



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

-----  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :  
2018-2019

N° D'ORDRE : 0269/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :  
CI0414002905

LABORATOIRE :  
SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

## MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**MESURE DES CONCENTRATIONS DE BLACK  
CARBON (BC) EN MILIEUX RURAL ET URBAIN :  
CAS DE LAMTO ET ABIDJAN (COTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

**YAO Eric Martial**

JURY

Président : M. YATTI Kouadio Justin, Professeur Titulaire,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : Mme. YOBOUE Véronique, Professeur Titulaire,  
Université Félix Houphouët Boigny

Encadreur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. SILUE Siélé, Maître-Assistant,  
Université Peleforo Gon COULIBALY

Soutenu publiquement  
le :10/06/2020

# TABLE DES MATIERES

page

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENT.....	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES.....	2
<b>1.1- Généralités sur les aérosols.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.1-Définitions.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.2- Les aérosols inorganiques .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.3- La composante carbonée de l'aérosol .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2-Sources des Aérosols carbonés .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.1-Combustion de fuel fossile et de biofuels .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.2- Combustion de biomasse.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3-Propriétés thermo-optiques des aérosols carbonés .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4-Impacts des aérosols carbonés .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.1-Impact des aérosols carbonés sur la santé.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.2-Impact des aérosols carbonés sur le climat .....</b>	<b>17</b>
PARTIE 2: MATERIEL ET METHODES .....	6
<b>2.1. Description des sites d'étude.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1-Présentation du réseau INDAAF.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2-Présentation du projet PASMU.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.3-Présentation du site rural : la station de Lamto .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3.1-Situation géographiques .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3.2-Situations climatologiques.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3-Présentation du site urbain : la ville d'Abidjan .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3.1-Situations géographiques.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3.2-Situations climatologiques.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2-Méthode de collecte des particules de BC .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1-Description de l'analyseur actif : l'Aethalomètre AE33 .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2-Principe de fonctionnement de l'analyseur actif .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3-Collecte d'échantillons de BC par l'analyseur actif .....</b>	<b>26</b>
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	23

<b>3.1- Concentrations de BC à la station humide de Lamto : zone rurale .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.1- Caractérisation des concentrations saisonnières de BC.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.2- Variations des concentrations mensuelles de BC.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.3- Evolution des concentrations mensuelles moyennes.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.4- Caractérisation des concentrations mensuelles moyennes en fonction de la pluviométrie.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.5- Variations des concentrations diurnes.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2- Concentrations de BC à Abidjan : milieu urbain.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.1- Variations des concentrations journalières de BC sur la période d'étude.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2- Evolution diurne de BC pour tous les jours de la semaine .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3- Différences diurnes entre jours ouvrables et jours fériés .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3- Comparaison des niveaux de concentrations de Lamto à ceux d'Abidjan .....</b>	<b>41</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>49</b>

## ***DEDICACE***

*A mes parents,*

*Mes frères,*

*Mes Sœurs,*

*Ma grande famille,*

*Mes enseignants du département Physique-Chimie,*

*Et à mes chers amis*

## REMERCIEMENTS

De prime abord, mes remerciements vont à l'endroit de Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et le courage qu'il n'a cessé de m'accorder durant la réalisation de ce travail et pendant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer, du plus profond du cœur, ma gratitude à l'égard de mes parents qui m'ont non seulement accordé leur confiance mais aussi apporté leur soutien indéfectible. Cette aventure qui a débuté en première année de Licence n'aurait pu arriver à son terme sans le soutien de bon nombre de personnes. J'en oublierai certainement quelques-unes et pour cela, je les prie de m'en excuser par avance.

Je suis très heureux de témoigner ma profonde estime à mon encadreur Monsieur KOUASSI Adjon, Docteur à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour m'avoir permis de bénéficier de ses compétences scientifiques et d'avoir accepté de prendre ce travail sous son aile, je lui suis très reconnaissant. Au Docteur ADON Marcellin, un chaleureux et profond remerciement. Leur temps précieux qui m'a été consacré, leur générosité et leur personnalité forcent un grand respect et une admiration considérable de ma part.

Je remercie vivement Messieurs KOUASSI Kouakou Lazare et DIBY Brou, respectivement Directeur de l'UFR Environnement et Directeur du Laboratoire Sciences et Technologies de l'Environnement, pour leurs conseils avisés et leur implication active dans ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame YOBOUE Véronique, Professeur Titulaire et Responsable de l'équipe de recherche « Aérosols et Pollution » du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF) de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, à qui je dois mon intégration dans cette équipe. Ses conseils d'ordre scientifique, ses orientations objectives ont aidé à l'aboutissement de ce mémoire de Master.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur DONGUI Bini, Professeur Titulaire à l'Université Jean Lorougnon Guédé, qui a bien voulu présider le jury.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier tous mes enseignants, mes condisciples et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé à la réalisation de ce travail.

