ORIGINAL ARTICLE

SIMULATION DE LA DISPERSION DES AEROSOLS DES FEUX DE BIOMASSE DANS LA BOUCLE DU BAOULÉ AU MALI PAR LE MODELE HYSPLIT

SIMULATION OF AEROSOL DISPERSION OF BIOMASS LIGHTS IN THE BAOULÉ LOOP IN MALI BY THE HYSPLIT MODEL

| Cheick Oumar Kindo * | Cheick Diarra | et | Abdramane Ba |

Université des Sciences, des Techniques et des Technologie de Bamako (USTTB) | Faculté des Sciences et Techniques (FST) | Département de Physique | Laboratoire d'Optique, de Spectroscopie et des Sciences Atmosphériques (LOSSA) | Colline de Badalabougou | Bamako | Mali |

| Received | 01 April 2018 | | Accepted | 21 April 2018 | | Published 28 April 2018 |

RESUME

Introduction : Les feux de biomasse sont responsables de l'émission d'importantes quantités de particules fines en suspension dans l'atmosphère. En Afrique de l'Ouest, les activités des feux de biomasse sont observées essentiellement en saison sèche. Dans ce contexte, une simulation numérique de la dispersion des particules $PM_{2.5}$ émises par les feux de biomasse a été faite au LOSSA et des mesures in situ sur une année ont été effectuées lors d'études antérieures à Néguèla dans la boucle du Baoulé au Mali. **Objectifs :** Cette étude a pour objectifs de faire tourner le modèle HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) sur la même année pour calculer la variation des concentrations des particules $PM_{2.5,}$ comparer les résultats à celles des mesures in situ et analyser les cartes de trajectoires et de dispersion pour expliquer les pics de concentrations observés. **Méthodes** : Les méthodes utilisées dans ce travail consistent à configurer le modèle HYSPLIT. Pour cela il faut récupérer les données du modèle météorologique d'archive GDAS (Global Data Assimilation System) de la zone couvrant l'Afrique occidentale, définir les dates représentatives des saisons et les coordonnées géographiques du site de Neguela. **Résultats :** En termes de résultats**,** les cartes de trajectoires indiquent que la dispersion des particules dépend des saisons. En fin de saison sèche et début d'hivernage, la concentration des particules $PM_{2.5}$ augmente à cause de la brulure de biomasse par les paysans avant les cultures. Cette méthode est d'un apport important en nutriments riches en azote (N), en potassium (K) et surtout en phosphore (P) indispensable pour l'amélioration des rendements agricoles. Les concentrations moyennes des nutriments $PM_{2.5}$ sont comprises entre 1 et 5µg /m^3. **Conclusion** : Cette étude montre que les résultats obtenus avec le modèle HYSPLIT sont en bon accord avec les mesures in situ et les observations satellitaires. De plus, elle montre l'importance de la brulure des champs sur l'amélioration des rendements agricoles. L'étude montre également que HYSPLIT est un modèle à fort pouvoir de prédiction et peut être appliqué dans d'autres cas de figure en perspectives au Mali.
***Mots-clés** : $PM_{2.5}$, Trajectoires, Concentrations, Mesures in situ, Néguèla.*

ABSTRACT

Background: Biomass fires are responsible for the emission of large amounts of fine particles suspended in the atmosphere. In West Africa, the activities of biomass burning are observed mainly in the dry season. In this context, a numerical simulation of the dispersion of $PM_{2.5}$ particles emitted with the smoke of biomass fires was made at LOSSA and one-year in situ measurements were made in previous studies at Néguèla in the biosphere reserve of the Baoulé loop in Mali. **Objective:** The objectives of this study are to run the HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model for the same year in order to calculate the $PM_{2.5}$ particle concentration variation, compare the results to the in-situ measurements and analyze the trajectory maps. and dispersion to explain peak concentrations observed. **Methods:** The methods used in this work consist of recovering the Global Data Assimilation System (GDAS) data for the West Africa area, defining four dates representative of the dry season and the rainy season to configure the HYSPLIT model. **Results:** The results of the trajectories indicate a multitude of sources of the particles, especially at the end of the dry season and early wintering, which explains a burn of biomass by the farmers before the crops. This method is an important contribution in nutrients rich in nitrogen (N), potassium (K) and especially in phosphorus (P) essential for the improvement of agricultural yields. The concentrations estimated by the model indicate means ranging between 1 and 5 µg/m3. **Conclusion:** This study shows that the results obtained with the HYSPLIT model are in good agreement with in situ measurements and satellite observations. In addition, it shows the importance of burning fields on improving agricultural yields. The study also shows that HYSPLIT is a strong predictive power model can be applied in other cases outlook in Mali.
***Keywords:** $PM_{2.5}$, Forward trajectories, Concentrations, In situ measurements, Néguèla.*

1. INTRODUCTION

Les feux de biomasse et les tempêtes de poussières, sont d'importantes sources d'émission de matières particulaires dans l'atmosphère appelées aérosols. Les particules d'aérosols émises par les feux de biomasse ont une de taille inférieure à 2.5 µm appelées $PM_{2.5}$ tandis que les tempêtes de poussières sont majoritairement constituées de particules d'aérosol de taille inférieure à 10 µm appelées PM_{10} [1].

Les feux de biomasse en Afrique sub-saharienne sont le plus souvent considérés comme des aléas néfastes pour l'environnement. Pourtant il est maintenant avéré qu'ils participent, dans ces espaces tropicaux, à la structuration de la végétation des savanes. Loin d'être aléatoires, ces feux sont même intégrés dans le rythme de la vie sociale des

*Corresponding and Author Copyright © 2018: **Cheick Oumar Kindo**. All Rights Reserved. All articles published in *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences* are the property of Atlantic Center Research Sciences and is protected by copyright laws CC-BY. See: http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/.

populations [2]. En saison sèche, l'activité des feux se trouve à l'Ouest de l'Afrique et au Nord de l'Equateur. Puis, à partir de mai, on observe un décalage des feux vers l'Est et vers le Sud [3].

Pendant une grande partie de la saison sèche, les particules de fumées sont mélangées aux particules de poussières puis transportées et dispersées par le vent dans toute la zone ouest africaine. Ce qui peut avoir des impacts positifs pour l'agriculture dans le cas d'un apport en nutriments nitratés et phosphaté [4]. Il est avéré aussi que les cendres de la biomasse brulée sont riches en potassium [5]. Les feux de biomasses sont constitués des feux de forêt, la brulure des champs pour l'agriculture et d'autres combustions comme la production de charbon et les combustions domestiques utilisant le bois et le charbon. Ces activités de sources anthropiques augmentent les concentrations des particules $PM_{2.5}$ dans l'atmosphère de la boucle du Baoulé.

