

Simulation par le modèle HYSPLIT du transport des aérosols des feux de biomasse dans la boucle du Baoulé au Mali

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), BP E3206 Bamako, Mali

* Correspondance, courriel : cheickokindo@gmail.com

Résumé

Dans cette étude, le modèle HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) est utilisé pour simuler le transport des particules d'aérosols $PM_{2.5}$ émises par les feux de biomasse, dans la boucle du Baoulé, à partir de la localité de Négoula au Mali. Cette simulation se fait à travers le calcul et la méthode d'attribution des sources par analyse de retrotrajectoires en configuration spatio-temporelle. Les feux de biomasse sont localisés le long des retrotrajectoires. Les activités des feux de biomasse dans la zone sont observées essentiellement en saison sèche pour s'estomper à l'installation de l'hivernage. Du début à la mi-saison sèche, la poussière minérale est mélangée à la fumée et aux cendres des feux de forêts et transportées par les vents du nord-est (Harmattan), ce qui fait que les particules $PM_{2.5}$ détectées par le modèle HYSPLIT ont une provenance de vers le nord de Négoula. La fin de la saison sèche est marquée par transport et la dispersion des particules $PM_{2.5}$ par les vents du sud-ouest (Mousson), ce qui fait qu'elles proviennent de vers plusieurs zones comme le nord du Bénin jusqu'aux environs de Négoula en passant par le nord du Ghana, du Burkina et surtout de la Guinée, de la Côte d'Ivoire, et du sud du Mali. En effet, c'est la période de la brûlure des champs par les paysans pour défricher les champs afin de les préparer pour l'agriculture dans presque toute la sous-région. Cette pratique est en fait, une méthode de fertilisation des sols en nutriments de base, car les cendres et les particules dans la fumée sont riches en azote (N), en phosphore (P) et en potassium (K), ce qui améliore les rendements agricoles. L'étude a montré que le modèle HYSPLIT en configuration spatio-temporelle donne des résultats précis du fait de l'identité des sources attribuées aux particules $PM_{2.5}$.

Mots-clés : *HYSPLIT, feux de biomasse, $PM_{2.5}$, retrotrajectoires.*

Abstract

Simulation by the HYSPLIT model of aerosol transport of biomass fires in the Baoulé loop in Mali

In this study, the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model is used to simulate the transport of $PM_{2.5}$ aerosol particles from biomass fires in the Baoulé loop from the locality of Négoula in Mali. This simulation is done through the calculation and the source-attribution method by backward trajectory analysis in time and space configuration. Biomass fires are located along backward trajectories. The activities of the biomass fires in the area are observed mainly in the dry season to fade at the installation of wintering.

From the early to mid-dry season, mineral dust is mixed with smoke and ash from forest fires and transported by north-east winds (Harmattan), so that $PM_{2.5}$ particles detected by HYSPLIT model have a provenance from north of Négoula. The end of the dry season is marked by transport and dispersion of $PM_{2.5}$ particles by south-westerly winds (Monsoon), which means that they come from several areas such as northern Benin to Négoula passing through northern Ghana, Burkina Faso and especially Guinea, Côte d'Ivoire, and southern Mali. Indeed, it is the period of burning fields by farmers to clear the fields to prepare them for agriculture in most of the sub-region. This practice is actually a method of fertilizing soils with basic nutrients, since ash and smoke particles are rich in nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), which improves agricultural yields. The study showed that the HYSPLIT model in time and space configuration gives precise results due to the identity of the sources attributed to $PM_{2.5}$ particles.

Keywords : *HYSPLIT, biomass fires, $PM_{2.5}$, backward trajectories.*

1. Introduction

Les feux de biomasse et les poussières minérales sont d'importantes sources d'émission de matières particulaires en suspension dans l'atmosphère appelées aérosols et qui y séjournent plusieurs heures au moins [1]. Les aérosols des feux de biomasse sont considérés comme particules de matière (Particulate Matter) et sont caractérisés par leur taille ou diamètre qui est inférieure à $2,5 \mu m$, d'où leur appellation de $PM_{2.5}$ [2]. La composition chimique et la concentration de ces aérosols dépendent de la situation géographique et des conditions météorologiques [3]. Pour l'amélioration des connaissances sur ces types d'aérosols, plusieurs méthodes d'étude et d'observations comme les mesures in situ, la télédétection à partir du sol ou de l'espace et la modélisation sont utilisées [4]. Les feux de biomasse en Afrique sub-saharienne sont le plus souvent considérés comme des aléas néfastes pour l'environnement [5, 6]. Les feux incontrôlés peuvent aussi induire une perte de la biomasse végétale [7]. Dans les savanes tropicales en particulier, il est établi que les feux itératifs ont une influence néfaste sur la durabilité des ressources et services écologiques [8]. Les incendies exposent ainsi le sol à l'érosion et augmentent la charge atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) et polluants de toute sorte [9]. Pourtant il est maintenant avéré que ces mêmes feux participent, dans ces espaces tropicaux, à la structuration de la végétation des savanes [10]. Loin d'être aléatoires, ces feux sont même intégrés dans le rythme de la vie sociale et culturelle des populations [11, 12].

Bien que les feux de biomasse aient des impacts négatifs sur le plan climatologique et sanitaire, ils peuvent avoir des impacts positifs pour l'agriculture dans le cas d'un apport en nutriments nitrates et phosphatés [13]. Le potassium se trouve dans la cendre de bois, qui peut par ailleurs contenir des métaux lourds, ou des radionucléides dans certaines régions [14]. En effet, les feux réglementent ainsi dans le temps et dans l'espace la production et la disponibilité de la biomasse végétale, ressource de base pour les besoins et des populations humaines et de la faune [15 - 17]. Dans la région ouest africaine, la concentration des particules des fumées est augmentée par le transport de la poussière minérale par le vent en saison sèche [1]. Dans la boucle du Baoulé, Prihodko et al., 2012 lors d'études basée sur des mesures in situ a révélé la présence du lévoglucosan, de deux types de gaz (NO_2 et NH_4) et de particules $PM_{2.5}$ dont les analyses de leurs compositions chimiques ont mis en évidence la présence de quelques carbohydrates, de substances azotées et phosphatées (PO_4 , NO_2 , NH_4 , NH_3) et du calcium (Ca) [18]. Le lévoglucosan ($C_6H_{10}O_5$) 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 $PM_{2.5}$ en suspension [19]. Tout comme d'autres traceurs tel que 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 [20]. Le calcium est d'autre part considéré comme un traceur de substance minérale comme la poussière saharienne. Ainsi, ces études ont prouvé une provenance