Projet réalisé avec le soutien du MESRS de Cote d'Ivoire dans le cadre de la mise en œuvre du C2D par l'IRD.



## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

C2D : Contrat de Désendettement et de Développement

DACCIWA: Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa

DRI: Desert Research Institute

FIT : Front Inter-Tropical

IDAF: IGAC/-DEBITS/-Africa

IGAC/-DEBITS: Internationnal Global Atmospheric Chemistry/-Deposition of Biogeochemically Important Trace Species

IMPROVE: Interagency Monitiring of PROtected Visual Environment

INDAAF: Internationnal Network to study Deposition and Atmospheric chemistry in Africa

INS: Institut Nationale de la Statistique

IPCC: Intergovenmental Panel on Climate Change

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LAPA: Laboratoire d'Aérologie de Physique de l'Atmosphère

MESRS : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

PASMU : Pollution de l'Air et Santé dans les Milieux Urbains

PBAP: Pimary Biogenic Aerosol Particles

POLCA : POLLution des Capitales Africaines

RGPH: Recensement Général de la Population et de l'Habitat

SST : Sea Surface Temperature

UFHB: Université Félix Houphouët Boigny.

WHO: World Health Organization

## **LISTE DES TABLEAUX**

**page**

<b>Tableau I</b> : Propriétés optiques de base des aérosols carbonés de combustion ( $\lambda=550\text{nm}$ ) en zone urbaine tempérée.....	14
<b>Tableau II</b> : Conséquences de l'exposition aux particules d'aérosols sur la santé .....	17
<b>Tableau III</b> : Concentrations minimales, maximales et moyennes annuelles et saisonnières de BC à Lamto (de 2015 à 2017). .....	30
<b>Tableau IV</b> : Concentrations minimales, maximales et moyennes diurnes, en saison sèche et en saison humide (2016). .....	36
<b>Tableau V</b> : Comparaison des concentrations diurnes (jours ouvrables et week-end) à Bamako (2008) et Abidjan (2018-2020). .....	41

## **LISTE DES FIGURES**

**page**

<b>Figure 1</b> : Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols et de leurs mécanismes de formation et de déposition.....	7
<b>Figure 2</b> : Représentation de l'aérosol carboné avec le continuum de ses propriétés optiques et chimiques et dans sa concentration en carbone.....	9
<b>Figure 3</b> : Sources relatives à l'aérosol carboné.....	11
<b>Figure 4</b> : Emissions de fumées opaques par les véhicules vétustes à Abidjan en et a) et b) et par les engins à deux roues à Cotonou en c). ....	12
<b>Figure 5</b> : Meules traditionnelles utilisées pour la fabrication de charbon de bois, sans cheminée en a) et avec cheminée en b). ....	13
<b>Figure 6</b> : Feux de savanes en Afrique .....	14
<b>Figure 7</b> : Identification de la taille des aérosols à l'aide d'un cheveu humain et d'un grain de sable fin .....	16
<b>Figure 8</b> : Dispersion des particules d'aérosols dans le système respiratoire. ....	17
<b>Figure 9</b> : Les 13 stations de mesure du réseau INDAAF sur la carte d'Afrique.....	21
<b>Figure 10</b> : Couvert végétal de la Cote d'Ivoire et situation géographique de Lamto .....	23
<b>Figure 11</b> : Photo d'un Aethalomètre modèle AE33.....	25
<b>Figure 12</b> : Concentrations saisonnières de BC sur toute la période d'étude (2015 à 2017) à Lamto .....	29
<b>Figure 13</b> : Variations des concentrations mensuelles de BC sur toute la période d'étude (Janvier 2015 à Mai 2017). ....	31
<b>Figure 14</b> : Evolution des concentrations mensuelles par an et moyennes sur toute la période (2015-2017).....	33
<b>Figure 15</b> : Evolution des concentrations mensuelles moyennes de BC et des précipitations mensuelles moyennes sur la période (Janvier 2015-mai 2017).....	34
<b>Figure 16</b> : Evolution des concentrations diurnes moyennes de BC à Lamto en saison sèche et en saison humide. ....	35
<b>Figure 17</b> : Variations des concentrations journalières de BC sur la période, à Abidjan.....	37
<b>Figure 18</b> : Evolutions des concentrations diurnes moyennes de BC des jours de la semaine (Du lundi au dimanche) sur la période 01 décembre 2019- 27 janvier 2020, à Abidjan .....	38

**Figure 19** : Evolution des concentrations diurnes moyennes de BC pour les jours ouvrables (du lundi au vendredi) et pour les jours fériés (samedi et dimanche) sur la période 01 décembre 2019-27 janvier 2020, à Abidjan..... 40