Dans la boucle du Baoulé, particulièrement sur le site de Néguèla, Prihodko et al., (2012) lors d'études antérieures basées sur des mesures in situ, ont observé des profils saisonniers de gaz (NO_2 et NH_4), de particules d'aérosols $PM_{2.5}$ (PO_4, NO_2, NH_4, NH_3, Ca, carbohydrate) et du lévoglucosan ($C_6H_{10}O_5$) [6]. Le lévoglucosan est un composé organique aromatique à six atomes de carbone, formé par pyrolyse de glucides comme l'amidon ou la cellulose [5]. De ce fait, le lévoglucosan est utilisé comme traceur chimique de la combustion d'une quelconque fraction de la biomasse lorsqu'il s'agit d'étudier la composition chimique de l'atmosphère, en particulier sa teneur en particules fines en suspension. Tout comme d'autres traceurs comme le potassium, l'oxalate et le cyanure de méthyle sous forme gazeuse, le taux de lévoglucosan s'est révélé être très fortement corrélé à la présence de feux de végétaux, car les gaz résultant de la pyrolyse du bois contiennent du lévoglucosan en quantité significative [7].

L'avènement de la modélisation dans l'étude du transport et de la dispersion des aérosols atmosphériques a considérablement contribué à l'amélioration des connaissances sur leur cycle d'évolution. Plusieurs modèles ont été développés à cet effet. HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) est l'un des modèles les plus utilisés pour l'étude et l'observation des aérosols [8,9,10]. Le modèle HYSPLIT simule les particules $PM_{2.5}$ émises grâce au module BlueSky intègré qui modélise l'émission de la fumée des feux de biomasse [11,12,13]. Cette simulation du transport, de la dispersion et du dépôt des particules d'aérosols $PM_{2.5}$, n'est possible qu'avec des données sorties d'un modèle météorologique d'archive ou de prévision. Les particules d'aérosols $PM_{2.5}$ émises avec la fumée peuvent provenir d'un feu de biomasse d'origine naturelle ou anthropique [8].

Cette étude porte sur l'application du modèle HYSPLIT dans la Boucle du Baoulé centrée sur la localité de Néguèla pour simuler la dispersion des aérosols des feux de biomasse à travers le calcul des trajectoires, des concentrations et des sections efficaces des particules $PM_{2.5}$ sur la période de Février 2011 à Janvier 2012. Les résultats du modèle HYSPLIT seront comparés aux mesures in situ effectuées sur la même période par Prihodko et al., (2012) [6].

2. METHODOLOGIE

2.1 Zone d'étude :

La boucle du Baoulé est une zone au climat et végétation de type soudano-guinéenne où se situe la localité de Néguèla (12.86° Nord, 8.45° Ouest) à 50 km au nord-ouest de Bamako. Les équipements de mesure du LOSSA sont installés sur le site de cette localité dans une forêt classée. La figure 1 donne une cartographie des domaines d'extraction des fichiers de données météorologiques utilisées pour faire tourner le modèle HYSPLIT incluant la zone d'étude. Ces fichiers de données provenant du modèle d'archive GDAS (Global Data Assimilation System) du NCEP (National Center for Environmental Prediction) sont extraites sur le premier domaine (D1) compris entre -20° et 20° de longitude et 5° à 35° de latitude. Le second domaine (D2) compris entre -20° à 5° de longitude et de 5° à 28° de latitude est la zone simulation de l'évolution de particules. Le domaine (D2) contient la zone d'étude correspondant à la boucle du Baoulé. Les fichiers du modèle météorologique GDAS sont constitués des champs de vitesse du vent U et V, la température T et le taux de précipitation. HYSPLIT contient des scripts qui qui permettent à partir de ces champs basiques de calculer les autres grandeurs météorologiques le long des trajectoires tel que l'humidité relative, l'humidité spécifique, la pression, la hauteur rapport au niveau de la mer et par rapport au niveau du sol et la radiation solaire [9].

Les fichiers donnés météorologiques couvrant la zone d'étude représentée sont à télécharger sur le site web www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php ou www.arl.noaa.gov/READY.php [10]. Les données ainsi téléchargées et utilisées dans ce travail ont respectivement pour résolution spatiale et temporelle 1° et 6 heures. La période de simulation va du mois de Février 2011 au mois de janvier 2012 soit la même période durant laquelle les mesures in situ ont été effectuées.

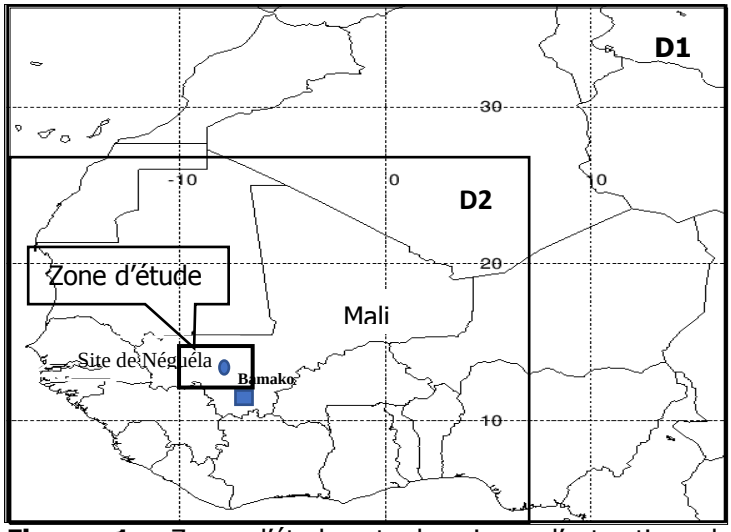

Figure 1 : Zone d'étude et domaines d'extraction des données GDAS extrait du site www.noaa.gov/READY.

La plupart des feux de biomasses dans la zone d'étude sont d'origine anthropique comme les feux de brousse provoqués accidentellement ou non par les paysans ou encore dans le cadre le transport entre autres. Il s'y pratique d'autres activités anthropiques comme la production de charbon et les combustions domestiques qui sont eux aussi susceptibles d'augmenter les concentrations des particules $PM_{2.5}$ dans l'atmosphère (**Figure 2**).

Figure 2 : Photos représentant de gauche à droite un cas de feu de forêt, une brulure de champs et un site de production de charbon dans la zone d'étude.

2.2 Description du modèle HYSPLIT :

Le modèle HYSPLIT est un système complet permettant de calculer des trajectoires simples de masses d'air, ainsi que des simulations complexes de transport, de dispersion, de transformation chimique et de dépôt de polluants gazeux ou particulaires. HYSPLIT continue d'être l'un des modèles de transport et de dispersion atmosphérique les plus largement utilisés dans la communauté des sciences de l'atmosphère. La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et le ARL (Air Resources Laboratory) sont les deux organismes qui ont développé le modèle HYSPLIT_4 [9,10].

