}) et celles d'EOA à $\lambda = 675$ nm (τ_{a675}), à partir de la formule d'Angström (1929) par élimination du coefficient β et en considérant le coefficient d'Angström α unique dans la bande spectrale 440 - 870 nm. Le choix sur la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm n'est aucunement une imposition, mais cette longueur d'onde a été beaucoup utilisée dans de nombreuses études depuis les premières campagnes d'observations au sol des aérosols atmosphériques. Par exemples, le photomètre solaire développé par Volz [1959], qui avait un filtre d'interface de 500 nm et est devenu la base de plusieurs réseaux d'observation en Europe et aux Etats-Unis ; Flowers et al. [1969] ont décrit le réseau américain du photomètre solaire de Volz, constitué de 29 stations à travers les Etats-Unis de 1961 à 1966 ; Shaw [1982] reporta 800 mesures sur l'épaisseur optique des aérosols atmosphériques à $\lambda = 500$ nm ; Holbenat al. [2001] ont utilisé les mesures de l'épaisseur optique des aérosols à $\lambda = 500$ nm pour la caractérisation des aérosols au niveau de plusieurs stations photométriques du réseau mondial AERONET ; Kambezidis et Kaskaoutis [2008] ont utilisé aussi les mesures de l'épaisseur optique des aérosols à la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm pour la caractérisation au niveau de quatre stations photométriques du réseau AERONET dans le monde.

3. Résultats et discussion

Dans cette partie, les données sur les paramètres optiques des aérosols, leur distribution en taille et leur albédo de diffusion simple, pour les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana, sont analysées et interprétées durant l'ensemble des périodes considérées de 2004 à 2009. Ce sont d'abord les moyennes journalières des paramètres optiques des aérosols qui sont considérées, puis les moyennes mensuelles, pour les deux stations. Seulement sont considérées les moyennes mensuelles de la distribution en taille, et de l'albédo de diffusion simple, pour les deux stations photométriques.

3-1. Variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström en fonction de celles de l'épaisseur optique des aérosols

Les variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ en fonction de celles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} au niveau des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana sont représentées respectivement sur la **Figure 2**. Pour la station Agoufou, les valeurs plus élevées des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$) correspondent aux faibles de τ_{a500} ($0,0 < \tau_{a500} < 0,5$) et vice versa ($\alpha_{440-870} < 0,5$ pour $0,0 < \tau_{a500} < 4,0$). Ce qui correspond à la prédominance de la poussière minérale [5]. En plus de la poussière minérale, on peut aussi noter la présence possible des aérosols de sel marin transportés par la mousson de l'Atlantique vers le continent durant les saisons pluvieuses (de juin à octobre) au Mali. De plus, les variations sont aussi caractérisées par des valeurs considérables du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ et de l'épaisseur optique τ_{a500} , indiquant ainsi la contribution plus ou moins considérable, dans la colonne atmosphérique au-dessus de la station, des aérosols issus des activités de feux de biomasse et d'autres activités menées dans la localité. Des résultats similaires ont été trouvés par Holben et al. [2001] à la station photométrique Banizoumbou (Niger). Pour la station IER_Cinzana, des valeurs plus élevées du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$) sont associées aux faibles de τ_{a500} ($0,0 < \tau_{a500} < 0,5$) et vice versa ($\alpha_{440-870} < 0,5$ pour $0,0 < \tau_{a500} < 4,0$). Ceci indique aussi la présence de la poussière minérale, probablement associée aux aérosols marins durant les saisons pluvieuses (de juin à octobre) au Mali et de la contribution plus ou moins considérable des aérosols issus principalement des feux de biomasse et d'autres activités menées dans la localité, comme l'agriculture, le transport, la construction des habitats.