saharienne de certaines particules $PM_{2.5}$ dans la boucle du Baoulé pendant la saisons sèche [18]. La modélisation numérique du transport, de la dispersion du dépôt et de la transformation chimique des aérosols des feux de biomasses a considérablement contribué à l'amélioration des connaissances sur leurs propriétés globales [21]. Plusieurs modèles ont été développés à cet effet dont HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) qui est l'un des modèles les plus utilisés pour l'étude et l'observation de la dispersion des aérosols atmosphériques [22]. L'une des applications les plus courantes de modèle HYSPLIT est l'analyse de retrorajectoire pour déterminer l'origine des masses d'air chargées de particules afin d'établir des relations entre source et récepteur de particules [23]. Dans ce travail, pour une première fois, cette application du modèle HYSPLIT est utilisée pour localiser les feux de biomasse dans la boucle du baoulé au Mali en simulant le transport des aérosols de la fumée émise dans l'atmosphère par ces combustions. Cette localisation consiste à la détermination de la source de provenance des particules $PM_{2.5}$ à travers l'analyse des cartes de retrorajectiores calculées par HYSPLIT afin de confirmer ou non la provenance des particules $PM_{2.5}$ évoquée par Prihodko et al., 2012.

2. Méthodologie

2-1. Zone d'étude

La boucle du Baoulé est une zone au climat et végétation de type soudano-guinéenne où une forêt classée a été érigée et où se situe la localité de Néguela (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. La **Figure 1** donne une cartographie des domaines d'extraction des fichiers de données météorologiques constituant l'entrée du modèle HYSPLIT incluant la zone d'étude. Les fichiers de données GDAS extraits sur un premier domaine D1 compris entre -20° et 20° de longitude et 5° à 35° de latitude et un second D2 compris entre -20° à 5° de longitude et de 5° à 28° de latitude pour mieux simuler l'évolution de particules. La boucle du Boulé est une zone de forêt classée où se situe la localité de Neguela. Les fichiers 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 permettent à partir de ces champs basiques de calculer les autres grandeurs météorologiques le long des trajectoires tel que l'humidité relative et spécifique, la pression, la hauteur du relief par rapport au niveau de la mer et la radiation solaire [24]. Les fichiers donnés météorologiques couvrant la zone d'étude représentées par la **Figure 1** sont à télécharger sur le site web www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php, puis reformaté au format GRIB (GRidded Information in Binary) [25]. 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.

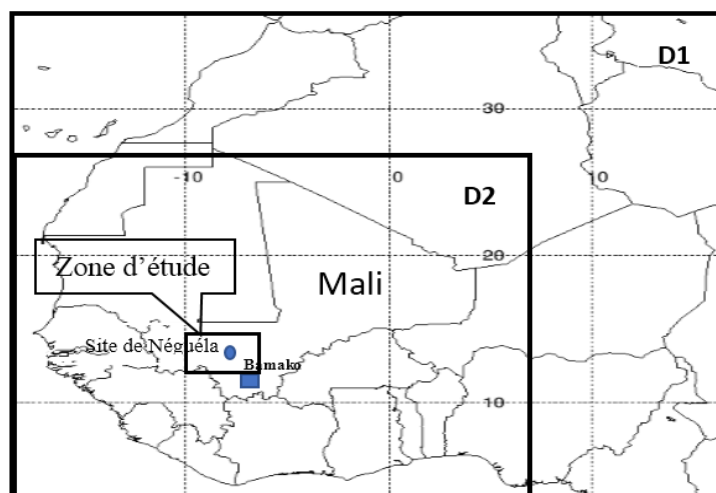


Figure 1 : Zone d'étude et domaines d'extraction des données GDAS sur le site www.noaa.gov/READY

La plupart des feux de biomasses dans la zone d'étude sont d'origine anthropique comme les feux de brousse provoqués accidentellement par les paysans ou 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 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, un site de production de charbon et un cas de combustion domestique 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 [26]. La méthode de calcul du modèle est basée sur l'approche lagrangienne et l'approche eulérienne. L'approche lagrangienne utilise un cadre de référence mobile pour les calculs d'advection et de diffusion lorsque les trajectoires ou les masses d'air se déplacent depuis leur position initiale. L'approche eulérienne, utilise une grille tridimensionnelle fixe comme cadre de référence pour calculer concentrations polluant dans la masse d'air contenue dans le volume de la cellule grille du modèle. Autrement dit, le calcul de trajectoire se fait dans référentiel lagrangien tandis que les concentrations sont calculées sur une grille fixe considérée comme référentiel. D'où le caractère hybride du modèle [22]. Le modèle utilise des données météorologiques maillées sur l'une des trois projections cartographiques conformes (Polar, Lambert et Mercator) [25]. 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 données doivent être formatées pour l'entrée du modèle HYSPLIT [24]. 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. Une description plus détaillée du modèle HYSPLIT se trouve dans Stein et al., 2015, Draxler et Hess 1998, 1997 [22 - 25]. 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 via une interface graphique (GUI) et trois autres applications pré-installables sur système Windows, Linux ou Mac OS [26]. Des logiciels facultatifs de post traitement des sorties du modèle HYSPLIT sont disponible pour faciliter 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 [27]. La version PC avec inscription est complète sans restriction de calcul, sauf que les utilisateurs doivent télécharger leurs propres fichiers de données météorologiques. Cette version peut être utilisée sans inscription, sauf qu'elle ne permet pas le calcul des concentrations avec des 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 [25]. Dans ce travail, tous les calculs de retrotrajectoires sont effectués par la version PC sous Windows avec inscription sur serveur Web ARL.

2-3. Équations du modèle lagrangien de trajectoire HYSPLIT

La méthodologie lagrangienne, consiste à suivre le mouvement de chaque particule. Dans ce cas, les concentrations se calculent en additionnant la contribution de chaque particule de polluant qui se déplace sur la grille en suivant sa propre trajectoire [22]. L'approche lagrangienne de particules est résumée par l'Équation suivante :

$$\frac{dC}{dt} = K_x \frac{\partial^2 C}{x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{z^2} + \text{sources} - \text{puits} \quad (1)$$

où, C représente la concentration volumique des particules d'aérosols (en particules par m^3 ou $\mu g/m^3$) et K_x , K_y et K_z sont des coefficients de diffusion (exprimés en m^2/s).