La méthode de calcul du modèle est un hybride entre les approches eulérienne (les concentrations sont calculées pour chaque cellule de la grille en utilisant l'intégration des flux de polluants à chaque interface de cellule de la grille en raison d'advection et de diffusion) et lagrangienne (les concentrations sont calculées en additionnant la contribution de chaque polluant "bouffée" qui subit l'advection à travers la cellule de la grille représentée par sa trajectoire). Les calculs d'advection et de diffusion sont réalisés dans un cadre lagrangien tandis que les concentrations sont calculées sur une grille fixe. HYSPLIT a évolué pendant plus de 30 ans, depuis l'estimation de trajectoires simples simplifiées basées sur des observations par radiosonde jusqu'à un système qui tient compte des multiples polluants en interaction transportés, dispersés et déposés sur des échelles locales à globales [8].

Le modèle utilise des données météorologiques maillées sur l'une des trois projections cartographiques conformes (Polar, Lambert et Mercator). Le modèle de dispersion nécessite des champs de données météorologiques qui peuvent être obtenus à partir de sorties des modèles d'archives ou de prévision et les de données doivent être formatées pour l'entrée du modèle HYSPLIT. En plus, la structure interne du modèle est dotée d'un système d'interpolation interne de coordonnées lui donnant la capacité d'utiliser différentes sources de données météorologiques et de les adapter à sa grille interne [10].

Les équations de modélisation de l'atmosphère sont converties en un ensemble d'algorithmes informatiques écrits en codes Fortran, pour former le système logiciel HYSPLIT qui tourne en utilisant en entrée les sorties maillées d'un modèle de données météorologique d'archive ou de prévision. La version actuelle du modèle HYSPLIT (version 4.9) est utilisable via une interface graphique (GUI) et trois autres applications pré-installables sur système Windows, Linux ou Mac OS [14]. Des logiciels facultatifs de post traitement des sorties du modèle HYSPLIT sont aussi disponible pour faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats. Le modèle est aussi disponible en version web ou internet. La version Web a été configurée avec certaines limitations pour éviter la saturation computationnelle du serveur Web ARL [15]. La version PC avec inscription est complète sans restriction de calcul, sauf que les utilisateurs doivent obtenir leurs propres fichiers de données météorologiques. Il existe une version libre sans inscription qui est identique à la version PC avec inscription, sauf que les concentrations ne peuvent être calculées avec les fichiers de données météorologiques de prévision. Par contre, le modèle de trajectoires uniquement s'exécute sans aucune restriction en utilisant soit les données météorologiques de prévision ou d'archives avec n'importe quelle version du modèle [14]. Une description plus détaillée du modèle HYSPLIT se trouve dans Draxler et Hess 1997, 1998 et Stein and al., (2015) [8,9,10].
Dans ce travail, Le module BlueSky modélisation des feux de biomasse intégré dans HYSPLIT est activé en y entrant la surface brulée et les données du fichier de configuration permettant de calculer la dispersion des particules $PM_{2.5}$ [13]. Cette étape exige la version web du modèle HYSPLIT qui peut être aussi accessible à partir du site web de READY (Real-time Environnemental Applications and Display sYstem) [16].

2.3 Equations des trajectoires et de dispersions :

Les équations suivantes sont celles qui sont utilisées dans cette étude, d'autres peuvent être trouvées en détail dans Draxler et Hess 1997, 1998 et Stein and al., (2015) [8,9,10].
L'advection d'une particule est calculée à partir de la position moyenne du vecteur vitesse tridimensionnelle entre la position initiale P (t) et la position de première approximation P ' (t +Δ t). Les vecteurs de vitesse moyenne (V) sont interpolés linéairement dans l'espace et dans le temps. La position de première approximation est :

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5\,[(V\,(P,t) + V\,(P',t+\Delta t)]\,\Delta t \quad (1)$$

et $$P'(t+\Delta t) = P(t) + V\,(P,t)\Delta t \quad (2)$$

Pour calculer les concentrations, il est nécessaire de suivre explicitement toutes les particules ou de connaître la distribution des particules sur le trajet moyen de la trajectoire. Dans l'approche des particules, ceci est accompli en ajoutant une composante aléatoire à la vitesse d'advection moyenne pour définir la dispersion du nuage de polluants [10]. Par exemple, à l'horizontale, la dispersion des particules peut être représentée par les équations suivantes :

$$X(t+\Delta t) = X_{mean}(t+\Delta t) + U'\,(t+\Delta t)\,\Delta t \quad (3)$$

$$U'\,(t+\Delta t) = R\Delta t\,U'\,(t) + U''(1+R(\Delta t))^{1/2} \quad (4)$$

$$R(\Delta t) = \exp(-\Delta t/T_{Lx}), \quad (5)$$

$$U'' = \sigma_u \lambda \quad (6)$$

Où U' est la composante de vitesse aléatoire, X_{mean} est La position initiale due à seulement l'advection par la vitesse du Vent, R est l'autocorrélation de la vitesse turbulente, σ_u est l'écart-type de la vitesse turbulente, T_{Lx} une constante lagrangienne, et λ est un nombre généré par ordinateur compris entre 0 et une moyenne σ de valeur égale à 1.

Les calculs peuvent être simplifiés, si au lieu de modéliser le mouvement de chaque particule, nous calculons la trajectoire de la position moyenne des particules et de la distribution des particules. L'écart-type de la distribution des particules peut être calculé à partir de toutes les particules :

$$\sigma^2 = (X_i - X_m)^2 \qquad (X_i = \text{position de la particle i}, X_m = \text{position moyenne}). \quad (7)$$

La croissance de la distribution des particules, ou le mode « bouffée », est représenté par une formulation beaucoup plus simple, où le taux de croissance de l'écart-type horizontal des particules sont données par :

$$d\sigma_h/dt = (2\sigma_u)^{1/2} \quad (8)$$

Le taux de croissance dispersif des particules ou des bouffées est contrôlé par l'écart-type de la vitesse turbulente. De nombreuses formulations différentes peuvent être trouvées dans la littérature, mais une forme simplifiée est utilisée dans HYSPLIT telle que :

$$\sigma_u = (K_u / T_{L_u})^{1/2} \quad (9)$$

Où K_u représente la diffusivité turbulente et T_{Lu} une échelle de temps lagrangienne constante. Pour la turbulence verticale et dans la couche limite, K_u est fonction de la hauteur et de la stabilité de la surface.