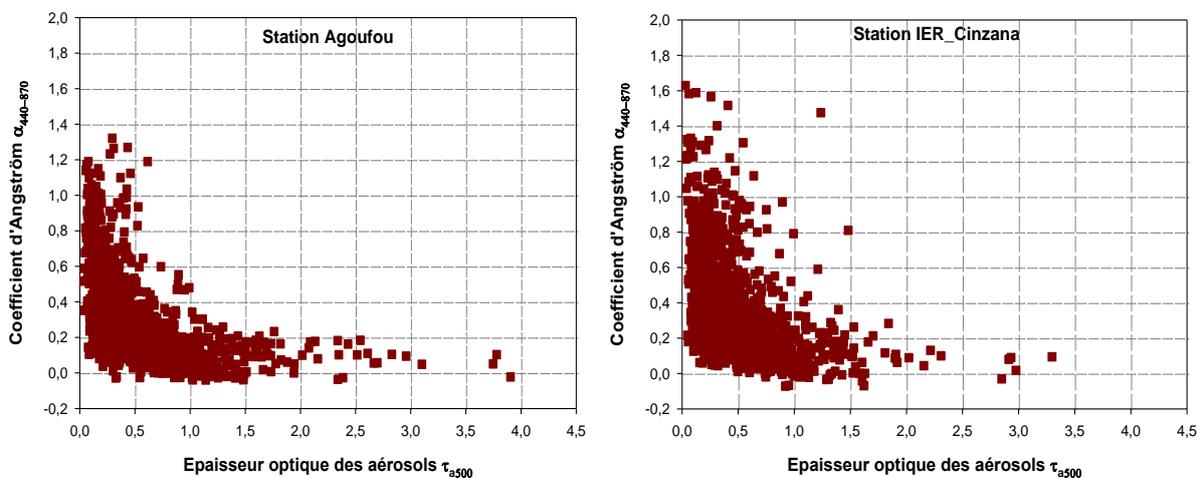


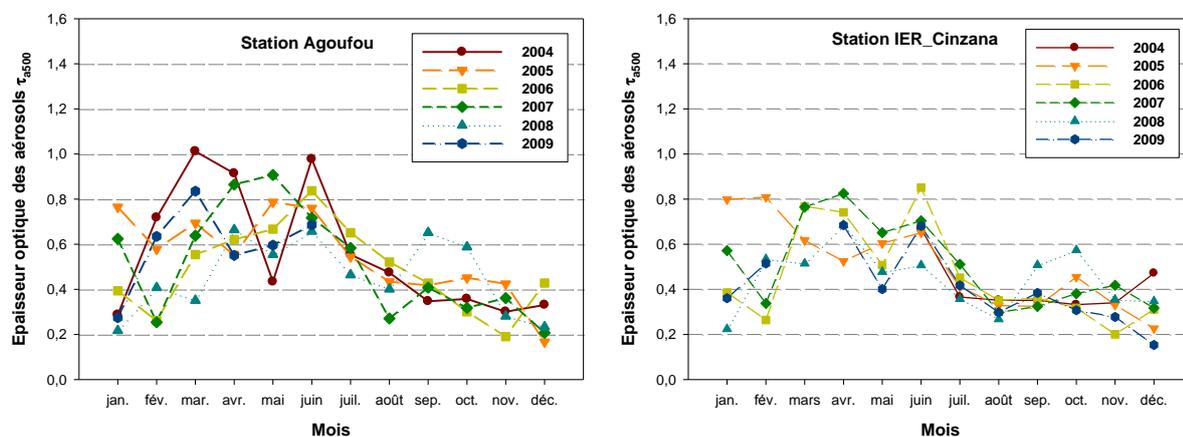
Figure 2 : Variations des moyennes journalières du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ en fonction de celles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} pour les deux stations Agoufou et IER_Cinzana de 2004 à 2009.

3-2. Variations des moyennes mensuelles des paramètres optiques des aérosols

Les moyennes mensuelles de l'épaisseur optiques des aérosols sont analysées et représentées sur la **Figure 3**, durant l'ensemble des périodes considérées de 2004 à 2009, pour les deux stations photométriques. Pour la station Agoufou, les moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols $\tau_{0.500}$ sont comprises entre 0,2 et 1,0 et elles varient d'un mois à un autre avec des valeurs de $\tau_{0.500}$ beaucoup plus élevées durant certains mois, tels que le mois de juin qui correspond à des valeurs beaucoup plus élevées, les mois de mars, d'avril et de mai. Les valeurs annuelles de l'épaisseur optique $\tau_{0.500}$ diffèrent aussi d'une année à une autre. Pour la station IER_Cinzana, la plupart des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols $\tau_{0.500}$ sont comprises entre 0,2 et 1,4. Le mois de juin et parfois les mois de mars, d'avril et de mai, correspondent à des valeurs mensuelles élevées de l'épaisseur optique des aérosols $\tau_{0.500}$ durant l'ensemble des périodes de 2004 à 2009.

Les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ pour les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana sont représentées respectivement sur la **Figure 3**. Pour la station Agoufou, les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ sont comprises en général entre 0,0 et 0,8. Pour la station IER_Cinzana, les moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ sont comprises entre 0,1 et 0,9. Les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana présentent des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ comprises entre 0,1 et 1,0 avec des variabilités considérables durant l'ensemble des périodes de 2004 à 2009. Le mois de juin correspond à des valeurs plus faibles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ pendant toutes les années considérées. Ce qui indique que le mois de juin correspond à la distribution de grosses particules de poussière minérale dans l'atmosphère, soulevée par l'action mécanique du vent présent dans les deux localités et aussi de la contribution du désert de Sahara, surtout lors des tempêtes de sable.

Ces particules sont éventuellement associées aux aérosols marins transportés de l'Atlantique vers les terres continentales dans la région ouest-africaine par la venue et la présence de la mousson en cette période de l'année. Les mois de décembre et de janvier correspondent à des valeurs élevées du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$. Ce qui suggère que durant ces mois, des quantités considérables des particules des feux de biomasse sont émises dans l'atmosphère au-dessus des deux localités. Ogunjobi et al. [2008] ont trouvé des résultats similaires durant les mois de décembre, janvier et février à Banizoumbou (Niger). Ils ont lié ce fait à la grande fréquence des activités des feux de biomasse en ces mois, à savoir les intenses feux de brousse, les travaux de ménage et le chauffage domestique dans la localité pendant cette période.



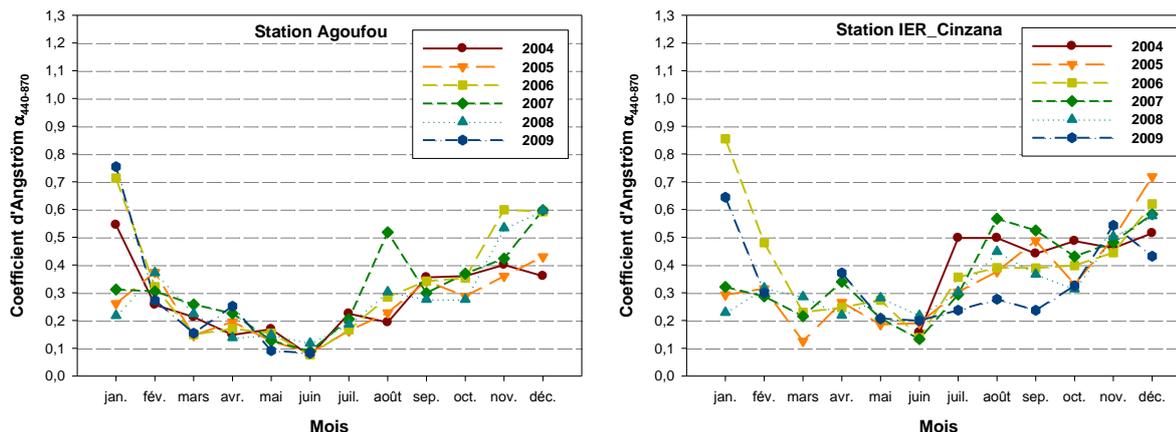


Figure 3 : Variations des moyennes mensuelles des paramètres optiques des aérosols, épaisseur optique τ_{a500} et du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ pour les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana durant l'ensemble des périodes considérées de 2004 à 2009.