# **INTRODUCTION**



L'atmosphère, renfermant une multitude de particules, couche entièrement gazeuse recouvrant la planète Terre, est de loin l'origine de toutes modifications climatiques. Le changement climatique que connaît le monde d'aujourd'hui, représente non seulement l'un des véritables problèmes auxquels sont confrontés les gouvernements de tous les états, mais aussi et surtout une grande menace pour la croissance et le développement durable, surtout en Afrique. En effet, compte tenu de certaines activités ou de certains phénomènes, l'atmosphère se retrouve comme étant le lieu d'introduction de polluants gazeux et particulaires. Ces derniers sont ainsi à l'origine de son déséquilibre naturel ; on parle alors d'une rupture d'équilibre (Assamoi, 2011). Cette rupture provoque à son tour des perturbations climatiques qui se traduisent par certains phénomènes extrêmes comme la sécheresse, l'inondation, les cyclones de plus en plus fréquents, pour ne citer que ceux-là. En outre cette pollution atmosphérique se traduit par l'émission des gaz à effet de serre (GES), d'aérosols (fraction organique et minérale) et de bien d'autres polluants. Ces émissions peuvent être naturelles (poussières désertiques, émissions biogéniques) comme anthropiques (combustions de fuel, feux de biomasse, etc.). Il faut également noter que la déforestation, l'urbanisation, l'exploitation accélérée des ressources minières et pétrolières, le caractère de plus en plus marqué des pratiques agricoles sont autant des facteurs contribuant à l'introduction intensive de divers composés chimiques dans l'atmosphère (Assamoi, 2011).

Les aérosols, qui font partie de ces polluants cités plus hauts et qui constituent l'épicentre de notre étude, sont en effet des noyaux de condensation qui sont à la base de la formation des nuages (Aymoz, 2005). Ils constituent des polluants atmosphériques en ce sens qu'ils transportent des espèces chimiques, qui, de par leur composition, représentent un véritable danger pour l'homme et son environnement. On peut citer comme impacts, l'acidification des pluies, la modification du bilan radiatif terrestre, impacts sanitaires marqués. Selon la composition chimique des aérosols, nous en distinguons deux principales catégories : ce sont la fraction organique et la fraction minérale. La partie minérale est essentiellement constituée d'espèces dont la composition est dépourvue de carbone, tandis que la fraction organique comprend une partie carbonée représentée par le Black Carbon (BC) ou carbone suie et le Carbone Organique (OC).

Plus spécifiquement, le Black Carbon est un polluant atmosphérique dont la structure est essentiellement graphitique. Il s'agit d'une espèce chimique qui est exclusivement issue de processus de combustion, en particulier de combustions incomplètes de combustibles carbonés comme le gaz naturel, le pétrole, le charbon de bois, la biomasse (Chevrier, 2018). De par certaines activités anthropiques, le BC est émis directement dans l'atmosphère (polluant

primaire). Une fois présent dans l'atmosphère, il peut parcourir de très longues distances du fait de sa petite taille et qu'il soit inerte vis-à-vis des autres composés chimiques atmosphériques (Bodhaine, 1995 ; Hansen *et al.*, 1989 ; Sciare *et al.*, 2009). En outre, notons qu'il s'agit d'une particule qui présente de sérieux impacts néfastes tant sanitaires, environnementaux que climatiques. Il a la capacité, de par ses propriétés optiques, de modifier le bilan radiatif du globe terrestre en absorbant la lumière du soleil, provoquant ainsi le réchauffement climatique (Tegen *et al.*, 2000). Le BC peut également, de par sa composition chimique, provoquer chez l'homme, des maladies liées au mauvais fonctionnement du système respiratoire et d'autres comme le cancer.

Face à ce défi majeur qui est le maintien de la survie des êtres vivants sur Terre qui se traduit par une diminution considérable du taux d'émission de ces polluants, le suivi du niveau de leurs concentrations dans l'atmosphère doit rester une priorité pour tout citoyen en général et pour les communautés scientifiques en particulier. Ainsi, en 1994, il fut mis sur pied, le réseau international d'observation IDAF (IGAC-DEBITS-Africa), renommé INDAAF (International Network to study Deposition and Atmospheric chemistry in Africa) depuis 2016. Le réseau INDAAF, du projet IGAC-DEBITS (International Global Atmospheric Chemistry- DEposition of Biogeochemically Important Trace Species) est un réseau d'observation de la composition chimique de l'atmosphère sur le long terme. Le principal objectif que le réseau INDAAF s'est fixé est de suivre et de surveiller la composition chimique atmosphérique et les flux de dépôts secs et humides des polluants atmosphériques, tout en analysant la variation de leurs concentrations dans le temps (hebdomadaire, mensuelle, saisonnière et annuelle) en milieu rural. C'est un projet basé essentiellement sur l'atmosphère du continent africain. Ainsi, de nombreuses études portant sur la chimie des pluies, les mesures de concentrations de polluants gazeux et particulaires, les flux des dépôts secs et humides à l'échelle des principaux écosystèmes africains ont été réalisées ces dernières années (Yoboué *et al.*, 2005, 2015 ; Galy-Lacaux *et al.*, 2009, 2014 ; Adon *et al.*, 2010, 2013). En collaboration avec certains programmes (POLCA, DACCIWA), certaines études expérimentales ont aussi été menées dans certaines capitales africaines telles que Bamako, Dakar, Yaoundé, Abidjan et Cotonou (Adon *et al.*, 2016 ; Bahino *et al.*, 2018 ; Djossou *et al.* 2018 ; Adon Aka *et al.*, 2020). A la suite de ces programmes nous avons le projet PASMU (Pollution de l'Air et Santé dans les Milieux Urbains), qui a été lancé en Avril 2018 pour 4 ans, et dont l'objectif principal est d'étudier la pollution de l'air dans deux villes de la Côte d'Ivoire (Abidjan et Korhogo) en relation avec les paramètres météorologiques et son impact sur la santé humaine. C'est dans le cadre de ce projet PASMU (pour le milieu urbain) et du réseau INDAAF (pour la zone rurale) que s'inscrit cette