Les concentrations dans l'air sont calculées en additionnant la masse de chaque particule lorsqu'elle passe sur la grille de concentration. Dans le mode de modèle de particules (3-D particle), la grille de concentration est traitée comme une matrice de cellules, chacune avec un volume défini par les dimensions de la grille. Par conséquent, l'incrément de concentration est juste la masse de particules divisée par le volume de la cellule de grille :

$$\Delta C = q\ (\Delta x \Delta y \Delta z)^{-1} \quad (10)$$

En mode hybride, la composante verticale du calcul de concentration est toujours calculée à partir de la profondeur de la cellule, mais à l'horizontale, la grille est maintenant composée de nœuds plutôt que de cellules et si un nœud est dans la distribution des particules, la concentration est calculée pour ce nœud. Deux distributions horizontales différentes peuvent être supposées. Dans la formulation gaussienne (GS) traditionnelle, le changement de concentration ajouté par une bouffée à chaque point de la grille serait :

$$\Delta C = q\ (\pi r^2 \Delta z)^{-1} \quad (11)$$

On peut également supposer une répartition simplifiée de la distribution (model Top Has, TH), dans laquelle le point de grille est soit dans la bouffée, soit à l'extérieur de la bouffée. Il n'y a pas de variation de concentration dans la bouffée. La concentration dans la bouffée est égale à la moyenne concentration dans la bouffée gaussienne équivalente [9].

$$\Delta C = q\ (2\pi\sigma h^2 \Delta z e^{-0{,}5x^2/\sigma h^2})^{-1} \quad (12)$$

2.4 Les mesures in situ :

Les mesures in situ ont été faites par Prihodko et al., (2012) lors d'études antérieures sur le site de Néguèla. Les équipements du site sont constitués d'une station météorologique et des capteurs de particules $PM_{2.5}$ pour la mesure des concentrations et du dépôt [6]. Les données de la station météorologique permettent de déterminer la situation climatique de la zone d'étude tandis que les capteurs de particules indiquent la charge particulaire saisonnière de la zone. Les mesures s'étendent du 28 Février 2011 au 31 Janvier 2012 ont permis d'identifier les deux saisons de la zone. La saison a été subdivisée en trois étapes et la saison pluvieuse permettent de définir quatre saisons représentées par des dates à partir desquelles HYSPLIT est configuré pour calculer et afficher les cartes de trajectoires et de dispersion [17]. Ainsi, il a été défini le début de saison sèche (DSS) en début Novembre, la mi-saison sèche (MSS) et la fin de saison sèche (FSS) correspondant à mi-avril et la mi-saison sèche qui commence à partir de fin Janvier. L'hivernage ou saison des pluies (SDP) s'installe à partir de mi-Mai est définie en second lieu. Ces périodes permettent de définir quatre dates représentatives de différentes saisons.

2.5 Configuration du modèle HYSPLIT :

Apres l'installation du logiciel, les coordonnées géographiques du site de Néguèla et la hauteur de la colonne atmosphérique entre 0 et 100m au-dessus du sol que sont configurés en premier lieu à travers son interface utilisateur graphique (GUI). Les dates représentatives des saisons, les fichiers de données météorologiques, les coordonnées géographiques du site de Neguela constituent le fichier de configuration du modèle HYSPLIT. Les fichiers donnés météorologiques couvrant la zone d'étude représentée par la figure1 sont à télécharger sur le site web www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php, puis reformaté au format GRIB (portant l'extension .bin) [10].
Les données utilisées dans ce travail sont celles de la base de données d'archive GDAS du NCEP de 1° de résolution allant de 2006 aux sept derniers jours de l'année en cours. Les données téléchargées pour les simulations vont du mois de Février 2011 au mois de janvier 2012 conformément à la période des mesures.

Tableau 1 : Dates et fichiers de données météorologiques configurés dans le modèle Hysplit pour simuler le transport et la dispersion des $PM_{2.5}$ sur le site de Néguéla.

Saisons	FSS	SDP	DSS	MSS
Dates	15 au 17 /04/2011	15 au 17 Aout 2011	06 au 08 Novembre 2011	26 au 28 Janvier 2012
Données	extract_gdas_24288w3.bin	extract_24347w3.bin	extract_gdas_24372.bin	extract_gdas_24368w4.bin

3. RESULTATS

3.1 Résultats du modèle de Trajectoire

De la localité de Néguèla considérée comme zone source, partent quatre trajectoires de 72 heures configurées en variation temporelle et à 500m au-dessus du niveau du sol [9]. La figure 3 illustre les cartes des trajectoires débutant respectivement le 18 Avril, le 17 Aout, le 08 Novembre de l'année 2011 et le 28 Janvier de l'année 2012.