3-3. Variations des paramètres optiques des aérosols durant les saisons

Les fréquences de distribution des moyennes journalières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} et du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ durant les saisons sèches (novembre-mai) et les saisons pluvieuses (juin-octobre) sont analysées et représentées en histogrammes respectivement sur la **Figure 4**, pour les deux stations photométriques durant les périodes de 2004 à 2009.

3-3-1. Fréquences de distribution des paramètres optiques des aérosols durant les saisons

Pendant les saisons sèches (novembre - mai), pour la station Agoufou, environ 70 % des valeurs de τ_{a500} sont dans l'intervalle 0,0 - 0,5 ; approximativement 18 % sont entre 0,5 et 1,0 ; à peu près 8 % sont distribués dans l'intervalle 1,0 et 1,5 ; environ 2 % sont entre 1,5 et 2,0 et de très faibles pourcentages de 2,5 jusqu'à 3,0 ; pour la station IER_Cinzana, plus de 70 % des valeurs de τ_{a500} sont entre 0,0 et 0,5 ; environ 18 % sont dans l'intervalle 0,5 - 1,0 ; approximativement 2 % sont entre 1,5 et 2,0 et de très faibles pourcentages de 2,0 à 3,0. Durant les saisons pluvieuses (juin - octobre), pour la station Agoufou, environ 70 % de τ_{a500} sont compris entre 0,0 et 0,5 ; approximativement 25 % sont dans l'intervalle 0,5 - 1,0 ; environ 10 % sont entre 1,0 et 1,5 et de faibles pourcentages de 1,5 à 2,5 ; pour la station IER_Cinzana, environ 80 % de τ_{a500} sont entre 0,0 et 0,5 ; approximativement 15 % sont entre 0,5 et 1,0 ; environ 4 % sont compris entre 1,0 et 1,5 et de faibles pourcentages entre 1,5 et 2,5. Pendant les saisons sèches (novembre - mai), pour la station Agoufou, environ 2 % de $\alpha_{440-870}$ sont entre -0,2 et 0,0 ; approximativement 75 % sont compris entre 0,0 et 0,4 ; environ 20 % sont entre 0,4 et 0,8 ; environ 7 % sont compris dans l'intervalle 0,8 - 1,2 et de faibles pourcentages sont entre 1,2 et 1,6 ; pour la station IER_Cinzana, environ 1 % entre -0,2 et 0,0 ; approximativement 60 % sont dans l'intervalle 0,2 - 0,4 ; environ 30 % sont entre 0,4 et 0,8 ; à peu près 8 % sont compris entre 0,8 et 1,2 ; de faibles pourcentages sont entre 1,2 et 1,4. Pendant les saisons pluvieuses (juin - octobre), pour la station Agoufou, plus de 80 % de $\alpha_{440-870}$ sont compris entre 0,0 et 0,4 ; environ 15 % sont dans l'intervalle 0,4 - 0,8 ; approximativement 3 % sont entre 0,8 et 1,4 ; pour la station IER_Cinzana, environ 65 % de $\alpha_{440-870}$ sont compris entre 0,0 et 0,4 ; approximativement 25 % sont dans l'intervalle 0,4 - 0,8 ; environ 10 % sont compris entre 0,8 et 1,6.