présente étude. Elle vise à évaluer les niveaux de concentrations de BC en milieux rural (Lamto) et urbain (Abidjan). Plus spécifiquement, il s'agit d'analyser leur évolution temporelle en lien avec les paramètres météorologiques ; d'établir les principales sources d'émission qui influencent les niveaux et les variations de concentration de BC et de comparer les niveaux de concentration entre zone rurale (Lamto) et zone urbaine (Abidjan)...

Ce mémoire de Master s'articule autour de trois principaux chapitres. Le premier chapitre présente de façon générale les aérosols carbonés et en particulier le Black Carbon. Nous donnons un aperçu des différentes propriétés des BC, leurs principales sources d'émissions et leurs impacts sur la santé humaine et le climat. Le second chapitre aborde non seulement la description géographique et climatologique des zones rurale (Lamto) et urbaine (Abidjan) de notre étude, mais aussi la présentation des différentes techniques de mesure et d'analyse des concentrations de Black Carbon sur les deux différents sites d'étude. Le chapitre trois est dédié aux résultats et discussions. Nous étudions l'évolution temporelle des concentrations de BC et mettons en évidence les différents paramètres qui influencent cette évolution. Enfin une comparaison des niveaux de concentrations de BC en site rural (Lamto) et en site urbain (Abidjan) est faite. Ce mémoire s'achève sur une conclusion qui rappelle les principaux résultats et donne quelques perspectives qui en découlent.

# **PARTIE 1 : GENERALITES**

Dans le but de faire l'état de l'art du Black Carbon, il s'agira dans ce chapitre, dans un premier temps de s'intéresser aux généralités sur les aérosols, c'est-à-dire, donner une définition claire du mot « aérosol », leurs caractéristiques et les types d'aérosols. La seconde partie, consacrée aux sources d'émissions des aérosols carbonés, sera suivie des propriétés physico-chimiques que possèdent les aérosols carbonés. Nous présenterons pour finir, les impacts que peut avoir le Black Carbon (aérosol carboné) tant au plan sanitaire qu'environnemental.

### 1.1- Généralités sur les aérosols

#### 1.1.1-Définitions

L'aérosol atmosphérique se définit comme étant toute particule ou substance chimique solide ou liquide en suspension dans l'atmosphère, à l'exception des particules nuageuses comme les gouttelettes d'eau et les cristaux de nuage. Les aérosols sont plus difficiles à caractériser voire à quantifier, du fait de la complexité de leur composition chimique, de la large gamme de leur taille et de leurs variabilités spatio-temporelles (Kacenenbogen, 2008). Ces tailles peuvent varier de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres (D'Almeida, 1986). En outre, la durée de vie de l'aérosol (son temps de résidence) est très courte en ce sens qu'elle varie de quelques minutes à quelques jours selon sa taille, leur altitude et leur composition chimique (Djossou, 2018). Toutefois, il est à noter que la classification des aérosols repose sur plusieurs critères que sont : leur origine, leur mode de formation, leur taille et leur composition chimique.

#### **-Selon leur origine**

On distingue selon leur origine : les aérosols qui sont émis dans l'atmosphère par des processus naturels comme les poussières éoliennes, les feux de brousses, les éruptions volcaniques, etc. Ces aérosols, qualifiés de « naturels » représentent 90% des émissions totales au niveau du globe d'après l'IPCC.

Les aérosols qui se retrouvent dans l'atmosphère du fait d'activités menées par l'homme, sont appelés « aérosols anthropiques ». Parmi ces activités, l'on peut citer les industries, les pratiques agricoles, le trafic routier, la production d'énergie, etc.