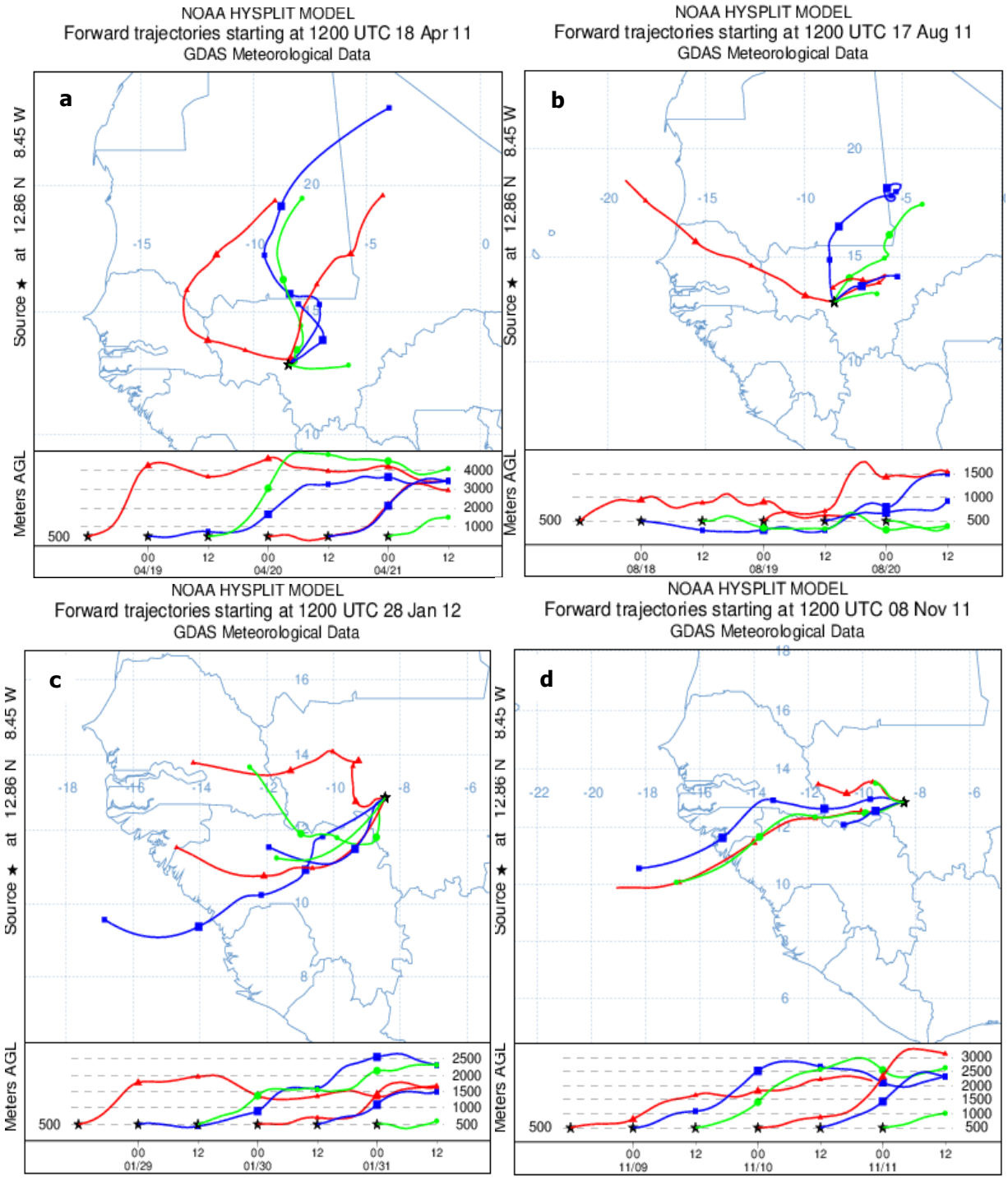

Figure 3 : Trajectoires HYSPLIT de 3 jours en variation temporelle, (a) le 17 Avril 2011 à 00H, (b) le 17 Aout 2011, (c) le 08 Novembre 2011 et (d) le 28 Janvier 2012.

3.2 Résultats du modèle de Dispersion

3.2.1 Cartes de position des particules : La position des particules aux dates du 19 Avril, 19 Aout et 08 Novembre 2011 ainsi que du 28 janvier 2012 est représentée sur les cartes de la figure suivante.

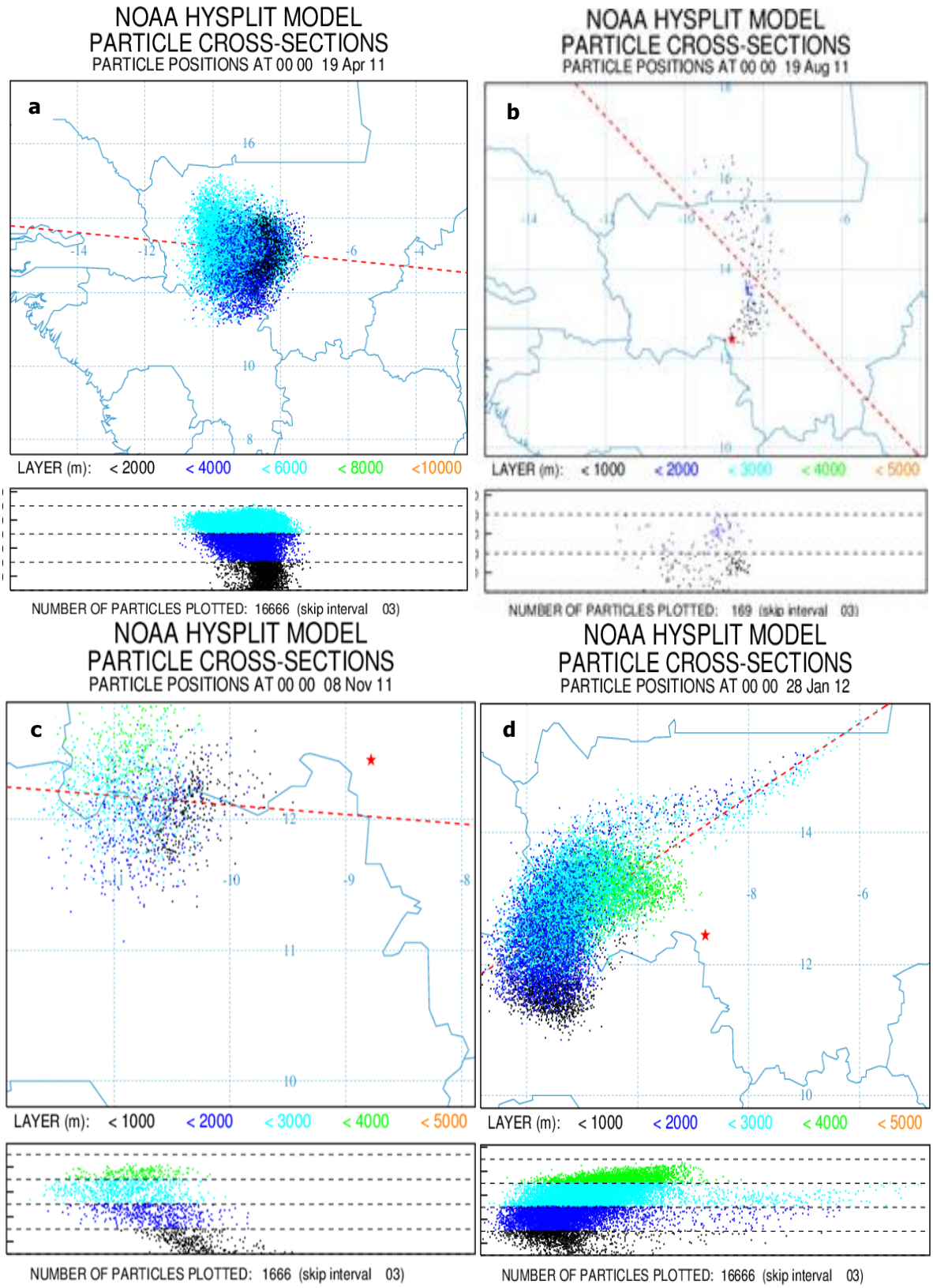

Figure 4 : Position des particules $PM_{2.5}$ après un jour brulure de biomasse : (**a**) au 19 Avril 2011 à 00H (**b**) au 18 Aout 2011 à 00H (**c**) au 09 Novembre 2011 à 00H et (**d**) au 29 Janvier 2012 à 00 Heure.

3.2.2 Cartes des concentrations aux dates représentatives : Les figures suivantes montent des pauses de l'évolution journalière des concentrations précisément aux dates représentatives des saisons, à savoir le 18 Avril, le 17 Aout, le 8 Novembre 2011 et le 28 Lanier 2012. Hormis celle du 17 Aout 2011, les autres cartes représentent les pics de concentration.