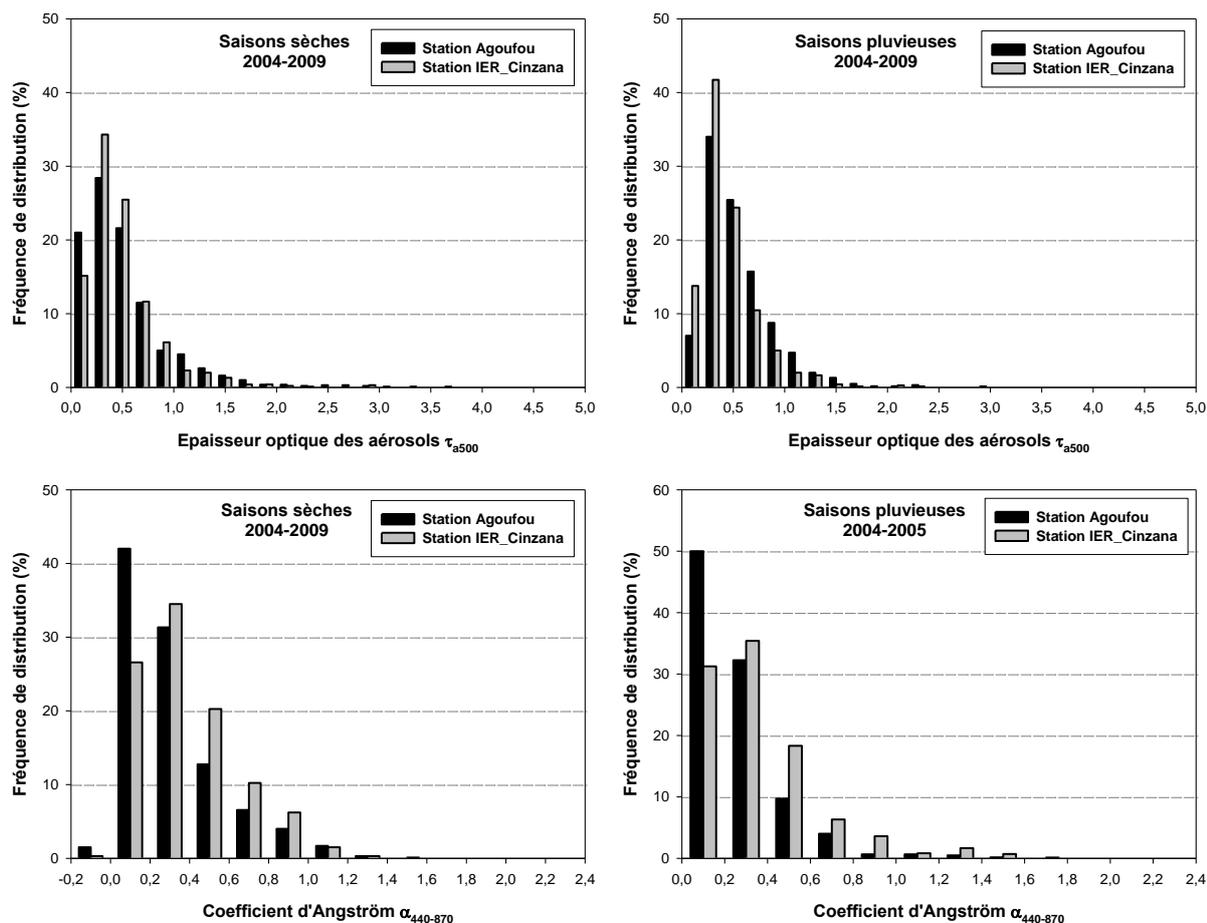


Figure 4 : Fréquences de distribution des moyennes journalières des paramètres optiques des aérosols, épaisseur optique τ_{a500} et coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ pour les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana durant les saisons.

3-3-2. Valeurs des moyennes mensuelles des paramètres optiques durant les saisons

Dans cette partie, sont considérées les valeurs des moyennes mensuelles des paramètres optiques durant les différentes saisons. La saison sèche au Mali, plus précisément en zones soudanienne et sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, est généralement répartie en deux, à savoir, la saison sèche froide (novembre - février) et la saison sèche chaude (mars - mai). La saison pluvieuse, qui est due par la venue et la présence de mousson dans ces zones, dure en général quatre mois (juin - octobre). En saison sèche froide (novembre – février) de 2004 à 2009, les valeurs des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} sont moins élevées (*Tableaux 1 et 2*). Cette période peut correspondre à la distribution des quantités d'aérosols moins importantes à l'échelle locale des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana. Pendant la saison sèche chaude (mars – mai) durant l'ensemble des périodes de 2004 à 2009, les valeurs des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} sont considérables (*Tableaux 1 et 2*). Ce qui montre que d'importantes quantités de particules sont distribuées en cette période au niveau des deux stations Agoufou et IER_Cinzana. En saison pluvieuse (juin – octobre) de 2004 à 2009, l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} a des valeurs mensuelles plus ou moins considérables (*Tableaux 1 et 2*) avec le mois de juin qui correspond à des valeurs plus élevées au niveau des deux stations.

Ce qui indique que la distribution des particules pendant la saison pluvieuse est très variée au niveau des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana. Dans les deux localités, la saison sèche froide (novembre - février) de 2004 à 2009 (*Tableaux 1 et 2*), est caractérisée par la distribution considérable des aérosols feux de biomasse dans la colonne atmosphérique. Ces aérosols sont associés aux particules de poussière minérale déjà présentes. Pendant la saison sèche chaude (mars - mai) de 2004 à 2009 (*Tableaux 1 et 2*), correspond à des valeurs des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ moins considérables. Cette période est caractérisée par la prédominance des aérosols de la poussière minérale dans l'atmosphère au-dessus des deux localités avec des quantités moins considérables des particules issues des feux de biomasse. Les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana présentent des distributions similaires avec plus d'aérosols du mode grossier à la station Agoufou qu'à la station IER_Cinzana durant les saisons sèches.

Pendant les saisons pluvieuses, les deux stations présentent aussi des distributions en taille dominées par les aérosols grossiers (aérosols principalement issus de la poussière minérale) avec quelques variabilités considérables du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$, surtout à la location de la station IER_Cinzana. Ce qui suggère la contribution plus ou considérable des aérosols du mode fin (aérosols issus surtout des feux de biomasse) dans la colonne atmosphérique au-dessus des deux localités considérées, surtout la localité de la station IER_Cinzana. Durant la saison pluvieuse (juin - octobre) de 2004 à 2009 (*Tableaux 1 et 2*), les valeurs des moyennes mensuelles du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ sont considérables, sauf en juin. Ce qui suggère que pendant cette période et en plus de grosses particules de poussière éventuellement associées aux aérosols marins, sont distribuées des quantités de particules de poussière minérale, moyennement grosses au-dessus des deux localités. Ce qui s'explique par la diminution de l'intensité des feux de biomasse durant cette période et par l'action du vent (la mousson) lors des orages surtout dans la zone soudanaise (au Sud) du pays.

Tableau 1 : Valeurs des moyennes saisonnières de l'épaisseur optique des aérosols $\tau_{0.500}$ et du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ et nombres de jours et de mois des mesures durant les différentes saisons et l'ensemble des périodes de 2004 à 2009 de la station photométrique Agoufou.

Station Agoufou	$\tau_{0.500}$	$\alpha_{440-870}$	N(1)*	N(2)*
Saison sèche froide	0,51 ± 0,23	0,32 ± 0,18	554	22
Saison sèche chaude	0,67 ± 0,17	0,17 ± 0,04	512	18
Saison pluvieuse	0,54 ± 0,17	0,24 ± 0,11	617	26
Périodes 2004-2009	0,52 ± 0,21	0,29 ± 0,16	1683	66

*N(1) : Nombre de jours de mesures durant les saisons.

*N(2) : Nombre de mois de mesures durant les saisons.

Tableau 2 : Valeurs des moyennes saisonnières de l'épaisseur optique des aérosols τ_{a500} et du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870}$ et nombres de jours et de mois des mesures durant les différentes saisons et l'ensemble des périodes de 2004 à 2009 de la station photométrique IER_Cinzana.