#### **-Suivant le mode de formation**

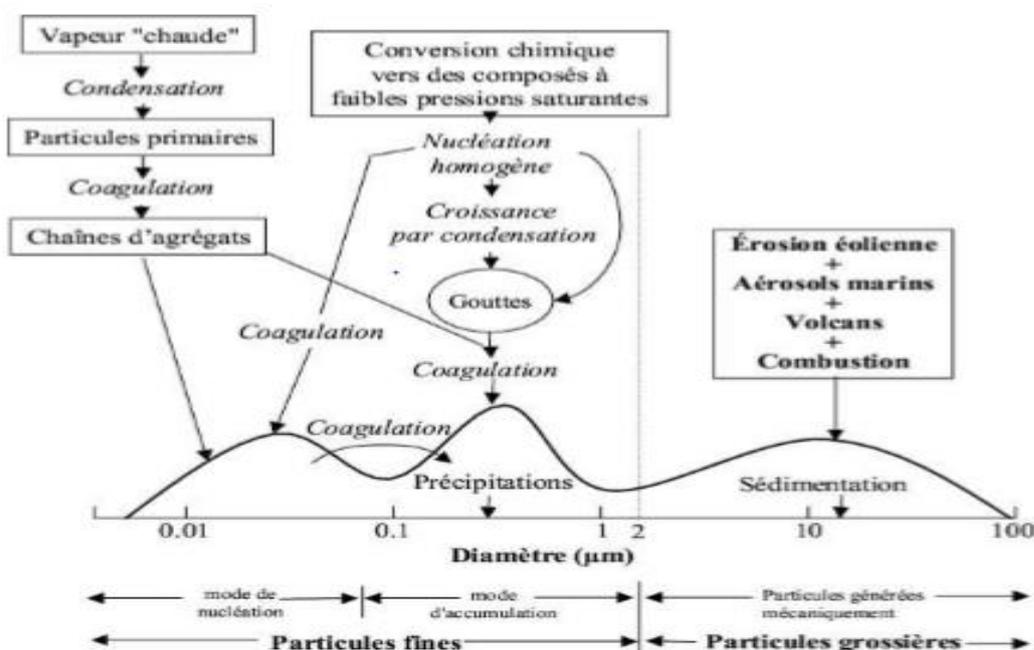
Dans ce cas d'espèce, on distingue deux types d'aérosols atmosphériques : Les aérosols qui sont émis directement dans l'atmosphère et qualifiés de « aérosols primaires ». Ils ont émis par des sources telles que les éruptions volcaniques, les soulèvements de poussières, les fumées

d'usine, le trafic etc. Ces aérosols primaires sont issus à environ 90% de sources naturelles (Tombette, 2007).

Les aérosols secondaires quant à eux, proviennent des processus de conversion gaz-particules à partir des composés gazeux siégeant dans l'atmosphère, qui résultent des phénomènes de nucléation, de condensation, d'absorption ou de réaction en phase gazeuse (Djossou, 2018). Ce type d'aérosol, contrairement aux aérosols primaires, est à près de 80% d'origine anthropique (Korgo, 2014).

### -Suivant leur taille

La granulométrie des aérosols couvre une très large gamme de tailles, du nanomètre au dixième de millimètres (Seinfeld & Pandis, 1998 ; Whitby, 1978). La classification de la taille des aérosols permet de quantifier le nombre de particules en fonction d'un certain rayon et donc de leur attribuer un mode. Il s'en suit alors l'existence de trois modes avec leurs caractéristiques : un mode fin ou mode de nucléation (il s'agit des noyaux d'Aitken) composé de particules dont le diamètre moyen est de  $0.096 \mu\text{m}$  et donc inférieur à  $0.1 \mu\text{m}$  ; un mode accumulation qui résulte du grossissement des particules fines, et qui est composé de particules dont le diamètre moyen est de  $0.8 \mu\text{m}$  soit compris entre  $0.1$  et  $1 \mu\text{m}$  et enfin un mode grossier avec des particules de diamètre moyen de  $2 \mu\text{m}$  soit supérieur à  $1 \mu\text{m}$  (Mallet *et al.*, 2008).



**Figure 1** : Représentation schématique de la distribution granulométrique des aérosols et de leurs mécanismes de formation et de déposition (Whitby, 1978).

### **-Selon leur composition chimique**

La composition chimique des aérosols est fortement liée non seulement à la nature des sources émettrices mais aussi aux différentes transformations qu'ils subissent dans l'atmosphère. On distingue deux grandes fractions d'aérosols : la fraction minérale (ions inorganiques, métaux) et la fraction organique (carbonée suie, carbone organique) qui, en particulier, requiert notre attention dans ce travail.