Pour calculer la trajectoire moyenne des particules, on suit une seule particule. L'advection de cette particule de l'instant t à l'instant $t+\Delta t$ (en heures) est calculée à partir de la moyenne des vecteurs de vitesse tridimensionnelle de la position initiale $P(t)$ à la position finale $P(t+\Delta t)$ en passant par une position de première approximation $P'(t+\Delta t)$. Les vecteurs de vitesse moyenne (V) sont interpolés linéairement dans l'espace et dans le temps. La position de première approximation est :

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

et la position finale intégrée comme suit :

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t, \quad (3)$$

Le pas de temps de l'intégration (Δt) peut varier pendant la simulation. Il est calculé à partir de l'exigence que la distance d'advection par pas de temps devrait être inférieure à l'espacement de la grille. La rapidité du transport maximale de particules est déterminée à partir de la vitesse de transport maximale U_{max} pendant l'heure précédente. Les pas de temps peuvent varier de 1 minute à 1 heure et sont calculés à partir de la relation,

$$U_{max}(\text{unité de grille. min}^{-1})\Delta t(\text{min}) < 0.75 (\text{unité de grille}). \quad (4)$$

Suivant la direction horizontale de la grille, l'intégration du vecteur position se fait en unités de grille, tandis que dans sa direction verticale, un système de coordonnées sigma normalisé est utilisé pour l'intégration [22]. L'Équation de ce système de coordonnées sigma est :

$$\sigma = \frac{Z_{top} - Z_{msl}}{Z_{top} - Z_{gl}}, \quad (5)$$

où Z_{msl} est la hauteur à partir du niveau moyen de la mer à convertir en sigma, Z_{gl} est la hauteur à partir du niveau du sol et Z_{top} définit la hauteur d'échelle du sommet du modèle, la hauteur à laquelle les surfaces sigma internes s'aplatissent par rapport au terrain [25]. La hauteur de mise à l'échelle interne est définie sur 25 km. Cette valeur est utilisée avec le paramètre par défaut du modèle qui est de 10 km pour la plupart des applications PBLH (Planetary Boundary Layer Height) dans le fichier de configuration du modèle appelé

CONTROL qui définit la limite verticale de la grille météorologique interne. L'autre fichier de configuration du modèle est appelé SETUP qui permet de tracer une trajectoire par intervalle de temps [26].

2-4. Méthode d'attribution de source à l'aide de l'analyse de retrotrajectoires

Pour le modèle HYSPLIT, une trajectoire (Forward Trajectory) décrit dans le temps et dans l'espace, la dispersion par le vent d'une quantité de polluants (particules ou gaz) émise dans l'atmosphère à partir d'un emplacement géographique (Source). Tandis qu'une retrotrajectoire (Backward Trajectory) permet de détecter la source de provenance de masses transportées par le vent vers un emplacement géographique (Récepteur) en remontant le temps [22]. Souvent, il est nécessaire d'attribuer une mesure de polluants à un emplacement source spécifique. Une approche consiste à calculer une simple retrotrajectoire pour déterminer l'origine du polluant. Bien qu'il soit peu fréquent de voir les sources identifiées par une seule retrotrajectoire, les incertitudes inhérentes à une retrotrajectoire unique peuvent anticiper son utilité [24]. Une façon de réduire ces incertitudes serait de calculer plusieurs retrotrajectoires, en hauteur, en temps et en espace. La configuration des retrotrajectoires en hauteur se fait en faisant varier les hauteurs au-dessus de point final [25]. Dans la configuration en variation spatiale, la hauteur est fixée au-dessus du récepteur des retrotrajectoires, mais trois à quatre points supplémentaires décalés de 0,5 à 1 degré sont défini tout autour. En fin, la configuration dans le temps consiste à fixer le point final et démarrer une retrotrajectoire à un intervalle de temps fixé inférieure ou égale à la durée des trajectoires exprimée en heures [26]. Dans ce travail, nous avons configuré quatre retrotrajectoires de 72 heures à des hauteurs respectives de 500m, 1000m, 1500m et 2000m au-dessus du sol ; cinq retrotrajectoires de 120 heures avec une hauteur fixée à 500m et quatre sources supplémentaires décalées de 1 degré en latitude et en longitude autour de Négoula. La dernière configuration consiste à faire démarrer une retrotrajectoire toutes les 24 heures sur une durée totale de 120 heures et une hauteur fixe de 500m. Cette configuration se fait dans le fichier SETUP.

2-5. Configuration du modèle HYSPLIT

Après l'installation du logiciel, les dates représentatives des saisons sont définies selon la climatologie de la zone d'étude [28]. Quatre dates sont définies à cet effet pour différentes saisons et selon les pics de concentrations constatés dans les mesures in situ. Ces pics sont dus à la climatologie de et aux conditions météorologiques de la zone. Ces quatre dates sont : la fin de saison sèche ou début d'hivernage (FSS), de la saison des pluies ou hivernage (SDP), de la mi-saison sèche (MSS) et le début de saison sèche (DSS). Les coordonnées géographiques du site de Négoula et la hauteur de la colonne atmosphérique sont configurées à la suite à travers son interface utilisateur graphique (GUI) du modèle. La configuration se termine par la sélection des données météorologiques correspondants à chaque saison (*Tableau 1*).

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

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

3. Résultats et discussion

3-1. Retrotrajectoires en hauteur

La **Figure 3** montre des retrotrajectoires pour les quatre périodes saisonnières définies plus haut configurées en utilisant le premier cas de variation en hauteur. Une source de feux de biomasse peut se trouver le long de chaque retrotrajectoire. Les retrotrajectoires de la fin de saison sèche montrent plusieurs zones sources (**Figure 3-a**). Selon les allures des retrotrajectoires de cette carte, les particules situées entre 1000 et 1500m au-dessus du site de Néguela proviennent du l'est de la zone d'étude en partant depuis le nord-est du Burkina, du Ghana ainsi que de l'ouest de la Côte d'Ivoire. Les particules PM_{2.5} situées à une hauteur comprise entre 0 et 500 m au-dessus du sol proviennent des alentours de Néguela aux côtes de la Guinée et de Sierra Leone. Autrement dit, en période pré hivernale, HYSPLIT détecte une dispersion par la mousson de particules d'aérosol de feux de biomasse dans toute la région soudano-guinéenne ouest africains. C'est une période de brulure de biomasse comme évoquée dans Prihodko et al., 2012 car la concentration du lévoglucosan et les autres gaz traceurs sont des pics [18]. C'est la période, de brulure des broussailles, une activité menée par la population à des fins agricoles dans la boucle du baoulé comme dans toute les zones où se pratique l'agriculture saisonnière. La cendre et les particules qui vont subir par le processus de dépôt sec et humides, sont d'un apport important en nutriment de base comme le phosphore, le potassium et l'azote [14].