Station IER_Cinzana	τ_{a500}	$\alpha_{440-870}$	N(1)*	N(2)*
Saison sèche froide	0,51 ± 0,23	0,38 ± 0,17	608	22
Saison sèche chaude	0,67 ± 0,21	0,24 ± 0,06	389	15
Saison pluvieuse	0,43 ± 0,14	0,34 ± 0,12	726	30
Périodes 2004-2009	0,47 ± 0,19	0,36 ± 0,15	1723	67

*N(1): Nombre de jours des mesures durant les saisons.

*N(2): Nombre de mois des mesures durant les saisons.

3-4. Distribution en taille des aérosols

La distribution en taille des aérosols atmosphériques est notée par $dV/d\ln r$ et est exprimée en $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$. Les variations correspondantes de la distribution en taille $dV/d\ln r$ sont représentées respectivement sur la **Figure 5** pour les deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana. La distribution en taille des aérosols troposphériques peut contenir plusieurs types de particules distincts dont chacun est généralement déterminé par une fonction log-normale [10]. Ogunjobi et al. [2008] ont fait des investigations sur la distribution en taille des types d'aérosols sur deux stations photométriques du réseau AERONET en Afrique de l'Ouest. Dans leurs investigations sur les sites Ilorin (Nigéria) et Cap Vert dans l'Océan Atlantique, ils ont considéré la domination des particules du mode grossier (poussière désertique) pour le rayon des particules $r > 0,5\mu\text{m}$ et le coefficient d'Angström $\alpha_{440-870} < 0,5$ avec des valeurs correspondantes de l'épaisseur optique, et celle des particules du mode d'accumulation (pollution et feux de biomasse) pour $r < 0,5\mu\text{m}$ et $\alpha_{440-870} > 0,5$ avec aussi des épaisseurs optiques correspondantes. De plus, avec les mesures photométriques du réseau AERONET, le cas de la non-sphéricité des particules de poussière [10] est généralement considéré dans la distribution en taille des aérosols. Les variations de la distribution en taille sont données en fonction du rayon r des particules.

Pour la station Agoufou, les données sont moins nombreuses et concernent les années 2005, 2006 et 2007 et pour la station IER_Cinzana, elles sont de 2005 à 2009. De plus, les données ont été sélectionnées pour le coefficient d'Angström $\alpha_{440-870} < 0,5$ (distributions mixtes avec la prédominance des aérosols de poussière minérale) et $\alpha_{440-870} \geq 0,5$ (distributions mixtes des deux types d'aérosols avec des quantités plus ou moins considérables des particules de feux de biomasse), associées aux valeurs des épaisseurs optiques τ_{a500} correspondantes. Au niveau des deux stations photométriques, les variations de la distribution en taille sont similaires avec des valeurs considérables pour le rayon des particules compris entre approximativement entre 2 μm et 6 μm . Pour les cas du coefficient d'Angström $\alpha_{440-870} < 0,5$ (**Figure 5**), les épaisseurs optiques τ_{a500} correspondantes sont comprises respectivement entre 0,33 et 0,83 (pour la station Agoufou) et entre 0,26 et 0,85 (pour la station IER_Cinzana). Pour les cas de $\alpha_{440-870} \geq 0,5$ (**Figure 5**) les épaisseurs optiques τ_{a500} correspondantes sont comprises respectivement entre 0,19 et 0,43 (pour la station Agoufou) et entre 0,22 et 0,47 (pour la station IER_Cinzana).

Les valeurs du rayon r des particules pour l'ensemble des distributions au niveau des deux stations sont comprises entre $0,05 \mu\text{m}$ et $15 \mu\text{m}$. Les pics des variations de distribution en taille correspondent aux grandes épaisseurs optiques τ_{a500} à la station Agoufou et à la station IER_Cinzana. Les variations de distribution en taille pour les cas du coefficient d'Angström ($\alpha_{440-870} < 0,5$) au niveau des deux stations sont caractéristiques de la poussière minérale désertique avec des valeurs élevées $\sim 0,8$ à la station Agoufou et $\sim 0,7$ à la station IER_Cinzana. Pour le coefficient d'Angström ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$), les variations de distribution en taille des aérosols sont moins considérables que précédemment avec des valeurs élevées $\sim 0,25$ à la station Agoufou et $\sim 0,18$ à la station IER_Cinzana. Ogunjobi et al. [2008] ont enregistré des variations de distribution en taille similaires à la station photométrique Ilorin (Nigéria) pour la prédominance de la poussière désertique avec $\alpha_{440-870} < 0,5$ [6].