#### **1.1.2- Les aérosols inorganiques**

Cette fraction des aérosols est constituée d'ions inorganiques dont les principaux sont l'ammonium, le sulfate, le nitrate, le chlore, les poussières minérales, le calcium et le sodium et de métaux comme le magnésium, le fer et l'aluminium. Le nitrate et le sulfate sont des polluants atmosphériques secondaires puisqu'ils sont formés dans l'atmosphère après oxydation de  $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$ , respectivement. Ces réactions se déroulent généralement en journée et avec une cinétique plutôt lente (Hodzic, 2005). Les grains de poussière quant à eux se retrouvent en suspension dans l'atmosphère sous l'action du vent suite à l'érosion du sol. Aussi, sous l'action du vent, les bulles d'air au-dessus des océans éclatent, il s'agit là de formation d'aérosol marin (Calcium, Sodium, Chlore...) ((Blanchard & Woodcock 1980; Monahan, 1986).

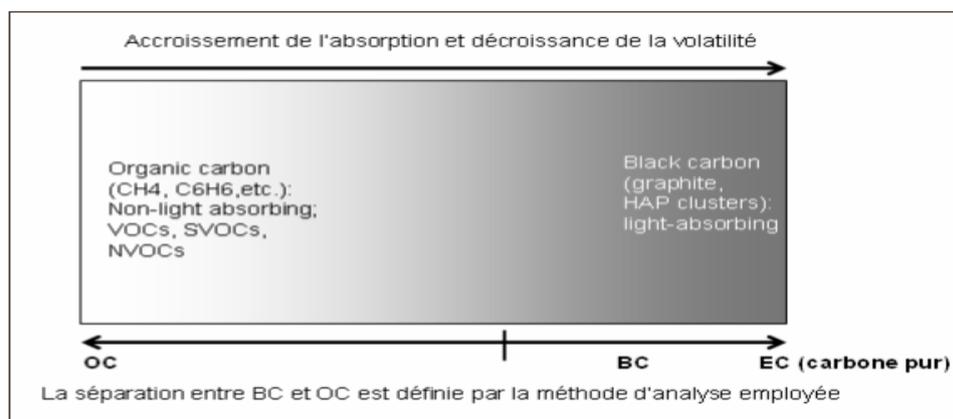
#### **1.1.3- La composante carbonée de l'aérosol**

La fraction carbonée des aérosols est essentiellement produite par des processus de combustion et une bonne partie provient de la végétation (PBAP : Primary Biogenic Aerosol Particles). Bien que leurs sources d'émission soient encore difficiles à élucider, les aérosols carbonés sont regroupés sous deux noms : « Carbone Organique » (OC) et « Black Carbon » (BC).

**-Le carbone organique** représente un ensemble de structures peu denses mais très réactives chimiquement. En effet ces particules, produites à la combustion, réagissent facilement avec certains gaz lors de l'évolution atmosphérique. Ce qui nous permet distinguer deux types de OC : Le Carbone Organique primaire (OCp) produit dans la zone de combustion et le Carbone Organique secondaire (OCs) produit lors de l'évolution atmosphérique c'est-à-dire lors des réactions entre l'OCp et d'autres gaz présents dans l'atmosphère. Ces espèces chimiques sont peu réfractaires (éliminées à moins de 400 °C) et ont la propriété de diffuser le rayonnement lumineux (Guillaume, 2006).

-Le **Black Carbon** quant à lui, est un ensemble de structures très compactes et thermiquement réfractaires puisque sa température de fusion est supérieure à environ 800 °C (Bahino, 2013). Contrairement au Carbone Organique, le BC est uniquement de source primaire puisque rejeté dans l'atmosphère seulement par des processus de combustion. En effet, le BC est peu réactif chimiquement, alors reste inerte durant son évolution dans l'air. Aussi, plus le BC est de nature graphitique, plus il absorbe la lumière : il a donc un effet de réchauffement du climat.

Les caractéristiques plus ou moins différentes que possèdent ces deux types d'aérosols carbonés nous permettent d'affirmer qu'il existe un continuum carboné dans les aérosols. Cependant la distinction entre OC et BC n'est pas toujours évidente. Ainsi, l'on utilise, au lieu des collectes simples par filtres, une analyse qui repose sur les propriétés thermiques et/ou optiques pour une séparation idéale entre le BC et le OC (Guillaume, 2006). En fait, il a été prouvé chimiquement que l'on ne connaît que 20 à 40% des molécules constitutives de OC et de BC (Cahier, 1998), ce qui favorise une séparation délicate de ces deux structures carbonées.



**Figure 2** : Représentation de l'aérosol carboné avec le continuum de ses propriétés optiques et chimiques et dans sa concentration en carbone pur (Guillaume, 2006).