Le constat est clair que rendement agricole est plus faible chez un paysan qui n'a pas brûlé son champ avant le labour et la semence qu'un autre ayant brûlé le sien. Sur les retrotrajectoires de la **Figure 3-b**, on observe trois dont les point de départ sont situés dans l'océan (en couleur rouge, vert et bleu) et un formant des boucles au-dessus de la zone d'étude (en couleur bleu clair). Les retrotrajectoires ont tous commencé le 12 Aout 2011 à 00 heures (UTC) pour terminer le 17 aout 2011 à 00 heures (UTC). La retrotrajectoire rouge et celle en bleu clair ont leur point de départ situé trop bas sur la surface de l'océan (moins de 100m). En qui signifie un transport de masse d'air humidifiées par évaporation et évapotranspiration. En plus la station météorologique du site a indiqué des hauteurs importantes de pluies au cours de ces cinq jours de simulation [18]. Il n'y a pas de brulure de biomasse en cette période, même si les échantillons d'eau de pluies collectés au sol sur le site montrent une augmentation de la concentration du lévoglucosane. Les masses d'air détectée par HYSPLIT transportent nom pas de particules mais de la vapeur d'eau qui par condensation sur la surfaces des particules se transforment en gouttelettes de pluies tombant sous leur propre poids. En effet HYSPLIT contient une configuration qui peut estimer les hauteurs de pluies et le taux de dépôt humide ne faisant pas l'objet de cette étude.

La saison des pluies est une période de dépôt humide et de lessivage de l'atmosphère. On remarque également que le taux de lévoglucosan diminue à mesure que la saison des pluies s'installe. Ceci confirme que les feux de biomasse se déroulent essentiellement en saison sèche. La carte de retrotrajectoires de la **Figure 3-c** montre des zones sources situées au nord-est de Néguela passant tous par le bassin de Taoudéni. Les mesures de dépôts dans les échantillons collectés sur le site montrent des pics dans la concentration de lévoglucosane et des particules PM_{2.5}, indiquant une combustion de biomasse. Les mesures montrent également des pics dans les concentrations de calcium (Ca) et de phosphore (P), indiquant une source de poussière minérale [13]. La poussière minérale provient du Sahara comme indiquée sur la carte. Le modèle HYSPLIT montre ainsi le potentiel de transport de la poussière minérale émise par régions arides du Mali comme le bassin de Taoudéni. Ces régions arides et désertiques sont des réservoirs de roches phosphatées de très forte concentration en phosphore [4]. Les trajectoires de mi saison sèche (**Figure 3-d**) montrent un trajet de transport plus au nord. Les mesures des échantillons de dépôt indiquent une combustion de la biomasse [18]. Cette période est la saison des vents du nord-est (harmattan) qui soufflent de manière quasi constante et transportant une grande quantité de poussières mélangées aux fumées des feux du au Sahel.

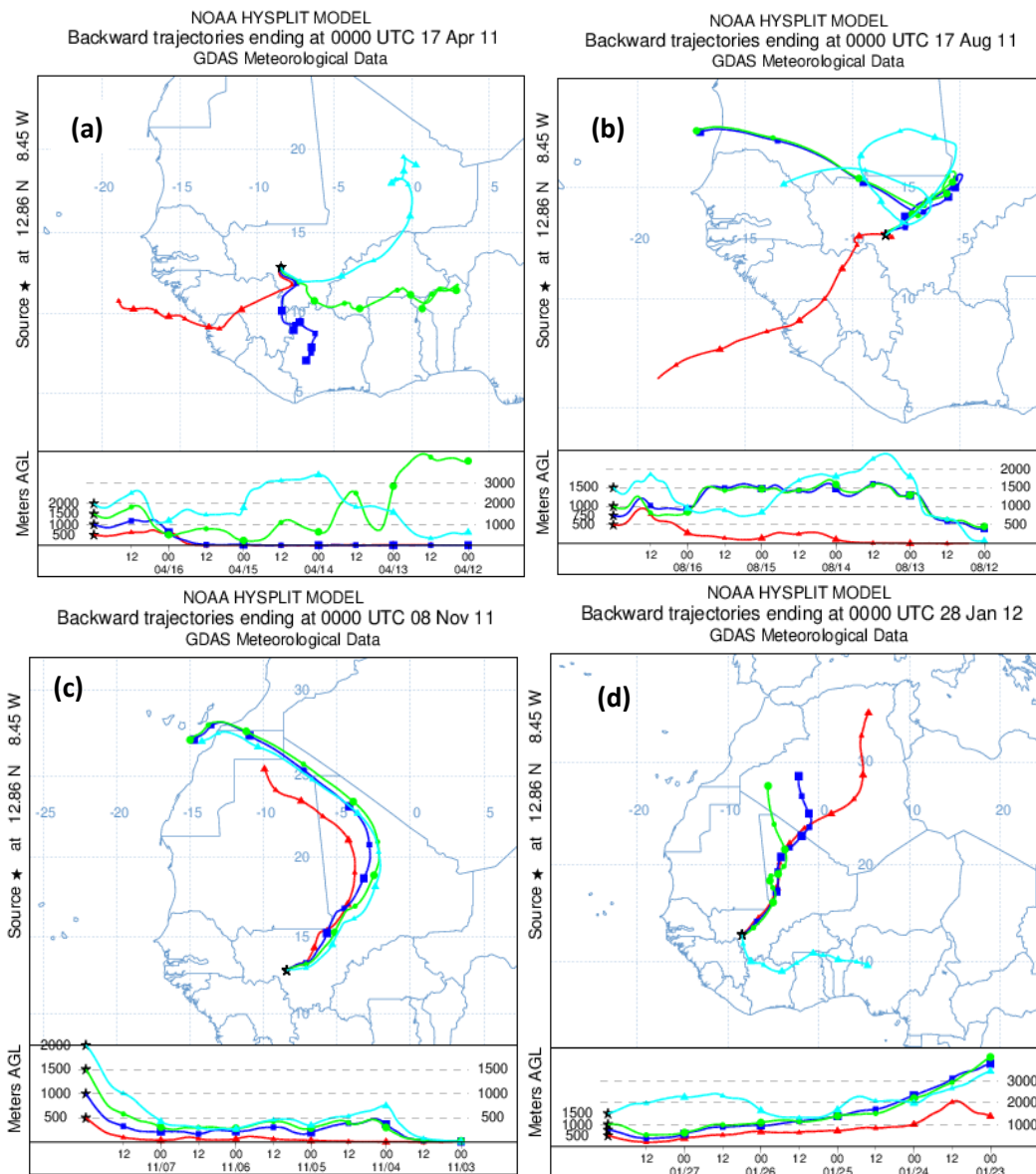


Figure 3 : *Retrotrajectoires HYSPLIT de 3 jours en hauteurs de point final Nguéla, (a) le 17 Avril 2011 à 00H, (b) le 17 Aout 2011, (c) le 08 Novembre 2011 et (d) le 28 Janvier 2012*