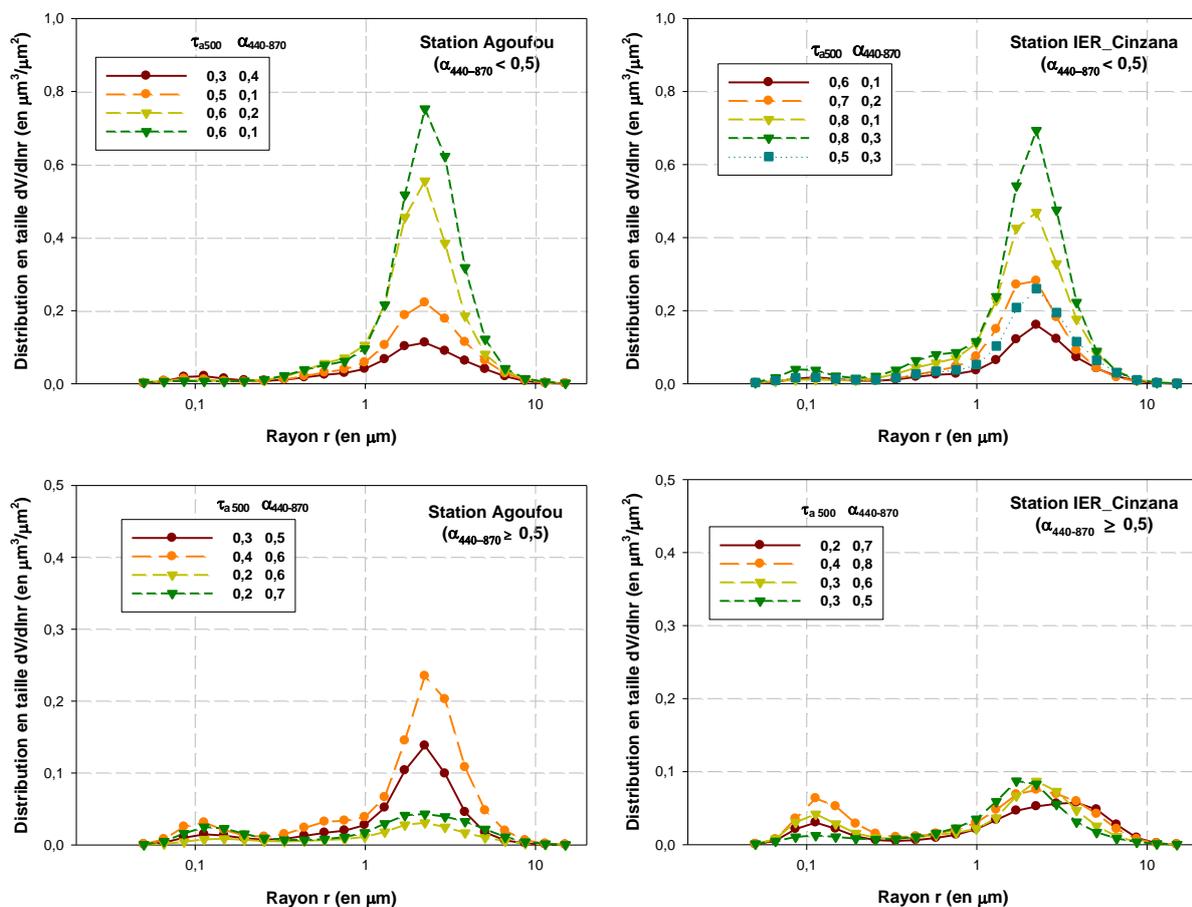


Figure 5 : Distribution en taille $dV/d\ln r$ (en $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) des aérosols en fonction du rayon modal (en μm) au niveau des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana pour les deux cas du coefficient d'Angström ($\alpha_{440-870} < 0,5$ et $\alpha_{440-870} \geq 0,5$).

3-5. Albédo de diffusion simple des aérosols

Par définition, l'albédo de diffusion simple ω_0 (sans unité) est le rapport du rayonnement diffus par le rayonnement total d'extinction. C'est une variable clef pour évaluer les effets radiatifs des aérosols [11]. L'influence des aérosols sur le changement climatique est devenue un sujet préoccupant durant les deux dernières décennies. Dubovik et al. [2006] ont développé la méthode dérivant l'albédo de diffusion simple

ω_0 pour les mesures au sol et ont appliqué aux données du réseau mondial AERONET [12]. Les données photométriques de l'albédo de diffusion simple ω_0 des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana sont disponibles suivant les longueurs d'onde λ : 441 ; 674 ; 869 et 1020 nm (pour la station Agoufou) et 439 ; 675 ; 871 et 1022 nm (pour la station IER_Cinzana). Plusieurs études sur les variations de l'albédo de diffusion simple ω_0 des aérosols ont été réalisées. Par exemples, Eck et al. [1999] à partir de la dépendance spectrale, ont indiqué que les valeurs de ω_0 de 0,70 à 0,92 sont pour les aérosols des feux de biomasse et de 0,70 à 0,99 pour les particules de poussière désertique [13]. Masmoudi et al. [2003], analysant la variation de l'albédo de diffusion simple ω_0 des stations photométriques en Afrique, ont indiqué que ω_0 augmente avec la longueur d'onde λ pour différentes épaisseurs optiques des aérosols τ_{a500} . Ceci veut dire que les régions africaines sont particulièrement affectées par les particules de poussière [6].

En fait, l'albédo de l'aérosol saharien augmente avec la longueur d'onde, tandis que l'albédo de l'aérosol des feux de biomasse diminue. Ogunjobi et al. [2008] ont analysé les variations de l'albédo de diffusion simple ω_0 des aérosols au-dessus des stations photométriques en Afrique de l'Ouest. Ils ont indiqué qu'à la contribution prédominante des particules grossières (cas pour $\alpha_{440-870} < 0,5$), référant aux particules de la poussière désertique, à l'état optique de l'atmosphère, l'albédo de diffusion simple ω_0 a une dépendance spectrale (ω_0 augmente avec la longueur d'onde λ) et ses valeurs sont plus élevées. Ceci est dû au fait que les particules de poussière absorbent moins que les aérosols anthropogéniques. Par contre, de large magnitude d'absorption des aérosols existants au-dessus des stations durant les épisodes des feux de biomasse (prédominance des particules fines avec $\alpha_{440-870} \geq 0,5$) [5]. Les données de l'albédo de diffusion simple ω_0 pour les deux stations sont analysées suivant l'intervalle de longueurs d'ondes 400 nm à 1100 nm avec une échelle de 100 nm (*Figure 6*).

Au niveau des deux stations Agoufou et IER_Cinzana, les variations de l'albédo de diffusion simple ω_0 des aérosols sont aussi analysées pour les cas ($\alpha_{440-870} < 0,5$) et pour les cas ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$) avec des épaisseurs optiques τ_{a500} correspondantes dans les deux cas considérés. Les valeurs de l'albédo de diffusion simple ω_0 sont plus faibles à des longueurs d'onde $\lambda = 441$ nm (Agoufou) et $\lambda = 439$ nm (IER_Cinzana). Elles croissent significativement de 400 à 700 nm. L'albédo de diffusion simple ω_0 augmente légèrement et parfois très peu entre 700 nm et 1100 nm, surtout avec les cas de la prédominance de la poussière ($\alpha_{440-870} < 0,5$) au niveau des deux localités considérées. L'albédo de diffusion simple ω_0 croît beaucoup plus à la station IER_Cinzana pour les cas d'association mixte de la poussière et des feux de biomasse considérables ($\alpha_{440-870} \geq 0,5$). Pour les cas de la prédominance de la poussière ($\alpha_{440-870} < 0,5$), les variations de l'albédo de diffusion simple ω_0 sont respectivement comprises entre 0,85 et 0,98 à la station Agoufou et 0,86 et 0,98 à la station IER_Cinzana (*Figure 6*).