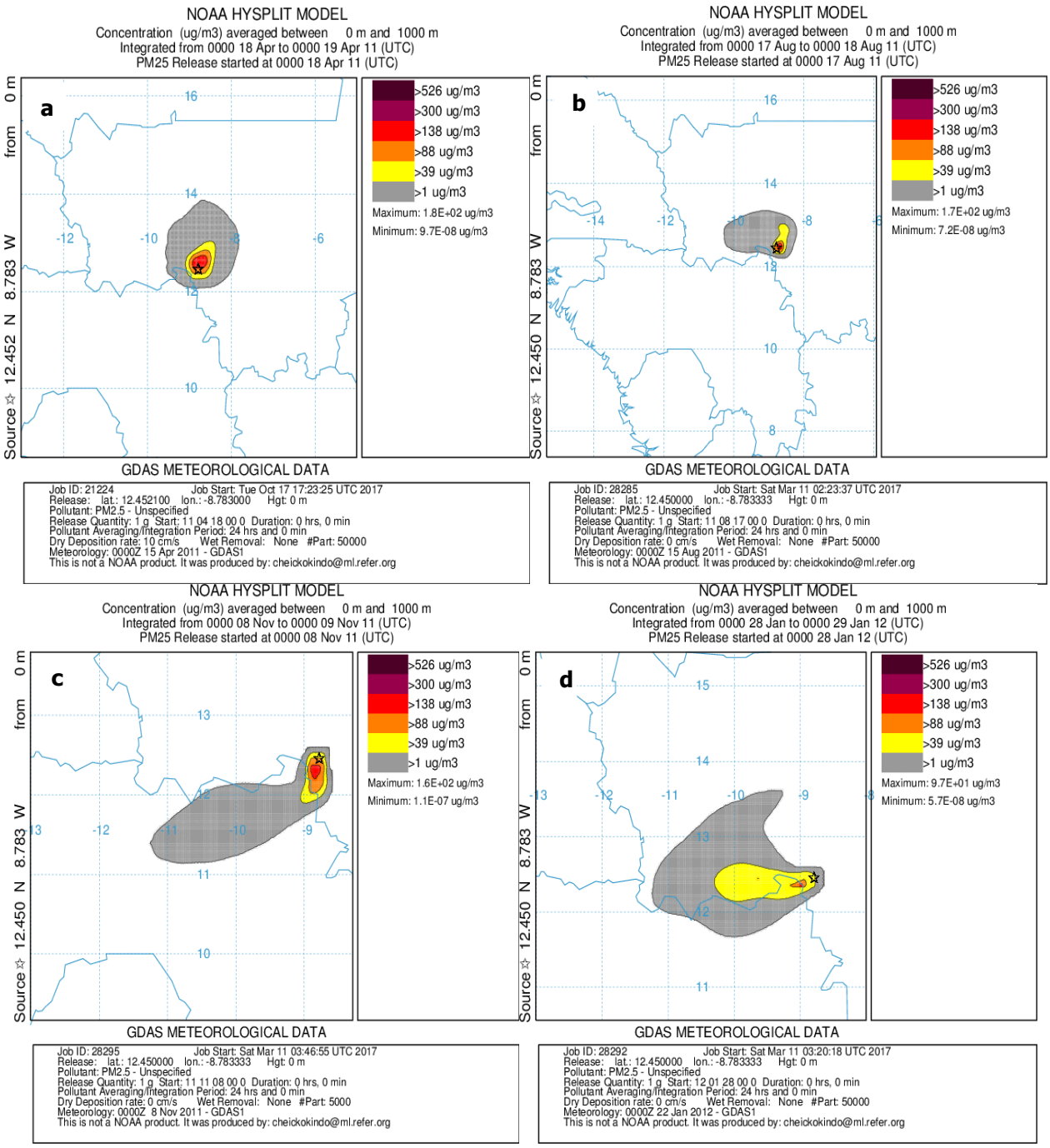

Figure 5 : Concentrations en particules d'aérosols $PM_{2.5}$ simulées sur 24 heures : (a) du 18 au 19 Avril 2011, (b) du 17 au 18 Aout 2011, (c) du 08 au 09 Novembre 2011 et (d) du 28 au 29 Janvier 2012.

3.2.3 Concentrations moyennes saisonnières : Le tableau 2 représente les concentrations moyennes saisonnières calculées par le modèle HYSPLIT lors d'une série de simulation sur la période de Février 2011 à janvier 2012 et cela, dans l'ordre de succession des saisons.

Tableau 2 : Concentrations saisonnières des $PM_{2.5}$ à Néguéla calculées (en µg/m^3)

Saisons	Nutriments	Minimums	Moyenne	Maximums
FSS	1,67	3,9	13,9	180
SDP	0,54	1,0	3,7	10,2
DSS	1,58	3,9	30	160
MSS	3,48	4,3	15,2	120
Moyenne Annelle	1.87	3,28	15,70	153,3

Ces valeurs récapitulatives représentées sous forme graphique indiquent les maximums, les minimums et les moyennes sur la même période (Figure 5) pour établir l'évolution saisonnière du maximum des concentrations.

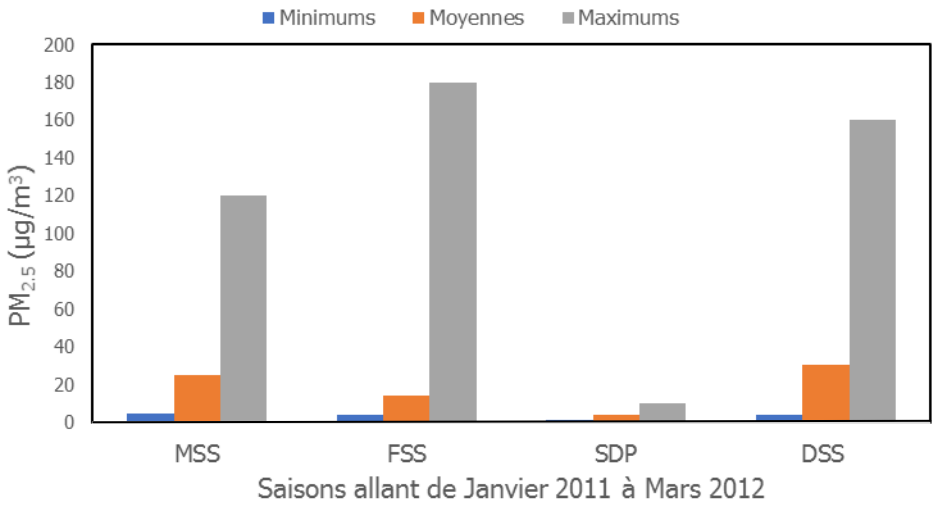

Figure 6 : Variation saisonnières des concentrations minimums moyennes et maximums en µg/m^3

3.2.4 Concentrations calculées et mesurées : Les concentrations calculées par le modèle HYSPLIT ont été superposées sur celles obtenues par les mesures in situ pour faciliter les comparaisons et l'évaluation du modèle HYSPLIT (Figure 6).