3-2. Retrotrajectoires dans l'espace

C'est le deuxième type de configuration dans l'attribution de source et consiste à examiner la sensibilité spatiale des retrotrajectoires (**Figure 4**). Dans cette simulation, nous pourrions exécuter un ensemble de trajectoires, mais à la place, définir quatre points de départ supplémentaires décalés de 1 degré autour de Nguéla afin qu'on puisse voir comment les retrotrajectoires se comportent à proximité récepteur dans la boucle du Baoulé. Sur la **Figure 4-a**, les quatre localités situées à plus de 100km autour de Nguéla présentent des retrotrajectoires de mêmes allures et approximativement de même itinéraires que le cas de la variation en hauteur. A la différence que la trajectoire qui a commencé le 14 Avril 2011 à 12H (UTC) au centre Ouest de la cote d'ivoire avait culminé à plus de 1000m le 15 Avril à 12H au nord de la cote d'ivoire avant de redescendre à 500m plus de 100km à l'est de Nguéla. Dans le cas des retrotrajectoires de la **Figure 4-b**, les trois premières qui ont commencé depuis le respectivement le 12 Aout à 00H UTC et le 13 Aout à 00H UTC vont du sud du Sénégal et de l'atlantique pour respectivement traverser la Guinée et l'est du Sénégal.

Hormis ce cas, on peut affirmer que la sensibilité spatiale n'influe pas beaucoup sur l'allure des retrotrajectoires observées dans le cas de la configuration en hauteur. En début de saison sèche, la provenance des particules se situe au nord de la boucle du Baoulé à l'exception d'une seule retrotrajectoire provenant de sud de la Côte d'Ivoire (*Figure 4-c*). Ce qui peut s'expliquer par le fait que la saison des pluies peut s'étendre jusqu'en début Novembre dans la zone d'étude. Par contre l'itinéraire des retrotrajectoires confirme la provenance saharienne et sahélienne des particules en mi-saison sèche (*Figure 4-d*).

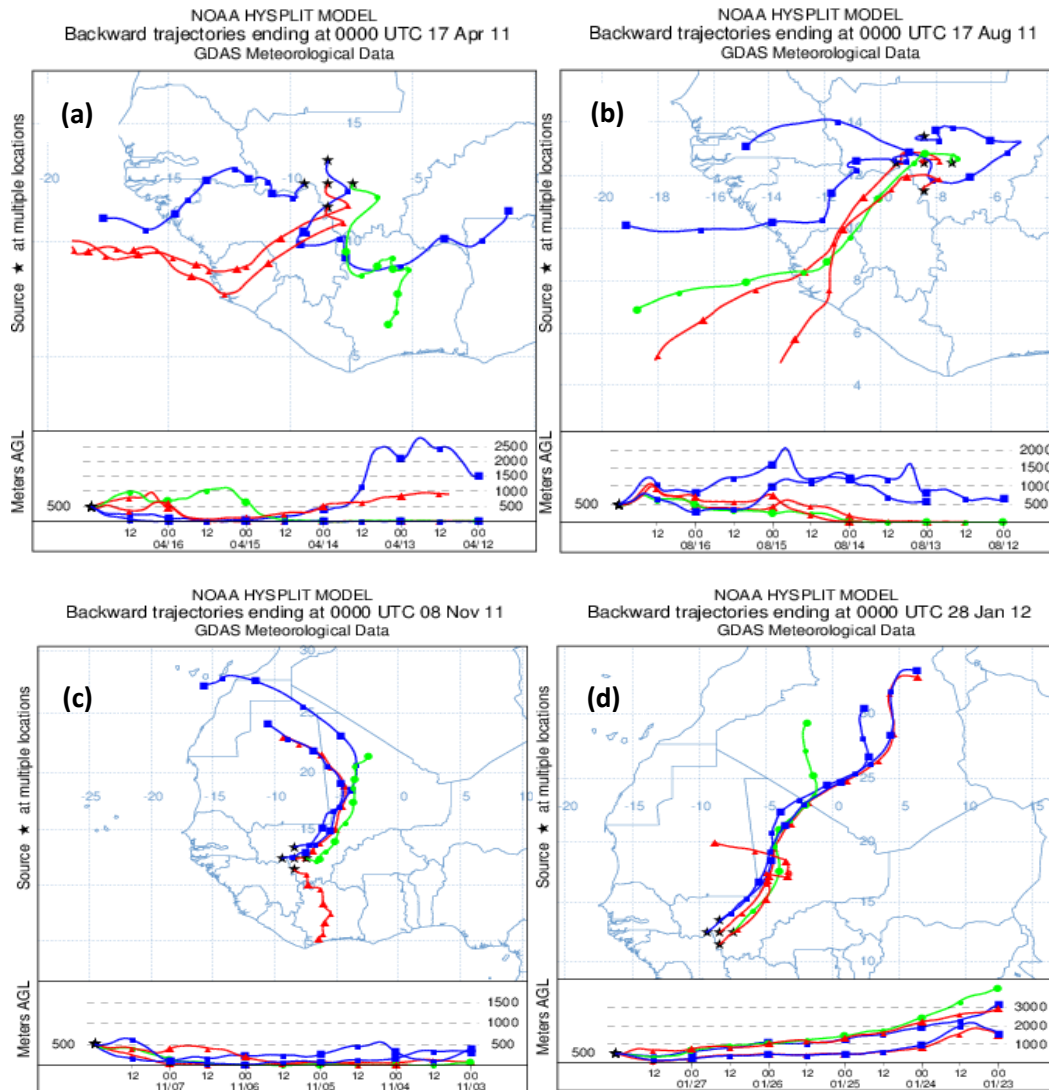


Figure 4 : *Retrotrajectoires HYSPLIT de 5 jours sur 4 points autour de Néguela, (a) le 17 Avril 2011 à 00H, (b) le 17 Aout 2011, (c) le 08 Novembre 2011 et (d) le 28 Janvier 2012*

A des légères différences près, la variation spatiale des retrotrajectoires n'a pas d'influence sur leurs allures générales. Cette configuration permet de confirmer l'attribution des sources sur l'ensemble de la zone d'étude.