Ce qui indique que les aérosols au-dessus des deux localités considérées sont moins absorbants et diffusent beaucoup plus les rayonnements solaire et terrestre. Cela est surtout dû à la prédominance de la poussière dans la bande sahélienne en Afrique de l'Ouest. Pour le coefficient d'Angström $\alpha_{440-870} > 0,5$ (ou $\alpha_{440-870} \geq 0,5$), les variations de l'albédo de diffusion simple ω_0 sont respectivement comprises entre 0,90 et 0,98 à la station Agoufou et 0,80 et 0,95 à la station IER_Cinzana (*Figure 6*). À la station Agoufou, les valeurs de l'albédo de diffusion simple ω_0 sont presque similaires que précédemment. D'où, les aérosols au-dessus de la localité de la station Agoufou demeurent toujours plus diffusifs qu'absorbants.

Ceci est dû à la prédominance quasi permanente de la poussière minérale au-dessus de la localité. À la station IER_Cinzana, il faut noter que la présence des quantités plus ou moins considérables de fines particules (issues des feux de biomasse), surtout pendant les épisodes des feux de forêt. Ce qui indique qu'en plus de la diffusion des aérosols grossiers (issus de la poussière minérale), les fines particules absorbent les rayonnements solaire et terrestre au-dessus de la localité.

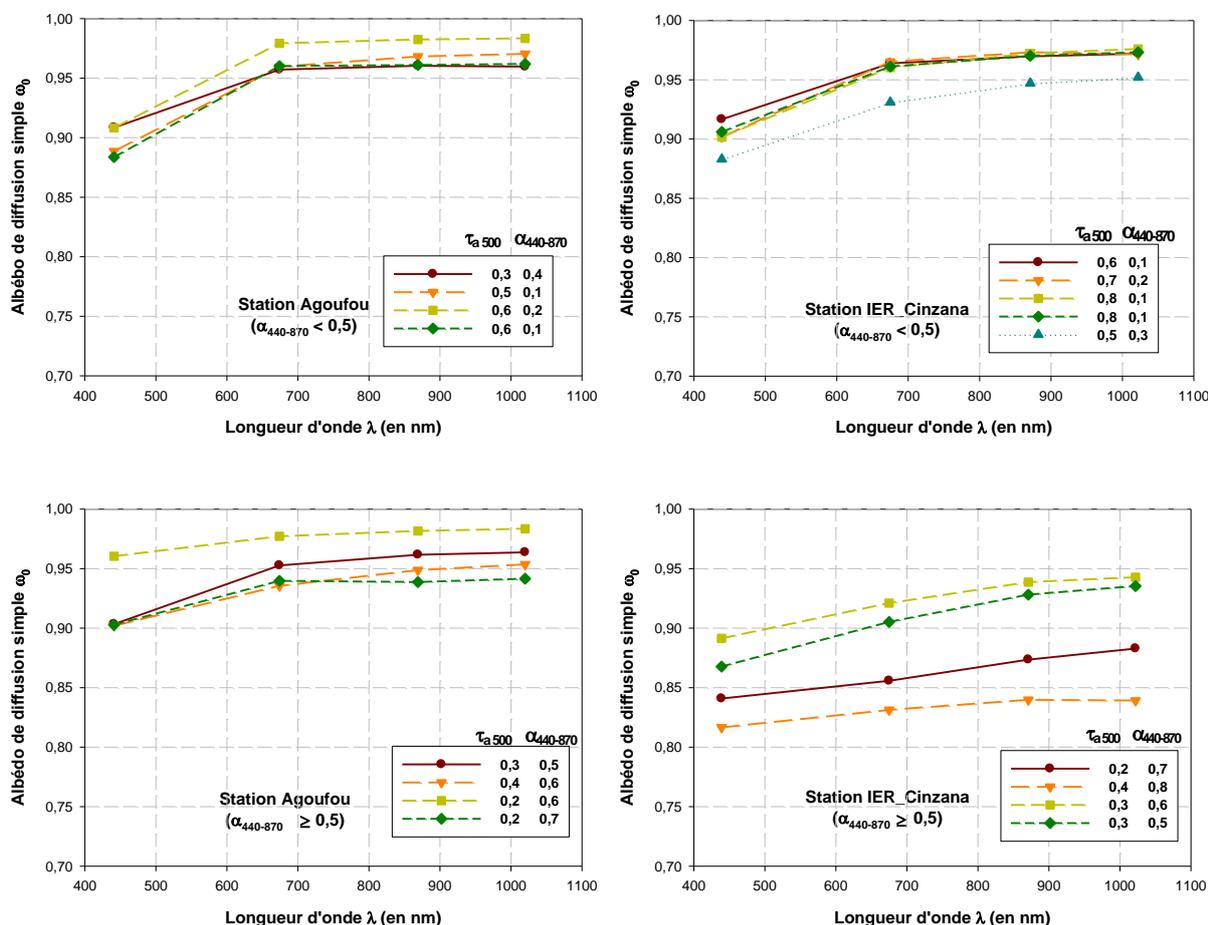


Figure 6 : Variations de l'albédo de diffusion simple des aérosols au niveau des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana pour les deux cas du coefficient d'Angström ($\alpha_{440-870} < 0,5$ et $\alpha_{440-870} \geq 0,5$).