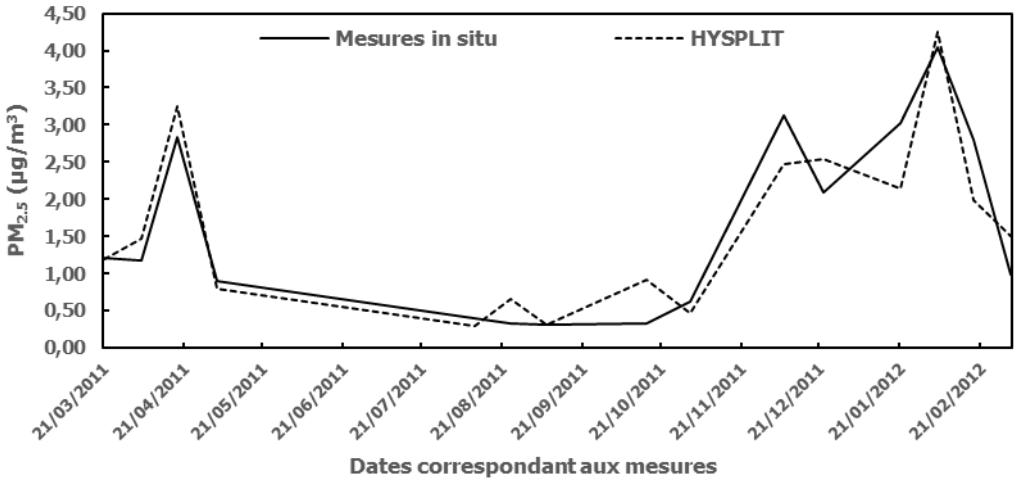

Figure 7 : Variations saisonnières des concentrations des particules $PM_{2.5}$ du modèle HYSPLIT et des mesures.

4. DISCUSSION

Les Trajectoires

Selon les allures des retrotrajectoires de la Figure 3, les particules suivent des itinéraires dépendant des saisons et des conditions météorologiques. En effet, la fumée issue des zones brulées s'élève très haut dans la troposphère. En fin de saison sèche les particules sont dispersées par le vent vers le nord-est au-delà de 4000m au-dessus de la zone d'étude (Figure 3-a). Pendant l'hivernage, toutes les activités des feux de biomasse cessent mais les masses d'air précipitantes sont dispersées au-dessus de la zone, ces masses d'air ne contiennent pas de particules de fumée. (Figure 3-b). Par contre, de Novembre jusqu'au-delà de janvier, les trajectoires sont dirigé le sud -oust de Néguèla (Figures 3-c et 3-d). Pendant cette période, sahel est envahi par les vents du nord-est qui provoquent des tempêtes transportant les particules de poussière et de fumée vers les côtes atlantiques. Ce phénomène continue jusqu'en Juin en et juillet et les tempêtes transportent les poussières jusqu'en Amérique latine [4].

La dispersion des particules

Le modèle de dispersion HYSPLIT comprend le calcul des concentrations et la position des particules (Figures 4 et 5). La concentration des particules sont plus importante en saison sèche. Les prévisions du modèle indiquent des moyennes de concentrations allant 1 à 3.9 µg/m^3 pour la contribution locale, de 3,9 à 14 µg/m^3 en période pré-hivernale et de 14 à plus de 30 µg/m^3 en saison sèche (Tableau 2). En même temps les conditions météorologiques font que particules dispersées dans l'atmosphère dispersées à plus de 300 km au sud-ouest du site de Néguèla, ce qui réduit les impacts

sanitaires. La concentration des particules de nutriments azotés et phosphatés calculées par HYSPLIT sont similaires à celles mesurées sur le site de Néguèla par Prihodko et al., (2012) [6].

La position des particules sur les cartes de la figure 5 montre la variation des concentrations d'une saison à l'autre à cause du caractère saisonnier des activités des feux de biomasse. Ainsi, en hivernage il est normal de constater moins de particules qu'en saison sèche (Figure 5-b) par rapport à la saison sèche (Figure 5-a, 5-c et 5-d). La variation saisonnière du maximum des concentrations peut donner une idée sur la fréquence des feux de biomasse sans pouvoir la déterminer. Cette dernière ne peut être déterminée que par les observations satellites ou in situ par les services des eaux et forêts. Toutefois, par analyse des histogrammes des valeurs saisonnières, on peut remarquer l'augmentation des concentrations pendant la saison sèche (Figure 6).

L'analyse statistique des résultats de calcul de la concentration des nutriments phosphatées et azotées apportés par la brulure des champs est en bonne corrélation avec les mesures in situ avec un bon coefficient de détermination (R^2=0,86) et un p-value de $3{,}55.10^{-10}$ (Figure 9-a).

Une image du satellite MODIS (MODerate Imaging Spectroradiometer) calculant les concentrations moyennes en $PM_{2.5}$ sur grille globale pour l'année 2011, montre clairement des valeurs moyennes en $PM_{2.5}$ de 1 à 5µg/m^3 pour la zone d'étude (rectangle noir). Ces résultats sont similaires aux prévisions du modèle HYSPLIT (Figure 9-b).

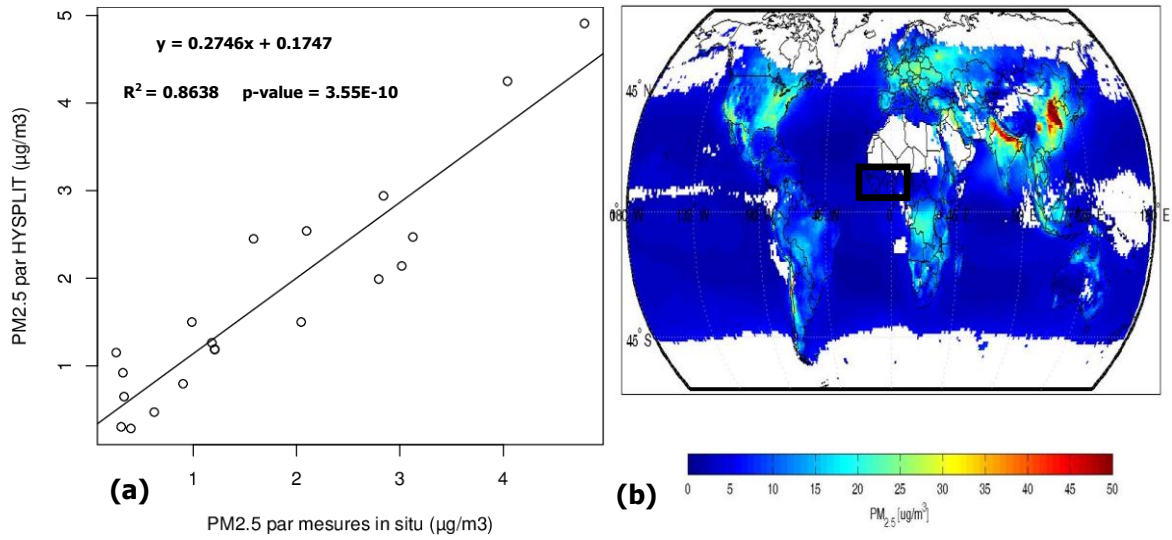

Figure 8 : **(a)** : Nuage des points et droite de régression des concentrations calculées par HYSPLIT et de celles mesurées sur le site de Néguéla. **(b)** : Image MODIS donnant les concentrations annuelles moyennes en $PM_{2.5}$ pour 2011.

Le manque de mesure continue sans interruptions sur une période plus longue qu'une année suite aux arrêts intempestifs des appareils pendant qui induisent des discontinuités dans les mesures in situ les rendant inexploitables. Cela peut constituer une limite de l'étude du fait que le modèle ne pourra être validé faute de mesures adéquates. En plus, le manque de matériels, d'instruments de mesures sophistiqués et l'inexistence de références locales et la complexité du modèle HYSPLIT sont entre autres les difficultés rencontrées au cours de ce travail de recherche.