3-3. Retrotrajectoires dans le temps

La *Figure 4* montre une configuration temporelle des retrotrajectoires sur cinq jours et une retrotrajectoire est générée tous les jours (chaque 24 heures) montrant ainsi l'accumulation des particules dans la zone réceptrice. Les particules situées à plus de 1000m au-dessus de Néguela, sont transportées par les masses d'air

venant de l'est en traversant le Burkina tandis que les particules fines en dessous de 1000m d'altitude proviennent de la guinée et de la Côte d'Ivoire (**Figure 5-a**). Ce qui correspond quasiment la même analyse que le cas de la variation en hauteur précédemment étudié. Cette configuration simule exactement le transport de l'air humide. Cet air humide contient la vapeur d'eau qui provient de l'évaporation de l'eau de mer et de l'évapotranspiration des sols et des forêts sur le continent (**Figure 5-b**). Ce qui explique l'abondance des précipitations au niveau des zones côtières et forestière. La sensibilité temporelle confirme également que le modèle HYSPLIT, en saison des pluies, ne simule pas des particules PM_{2.5} mais plutôt le mécanisme des précipitations. En saison sèche, en revanche, les résultats demeurent quasiment identiques à ceux des deux précédents cas de configuration (**Figure 5-c**). En effet, les forts vents de cette période soulèvent les particules à des hauteurs très importantes dans la troposphère et leur donne la possibilité de s'adveciter et des diffuser vers des très longues distances [29]. Ce qui favorise le transport d'une importante quantité de poussière minérale, de fumée et de cendre de issues des feux de forêt le long des trajectoires. Le phénomène s'accroît en mi-saison sèche d'où les pics de concentration en fin Janvier (**Figure 5-d**). Les retrotrajectoires en variation temporelle confirme quasiment à des légères différences près les mêmes interprétations que les deux premiers cas. Ces différences sont dues aux conditions météorologiques et à la configuration de la grille du modèle.

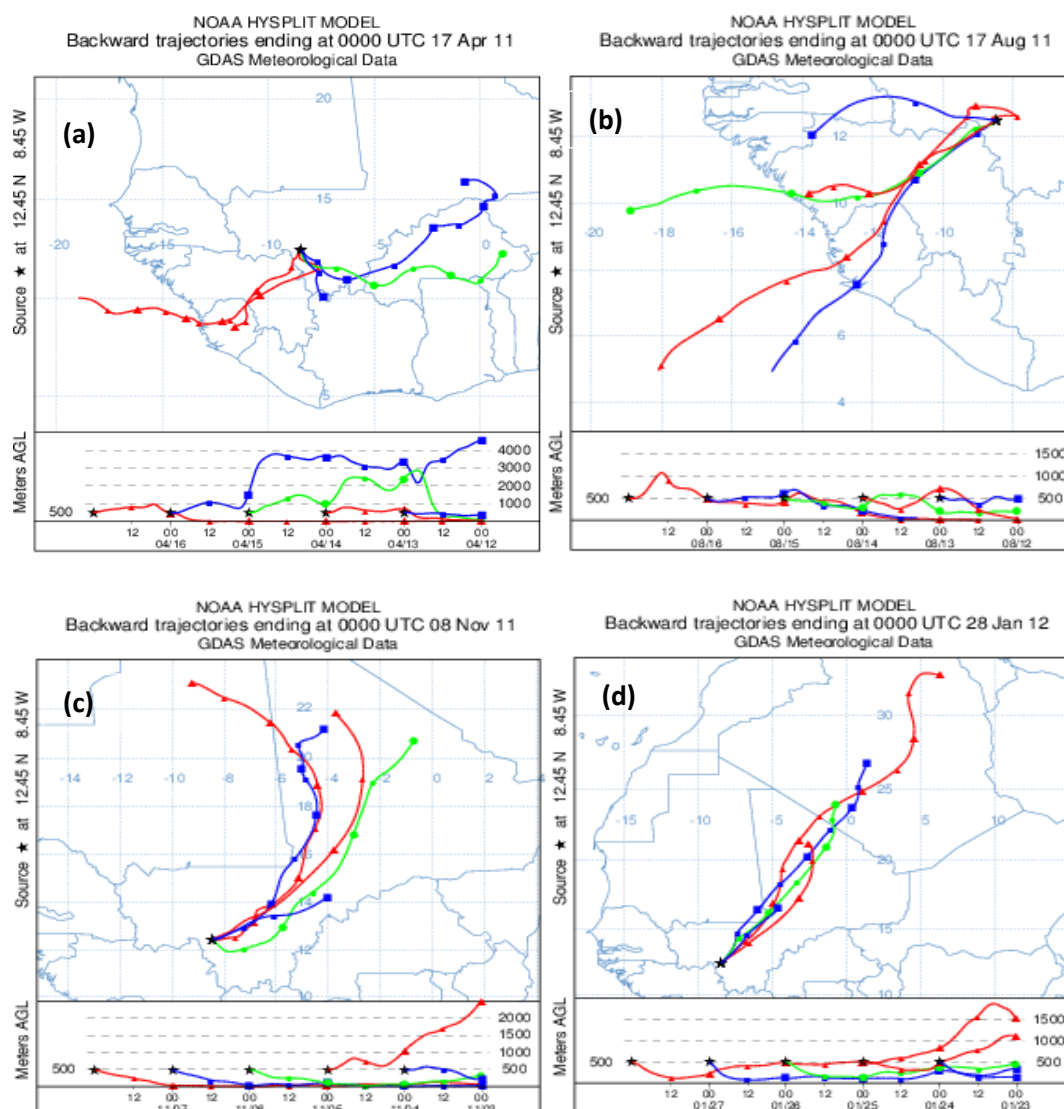


Figure 5 : Retrotrajectoires HYSPLIT de 5 jours sur 4 points autour de Néguela, (a) le 17 Avril 2011 à 00H, (b) le 17 Aout 2011, (c) le 08 Novembre 2011 et (d) le 28 Janvier 2012

3-4. Situation météorologique du point final des retrotrajectoires à 00H (UTC)

Toutes les retrotrajectoires ont un point final commun qui est le site de Néguela. Le **Tableau 2** donne la situation météorologique moyenne du point final des retrotrajectoires dans les trois cas de configuration suivant les dates. Les dates du point final des retrotrajectoires (DPFR) ou dates de configuration du model est la date à laquelle les masses d'air transportées le long de la trajectoire par le vent arrivent dans la colonne atmosphérique au-dessus du site de mesure [22], Néguela dans le cas de cette étude.