De manière générale, schématiquement, tout processus de combustion idéale s'effectue suivant la réaction suivante :



Cette réaction est gouvernée par plusieurs facteurs comme la température de combustion (plus ou moins élevée), l'humidité ambiante, le taux d'oxygénation etc. En dehors du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), d'autres molécules sont aussi libérées, qu'elles soient sous forme gazeuse, liquide ou solide. On distingue le monoxyde de carbone (CO), les aérosols carbonés (OC, BC), les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), le méthane (CH<sub>4</sub>) etc. (Cahier, 1998). Lorsque la

combustion est incomplète (taux d'oxygénation faible), les aérosols carbonés sont émis grâce à deux phénomènes : la dismutation du CO pour donner du carbone graphitique et du CO<sub>2</sub> selon l'équation :



Et la polymérisation/déshydrogénation du fuel sous l'action d'un oxydant. Ce second phénomène permet la fixation de plus en plus importante de cycles aromatiques (entraînés par des gaz toxiques : HAP, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> etc.) sur le carbone graphitique.

## 1.2-Sources des Aérosols carbonés

La nature et la caractérisation des aérosols carbonés dépendent étroitement de la nature leurs sources qui les émettent dans l'atmosphère. Majoritairement, ces sources sont anthropiques et primaires. En clair, la nature, la quantité et la répartition géographique de ces polluants deviennent difficiles à maîtriser vu que les émissions dépendent du type de végétation, des combustibles utilisés, du niveau de développement, de la densité de la population etc. (Assamoi, 2011). Le terme « émission » renvoie à la quantité de particules (solide, liquide ou gazeuse) qui se retrouvent dans l'atmosphère par le biais de ces différentes sources. Par ailleurs, notons que les aérosols carbonés proviennent essentiellement des processus de combustion. On pourrait ainsi, pour les aérosols carbonés, scinder leurs origines en trois grandes parties : la combustion de fuel fossile (gaz naturel, pétrole), la combustion du biofuel (charbon de bois, résidus agricoles etc.) et la combustion de biomasse (végétation, déchets agricoles etc.).

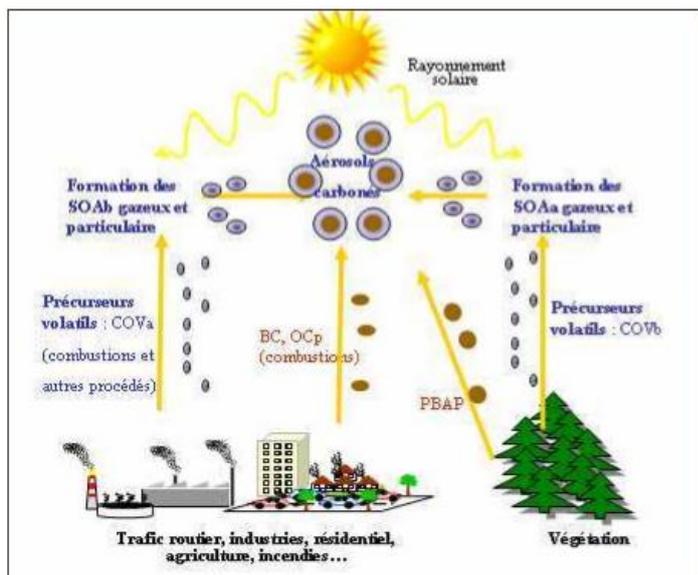


Figure 3 : Sources relatives à l'aérosol carboné (Guillaume, 2006).

### 1.2.1-Combustion de fuel fossile et de biofuels

Il existe différents types de biofuels : on peut citer entre autres le charbon de bois, les résidus agricoles, les déchets provenant de l'élevage, des activités domestiques et industrielles. Le fuel fossile est plutôt dominé par les combustibles comme le gaz naturel, le pétrole, le charbon. Les facteurs d'émission des aérosols carbonés (carbone suie et carbone organique) sont très variables et dépendent de la technologie utilisée (véhicules à 2 ou 4 roues par exemple), du combustible (diesel, bois...), du secteur d'activité (trafics, industries...) et de la qualité de la maintenance des installations et donc du pays ou de la région considérée (Junker & Lioussé, 2008, Bond *et al.*, 2004). Le rejet de ces polluants carbonés dans l'atmosphère, dû à la combustion de ces combustibles, intervient dans divers secteurs d'activités dont les principaux sont : le secteur du transport, le domaine de production d'énergie, les activités domestiques, le domaine de l'élevage, les activités industrielles et bien d'autres activités du secteur tertiaire mais avec une marque bien moins importante que celle des secteurs cités plus haut (Keita, 2018). Deux principales natures gouvernent ces combustions. Elles peuvent être complètes comme incomplètes. La combustion complète de ces combustibles conduit essentiellement à la formation d'un gaz incontournable dans le processus de l'effet de serre additionnel : il s'agit du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ . Cependant la combustion incomplète permet l'émission d'autres polluants gazeux (le monoxyde de carbone  $\text{CO}$ ) et particulaires (Black Carbon BC et Carbone Organique CO) qui contiennent une fraction importante d'espèces carbonées. On distingue

d'autres composés gazeux issus de cette combustion incomplète comme les composés organiques volatils (COV), les composés soufrés et les composés azotés.