Le fait que les résultats obtenus avec l'utilisation du modèle HYSPLIT soient en bonne corrélation avec les mesures de terrain prouve son fort pouvoir de prédiction et son applicabilité pour une première fois dans le cas du Mali. Cette étude apporte une amélioration aux connaissances en matière de modélisation de la dispersion des particules émises par les feux de biomasse dans la boucle du Baoulé au Mali. Sur un plan plus général, l'étude est notre contribution à la recherche sur les sciences de l'atmosphère et de l'environnement.

5. CONCLUSION

Ce travail a consisté à l'utilisation du modèle HYSPLIT pour calculer la dispersion des particules d'aérosols $PM_{2.5}$ émises lors des feux de biomasse sur le site de Néguèla, dans la boucle du Baoulé au Mali. L'analyse des cartes de trajectoires et de montre que les feux de biomasse sont fréquents essentiellement en saison sèche, pour atteindre le maximum en fin de saison sèche et début d'hivernage. Cela à cause de feux de brousse provoqués par la population pour l'agriculture qui a un aspect positif dans le cas d'un apport en azote en, phosphore, et en potassium (NPK). Les concentrations des particules $PM_{2.5}$ estimées par le modèle (1 à 5µg/m^3) sont en bon accord avec les mesures in situ. Le modèle HYSPLIT a un fort pouvoir de prédiction. La validation du modèle nécessite l'installation de station météorologique, de station de

contrôle de la qualité de l'air et de station de mesure de dépôt de particules. La précision du modèle dépend essentiellement de la consistance des données météorologiques utilisées.

En perspective, nous envisageons appliquer le modèle HYSPLIT pour simuler le dépôt des particules $PM_{2.5}$ émisses avec la fumée des feux de biomasse sur le même site et valider les résultats des simulations par les mesures in situ. Du fait que le Mali est un pays sahélien riverain du Sahara, nous envisageons également appliquer le modèle HYSPLIT pour simuler les tempêtes de poussières sur le Mali pour prévenir leurs impacts sur la santé.

Reconnaissance

Nos remerciements vont à l'endroit du programme Suédois International Sciences Programme (ISP) pour le financement de ce travail de recherche, du NCEP pour la disponibilité permanente des données de la NOAA et de l'ARL pour la conception et la mise à jour du modèle HYSPLIT.

6. REFERENCES

1. Jalil Jaafari, Kazem Naddafi, Masud Yunesian , Ramin Nabizadeh, Mohammad Sadegh Hassanvand, Mohammad Ghanbari Ghozikali, show all. Study of PM_{10}, $PM_{2.5}$, and PM_1 levels in during dust storms and local air pollution events in urban and rural sites in Tehran. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. Volume 24, 2018 - Issue 2 Pages 482-493.
2. Hassan Bismarck NACRO. Le feu de brousse, un facteur de reproduction des écosystèmes de savanes à dominance herbacées à Lamto (Côte d'Ivoire) ? Institut du Développement Rural Université Polytechnique de Bobo 01 B.P. 1091 Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. *Sciences et Médecine, Rev. CAMES - Série A*. 2003 ; Vol 02.
3. 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).
4.Multimedia (Total video Converter). S.C. Cometta, V.J. Dasa, O.Y. Rincon, R.A. Serrano. Intrusion of African dust in Colombia on June 27, 2014. Case study: Bogota. Dynamics of physicochemical and biological processes, November 2015. National University of Colombia.
5. Chambra M. Lakshmanan et Harold E. Hoelscher. Production of Levoglucosan by Pyrolysis of Carbohydrates. Pyrolysis in Hot Inert Gas Stream. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. 1970; 9:57. Available on: DOI 10.1021/i360033a011.
6. Prihodko Lara, Youry Desyaterik, Abdramane Ba, Oumar Maiga. Nutrient subsidies in a West African savanna: Assessing teleconnections through fire and dust contribution, ETBC report, 2012.
7. A. C. Aiken, B. De Foy, C. Wiedinmyer, P. F. Decarlo, I. M. Ulbrich, M. N. Wehrli, S. Szidat, A. S. H. Prevot et J. Noda, « *Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) – Part 2: Analysis of the biomass burning contribution and the non-fossil carbon fraction*. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010; 10(12):5315. DOI 10.5194/acp-10-5315-2010.
8. Stein, A.F., Draxler, R.R, Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc*. 2015; 96: 2059-2077. Available on: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1
9. Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1998: An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 47, 295-308.
10. Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1997: Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 24 pp.
11. Larkin, N.K., S.M. O'Neill, R. Soloman, C. Krull, S. Raffuse, M. Rorig, J. Peterson, and S. Ferguson. The BlueSky Smoke Modeling Framework. Published to *International Journal of Wildland Fire*, 2009; Vol. 18 issue (8), P. 906-920.
12. O'Neill, S.M., and Coauthors. Regional real-time smoke prediction systems. Wildland Fires and Air Pollution, A. Bytnerowicz et al., Eds., *Developments in Environmental Science Series*. Elsevier 2008 ;8 : 499-534.
13 Glenn D. Rolph, Roland R. Draxler, Ariel F. Stein, Albion Taylor, Mark G. Ruminski, Shobha Kondragunta, Jian Zeng, Ho-Chun Huang, Geoffrey Manikin, Jeffery T. McQueen, and Paula M. Davidson. Description and Verification of the NOAA Smoke Forecasting System: The 2007 Fire Season Weather and Forecasting. American Meteorological Society (AMS) Journal, 2009; 24:361-378. https://doi.org/10.1175/2008WAF2222165.1
14. Draxler, R.R., 2018: HYSPLIT4 user's guide. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
15. Draxler, R. R. and G. D. Rolph, 2018: HYSPLIT-Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model. Silver Spring. Available on: http://www.arl.noaa.gov/ready/ hysplit4html.
16. Glenn Rolph, Ariel Stein, Barbara Stunder, 2017. Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. National Oceanic and Atmospheric Administration, Air Resources Laboratory, NCWCP/RARL, 5830 University Research Ct., College Park, MD 20740, USA. Available: Environmental Modelling & Software journal home page: www.elsevier.com/locate/envsoft.
17. Victor Ongoma1, George Otieno, Onyango Augustine Omondi. An investigation of the transport and dispersion of atmospheric pollutants over Nairobi City. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences*. 2014; 1:10. ISSN: 2313-8629.

Cite this article: Cheick Oumar Kindo, Cheick Diarra et Abdramane Ba. SIMULATION DE LA DISPERSION DES AEROSOLS DES FEUX DE BIOMASSE DANS LA BOUCLE DU BAOULE AU MALI PAR LE MODELE HYSPLIT *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2017; 6(4): 180-190.

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/