Tableau 2 : *Situation météorologique du point final des retrotrajectoires à 00H (UTC)*

DPFR	TEMP (K)	U (m/s)	V(m/s)	TPREC (mm/h)	PBLH (m)
18/04/2011	300.65	3,20	0,41	0,012	2500
17/08/2011	296,65	1,47	1,24	2,120	2000
08/11/2011	300,85	4,57	0,37	0,010	2528
28/01/2012	288.25	7,5	2	0.021	2500

Les grandeurs météorologiques moyennes calculées par le modèle HYSPLIT sont tous en bon accord avec celles de la station météorologique du site de Néguela. Il s'agit de la température potentielle (TEMP), le champ de vitesse du vent (U) et (V) déterminant la vitesse et la direction du vent dans la basse couche de l'atmosphère, le taux de précipitation (TPREC) et de la hauteur de la couche limite de la colonne atmosphérique (PBLH) au-dessus site susceptible de contenir une quantité importante de particules PM_{2.5} en suspension. Une fois au-dessus de la zone d'étude, les particules sont éliminées de l'atmosphère par le processus de dépôt sec et humide. Dans le cas du dépôt sec, particules tombent sous leur propre poids lorsque la vitesse du vent est faible pour les transporter. Quant au dépôt humide, il y a deux mécanismes possibles. Les particules sont éliminées de l'atmosphère soit en devenant des noyaux de condensation des nuages pour tomber sous forme de pluie, ou elles sont interceptées et entraînées dans leur chute par les gouttelettes de pluie [24]. La saisons sèche est une longue période de fertilisation des sols du sahel grâce au transport et au dépôt de la poussière minérale saharienne ainsi que les cendres et les fumées issues des feux de biomasse dans la savane. Ces substances sont riches en phosphore (P), potassium (K) et azote (N) qui constituent les nutriments de base pour la croissance, le développement et le rendement des cultures. Ce phénomène fait que les sols du Sahel sont d'autant plus fertiles que la pluviométrie décroît suivant des latitudes croissantes [18]. La brulure des champs est constatée un peu partout dans la sous-région à en début d'hivernage par les paysans. Cette pratique ancestrale associées à la fertilisation naturelle ici évoquée contribuent à la régénération des forets et à l'amélioration des rendements agricoles.

4. Conclusion

Ce travail consiste à l'utilisation du modèle HYSPLIT pour calculer et simuler les retrotrajectoires des particules d'aérosols PM_{2.5} émises lors des feux de biomasse sur le site de Neguela, dans la boucle du Baoulé au Mali. Le calcul de trajectoire et de retrotrajectoire est l'approche lagrangienne à la base du modèle HYSPLIT. La précision du modèle dépend essentiellement des données météorologiques [27]. La méthode d'attribution des sources par l'approche de calcul et d'analyse de retrotrajectoires HYSPLIT en différentes configurations minimise les incertitudes sur la détermination des sources de provenance des particules [22]. L'étude a permis de constater que les feux de biomasse sont fréquents essentiellement en saison sèche. Les particules qui sont émises lors de ces combustions peuvent s'élever à plus de 5000m dans la troposphère. Leur évolutions (transport, dispersion et dépôt) dans l'atmosphère dépend de la situation géographique, des conditions

météorologiques et environnementales. Dans les trois cas de configurations du modèle, l'étude montre également que la période comprise entre la fin de la saison sèche et le début de l'hivernage, coïncide avec la brûlure de la biomasse par les paysans pour défricher les champs à des fins agricoles [22]. Ce qui est source d'émission de grandes quantités de particules d'aérosols $PM_{2.5}$ dans l'atmosphère mais avec des aspects positifs. En effet, La pratique améliore les rendements agricoles par un apport important en nutriments minéraux comme le phosphore (P), l'azote (N) et le potassium (K). Ce qui fait une économie en intrants agricoles pour les paysans. En plus, l'étude a permis de constater que les feux de biomasse sont fréquents essentiellement en saison sèche. La méthode d'attribution de sources par simulation HYSPLIT a permis de confirmer en grande partie les résultats $PM_{2.5}$ de Prihodko et al., 2012 qui sont basés sur l'analyse chimique de la composition des particules d'aérosols $PM_{2.5}$ trouvées dans les échantillons prélevés sur le site de Négoula.

Le phosphore est l'un des éléments minéraux non renouvelable comme les ressources fossiles. Les deux autres éléments (Potassium et Azote) sont plus ou moins abondants sur terre. Très inégalement répartie sur terre, ses effets sont irremplaçables car aucun élément chimique de nos jours ne peut remplacer le phosphore alors même qu'il est indispensable à toute autre forme de vie. La brûlure de la biomasse pour en produire quelques quantités à des fins agricoles peut être une solution partielle face à une éventuelle pénurie ou d'une augmentation du coût des engrais qui, menacera dangereusement notre sécurité alimentaire. Des études montrent que cette pénurie de phosphore se sentira à la fin de ce siècle [30]. Donc cette étude, en même temps qu'elle propose une solution, soulève aussi une problématique à laquelle il faut commencer à réfléchir. Les mesures in situ permettent de valider le modèle. La simulation avec le modèle HYSPLIT appliquant la méthode d'attribution de source permet de détecter la source de provenances de n'importe quel type de polluant détecté dans une ville, une région géographique. Nous envisageons dans une prochaine étude, une utilisation du modèle HYSPLIT pour calculer les concentrations et les dépôts des particules $PM_{2.5}$ sur le même site. En plus, comparer les prévisions (résultats) du modèle aux concentrations ainsi qu'aux dépôts mesurés dans les échantillons prélevés sur le site.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit du programme Suédois International Sciences Programme (ISP) pour le financement de ce travail de recherche, de la NOAA à travers le NCEP pour la disponibilité permanente des données et l'ARL pour la conception et la mise à jour du modèle. Remerciement particulier au Docteur Roland Draxler et ses collaborateurs pour leur aide dans l'utilisation et l'interprétation des résultats du modèle et pour notre participation au HYSPLIT Workshop 2017.