4. Conclusion

L'étude du contenu atmosphérique en aérosols par les mesures photométriques du réseau mondial AERONET, a permis de caractériser les différents types d'aérosols présents à l'échelle locale des deux localités Agoufou et IER_Cinzana durant l'ensemble des périodes allant de 2004 à 2009. Les paramètres considérés pour cette étude, sont l'épaisseur optique des aérosols à la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm, notée τ_{a500} , le coefficient d'Angström α dans l'intervalle spectral 440-870 nm ($\alpha_{440-870}$), la distribution en taille $dV/d\ln r$ (en $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$) et l'albédo de diffusion simple ω_0 . Les résultats de l'analyse indiquent que l'atmosphère au-dessus des localités des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana, est constituée par une mixture d'aérosols de poussière minérale (mode grossier) et de feux de biomasse (mode

fin), avec la prédominance de la poussière minérale. Les aérosols prédominants, issus de la poussière minérale, sont influencés par les épisodes des tempêtes de sable provenant du Sahara et de ses régions environnantes.

En plus, de cette prédominance d'aérosols du mode grossier, sont associées des quantités plus ou moins considérables d'aérosols issus principalement des activités des feux de biomasse et d'autres activités menées dans les deux localités, telles que l'agriculture, le transport (aérosols du mode fin). Les quantités d'aérosols fins sont plus considérables durant les mois des saisons sèches (de novembre à mai), surtout pendant les mois de décembre, janvier ou même février. Ce qui est dû à la présence de l'harmattan en cette période en Afrique de l'Ouest. En plus des aérosols de poussière minérale, il peut y avoir la contribution des aérosols de sel marin provenant de l'Océan Atlantique pour la prédominance des aérosols grossiers dans l'atmosphère au-dessus des localités considérées. Cela peut être dû surtout par la venue et la présence de la mousson pendant les saisons pluvieuses (de juin à octobre) en Afrique de l'Ouest. En plus, les résultats indiquent aussi que le mois de juin correspond à la plus large distribution des aérosols grossiers dans l'atmosphère au-dessus des deux localités. La distribution d'aérosols grossiers est importante durant les mois de mars, avril, et mai.

Cette distribution est toujours associée à des quantités d'aérosols du mode fin. De juillet jusqu'à octobre, voire novembre, différentes quantités d'aérosols sont émises dans l'atmosphère en cette période. Ceci est dû à la présence de la mousson et après de l'harmattan dans la bande sahélienne en Afrique de l'Ouest. De plus, la distribution en taille des aérosols au-dessus des dites localités indique davantage la prédominance des aérosols grossiers (surtout issus de la poussière minérale) dans l'atmosphère durant l'ensemble des périodes considérées de 2004 à 2009. L'analyse des données de l'albédo de diffusion simple ω_0 , selon les deux cas considérés du coefficient d'Angström α avec des épaisseurs optiques correspondantes, indique les aérosols présents au-dessus des deux stations diffusent beaucoup plus les rayonnements solaire et terrestre qu'ils n'en absorbent. Ceci est certainement dû à la prédominance quasi-permanente de la poussière minérale dans l'atmosphère au-dessus des dites localités. Notons qu'en plus de la diffusion des rayonnements solaire et terrestre par les aérosols à l'échelle locale des deux localités, les aérosols des feux de biomasse (aérosols du mode fin) associés à cette prédominance de la poussière minérale, ont un caractère beaucoup plus absorbant, surtout à la station IER_Cinzana.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent aux responsables des deux stations photométriques Agoufou et IER_Cinzana implantées au Mali. Il s'agit des "Personal Investigators P.I." et des managers de ces stations photométriques. Nos reconnaissances s'adressent également aux responsables, Personal Investigators (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.

Références

- [1] - GIEC : Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse, GIEC, (2001).
- [2] - M. Chaâbane, 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).
- [3] - H. D. Kambezidis and D. G. Kaskaoutis : Aerosol climatology over four AERONET sites: An overview, *Atmospheric Environment*, 42 (2008) 1892 – 1906.
- [4] - T. F. Eck, 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*, Vol.110, D06202, doi: 10.1029/2004JD005274, (2005).
- [5] - K. O. Ogunjobi, Z. He, and C. Simmer : Spectral aerosol optical properties from AERONET Sun-photometric measurements over West Africa, *Atmospheric Research*, 88, 89 – 107, (2008).
- [6] - M. Masmoudi, Chaâbane M., D. Tanré, P. Goloub, L. Blarel, and F. Elleuch : Spatial and temporal variability of aerosol size distribution and optical properties, *Atmospheric Research*, 66, 1 - 19, doi: 10.1016/S0169-8095(02)00174-6, (2003).
- [7] - J. Liu, Y. Zheng, Z. Li, and R. Wu : Ground-based remote sensing of aerosol optical properties in one city in Northwest China, *Atmospheric Research*, 89, 194 - 205, doi: 10.1016/j.atmos.rcs.2008.01.010, (2008).
- [8] - B. N. Holben, D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. S. Schaffer, B. Chatenet, F. Lavenue, 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*, Vol.106, 12,067 - 12,097, (2001).
- [9] - B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, and A. Smirnov : AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66, 1 – 16, (1998).
- [10] - O. Dubovik, and M. D. King : A flexible inversion algorithm from retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements, *Journal Geophysical Research*, Vol. 105, D16, 20,673 - 20,696, (2000).
- [11] - O. Dubovik, 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*, 59, 590 – 608, (2002).
- [12] - O. Dubovik, A. Sinyuk, T. Lapyonok, B. N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T. F. Eck, H. Volten, O. Muñoz, B. Veihelmann, W. J. Van der Zande, J.-F. Leon, M. Sorokin, and I. Slutsker : Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *Journal of Geophysical Research*, Vol.111, D11208, doi: 10.1029/2005JD006619, (2006).
- [13] - T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne : Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. D24, Pages 31,333-31,349, (1999).