References

- [1] - EL HADJ THIERNO DOUMBIA, Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique urbaine en Afrique de l'Ouest et étude d'impact sur la santé, Thèse unique, Université Toulouse III - Paul Sabatier, (2012) 242 p.
- [2] - H. WEN KUOA, H. YI SHENA, Indoor and outdoor $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the air during a dust storm. *Build Environ*, 3 (45) (2010) 610-614
- [3] - C. DIARRA et A. BA, Analyse des paramètres optiques des aérosols atmosphériques, de leur distribution et de leur albédo de diffusion par les mesures photométriques au Mali. *Afrique SCIENCE*, 10 (2) (2014) 82 - 97 82, ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>, (janvier 2016)
- [4] - F. BENCHARIF-MADANI, H. ALI-KHODJA, N. BENDJABALLAH et A. MERIBAÏ3, Mesure des particules fines et des éléments métalliques en site trafic dans la ville de Constantine, Actes de la 2ème Conférence Internationale de Mécanique (ICM'15). Constantine, Algérie, 25-26 Novembre 2015

- [5] - J. L. DEVINEAU, A. FOURNIER et S. NIGNAN, Savanna fire regimes assessment with MODIS fire data : their relationship to land cover and plant species distribution in western Burkina Faso (West Africa), *Journal of Arid Environments*, Vol 74 (2010), pp. 1092-1101. DOI : 10.1016/j.jaridenv.2010.03.009
- [6] - D. KANVALY, S. KONATÉ, A. T. M. KOUAKOU, A. DEMBÉLÉ, D. AÏDARA et K. E. LINSÉNMAIR, Can unburned savanna sections serve as temporary refuges for insects ? An experiment in a tropical humid savanna in Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, V.84 (2011) pp. 67-79
- [7] - J. TORIYAMA, T. TAKAHASHI, S. NISHIMURA, T. SATO, Y. MONDA, H. SAITO, Y. AWAYA, H. L. SUWIDO et A. R. SUSANTO, , Estimation of fuel mass and its loss during a forest fire in peat swamp forests of Central Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, Volume 314, 15 (2014) pp. 1-8. DOI : 10.1016/j.foreco.2013.11.034
- [8] - L. SAWADOGO, L'influence des feux sur la biodiversité des savanes ouest africaines. Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Côte d'Ivoire, Tome III, BIOTA, (2011) pp. 72-73
- [9] - D. C. S. VIEIRA, C. FERNANDEZ, J. A VEGA et J.-J. KEIZER, Does soil burn severity affect the post-fire runoff and erosion response ? a review based on meta-analysis of field rainfall simulation data, *Journal of Hydrology*, Volume 523, 15, (2015) pp. 452-464. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2015.01.071
- [10] - H. M. GHEBREHIWOT, M. G. KULKARNI, M. E. LIGHT, K. P. KIRKMAN et J. VAN STADEN, Germination activity of smoke residues in soils following a fire, *South African Journal of Botany*, Volume 77, Issue 3, August 2011, pp. 718-724. DOI : 10.1016/j.sajb.2011.03.006
- [11] - M. SOW, C. HÉLY, C. M'BOW et B. SAMBOU, , *Fuel and fire behavior analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savannas*, Journal of Arid Environments, Volume 89, 13, (2013) pp. 84-93. DOI : 10.1016/j.jaridenv.2012.09.007
- [12] - P. N. KAMAU et K. E. MEDLEY, Anthropogenic fires and local livelihoods at Chyulu Hills, Kenya, *Landscape and Urban Planning*, Volume 124, (2014) pp. 76-84. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2014.01.010
- [13] - S. C. COMETTA, V. J. DASA, O. Y. RINCON et 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. Multimedia (Total video Converter)
- [14] - Contenu soumis à la licence CC-BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.fr>)
Source: Article Engrais, 2018 de Wikipédia en français (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Engrais>), (Date de consultation : Avril 2018)
- [15] - A. BAREREMNA, J. F. KOKOU et K. KOUAMI, « Impact des feux sur la biomasse dans les savanes guinéo-soudanaises du Togo », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol.16 N°1, 2016; Article en ligne, URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/17106> (Date de consultation : 26 avril 2018). ; DOI : 10.4000/vertigo.17106
- [16] - T.-S. KWON, K. SUNG-SOO, L. C. MIN et J. J. SEUNG, Changes of butterfly communities after forest fire, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, Volume 16, 4, (2013) pp. 361-367. DOI : 10.1016/j.aspen.2013.04.010
- [17] - P. N. KAMAU et K. E. MEDLEY, , *Anthropogenic fires and local livelihoods at Chyulu Hills, Kenya*, Landscape and Urban Planning, Volume 124, (2014) pp. 76-84. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2014.01.010
- [18] - PRIHODKO LARA, YOURY DESYATERIK, ABDAMANE BA, OUMAR MAIGA, Nutrient subsidies in a West African savanna. Assessing teleconnections through fire and dust contribution, ETBC report, 2012
- [19] - 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*, vol. 10, n°12, (2010), p. 5315 DOI 10.5194/acp-10-5315-2010

- [20] - N. KEHRWALD, R. ZANGRANDO, P. GABRIELLI, J. L. JAFFREZO, C. BOUTRON, C. BARBANTE & A. GAMBARO Levoglucosan as a specific marker of fire events in Greenland snow, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64:1, (2012) 18196, DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.18196
- [21] - F. MALAVELLE, Effets direct et semi-direct des aérosols en Afrique de l'ouest pendant la saison sèche. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2011
- [22] - A. F. STEIN, R. R. DRAXLER, G. D. ROLPH, B. J. B. STUNDER, M. D. COHEN and F. NGAN, NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96 (2015), 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- [23] - Z. L. FLEMING, P. S. MONKS and A. J. MANNING, Review: Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition. *Atmos. Res.*, (2012) 104-105, 1-39, doi:10.1016/j.atmosres.2011.09.009
- [24] - R. R. DRAXLER and G. D. HESS, An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 47, (1998) 295-308
- [25] - R. R. DRAXLER and G. D. HESS, Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, (1997) 24 pp
- [26] - R. R. DRAXLER, HYSPLIT4 user's guide. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. (2018)
- [27] - R. R. DRAXLER and G. D. ROLPH, HYSPLIT-Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model. Silver Spring. Available on: <http://www.arl.noaa.gov/hysplit4.html>. (2018)
- [28] - 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*. 1:10, (2014) (ISSN: 2313-8629)
- [29] - P. BROOMANDI, B. DABIR, B. BONAKDARPOUR and Y. RASHIDI, Identification of the sources of dust storms in the City of Ahvaz by HYSPLIT. *Pollution*, 3 (2) Spring 2017 341-348, DOI: 10.7508/pj.2017.02.015 Print ISSN: 2383-451X Online ISSN: 2383-4501 Web Page: <https://ipoll.ut.ac.ir>
- [30] - DANA CORDELL and STUART WHITE, Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security, Sustainability, 3 (2011), 2027-2049; doi:10.3390/su3102027