Selon les études de Bond *et al.* (2013), 70% des émissions de BC sont dues au trafic dans les pays en Europe, en Amérique du Nord et en Amérique Latine, et que 60 à 80% des émissions du carbone suie sont issues de la combustion du biofuel en Afrique et en Asie.

Il est donc clair que le transport est l'un des facteurs prépondérants dans le processus d'émission des polluants carbonés dans l'atmosphère. Cet état de fait est d'autant plus marquant en Afrique en ce sens que son trafic routier est dominé par une panoplie de véhicules d'occasion mal entretenus et qui utilisent du combustible de mauvaise qualité. En Afrique, l'on caractérise les pays semi-développés par de fortes émissions de polluants carbonés dans les secteurs industriels et les centrales thermiques alors que les pays en voie de développement se distinguent plutôt par des émissions dans le secteur du transport et du domestique (Assamoi, 2011). Liousse *et al.* (2014) ont montré à travers diverses expériences, que le trafic routier représente la plus importante source d'émission en Afrique du Nord et la deuxième en Afrique de l'Ouest et australe, de carbone suie et de gaz (CO, COV et NOx) comme le montre la figure 4.



**Figure 4** : Emissions de fumées opaques par les véhicules vétustes à Abidjan en a) et b) et par les engins à deux roues à Cotonou en c) (Keita, 2018).

La combustion incomplète du bois utilisé dans le processus de production du charbon de bois appelé « charcoal making » ou encore CHM, rejette d'énormes quantités de polluants carbonés dans l'atmosphère (Lacaux *et al.*, 1994 ; Brocard, 1996 ; Liousse *et al.*, 1996 ).

La figure suivante présente des fours traditionnels en terre utilisés pour la fabrication du charbon de bois.



**Figure 5** : Meules traditionnelles utilisées pour la fabrication de charbon de bois, sans cheminée en a) et avec cheminée en b) (Keita, 2018).

### 1.2.2- Combustion de biomasse

Les processus de combustion de biomasse sont typiquement de nature anthropique et primaire. Ils sont gouvernés en majorité par les feux de végétation (feux de biomasse). En effet, ces feux de végétation couvrent 57% du total des combustions de biomasse (Lacaux *et al.*, 1993). On en distingue deux types : les feux de savane qui occupent 90% et les feux de forêt moins importants, près de 9% du total de végétation brûlée (Delmas *et al.*, 1995). Les feux de biomasse en Afrique proviennent essentiellement de pratiques culturelles et d'activités liées au défrichage pour l'utilisation permanente des terres pour l'agriculture, l'élevage et l'élimination des résidus agricoles (Assamoi, 2011). Ces feux s'observent du mois de Juin à Octobre dans l'hémisphère Sud et du mois de Novembre à Février dans l'hémisphère Nord (Hao & Liu, 1994).

Le phénomène de déforestation, parallèlement à la combustion de biomasse est également à la base des émissions d'aérosols carbonés. En effet, la déforestation s'avère nécessaire pour certaines cultures en occurrence les cultures sur brûlis. Ainsi ce phénomène est plus accentué dans les zones favorables à l'exploitation agricole c'est-à-dire dans les zones forestières et dans les savanes humides. Ces dernières années, près de 70% du paysage forestier anciennement existant auraient disparu (Bahino, 2013). Par ailleurs, le rejet dans l'atmosphère des polluants carbonés lié à la combustion de biomasse est fortement marqué en Afrique. Calabri & Cisela (1992) le prouvent lorsqu'ils estiment que sur 750 millions d'hectares de végétations brûlées chaque année, près de la moitié le sont en Afrique alors que 12 à 13 millions le sont aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

Il est donc clair, au vu de ce qui précède que ces feux de biomasse constituent de loin des sources émettrices très importantes des polluants particuliers dans l'atmosphère. La nature de

ces aérosols carbonés est fonction de celle de leurs origines. Ainsi, les principaux sont : le Carbone Organique OC et le Black Carbon BC qui fait l'objet de ce mémoire. En effet, dans les feux de biomasse naturels, la quantité d'oxygène n'est jamais suffisante ce qui donne une nature incomplète à la combustion. Cette combustion incomplète de biomasse présente deux phases qui sont déterminées par le type de matériau brûlé et les conditions de brûlage : Il s'agit de la phase de flaming (combustion avec flammes) qui permet l'émission du carbone suie et de composés complètement oxydés, et la phase de smoldering (combustion sans flammes) qui émet du carbone organique et des composés incomplètement oxydés (Keita, 2018).



**Figure 6** : Feux de savanes en Afrique (Delmas *et al.*, 2005)

### 1.3-Propriétés thermo-optiques des aérosols carbonés

Les différentes propriétés des aérosols sont étroitement liées autant à leur composition chimique qu'à leur concentration. Dans cette section nous allons nous intéresser aux propriétés thermo-optiques des aérosols carbonés.

Les propriétés optiques des aérosols carbonés reposent essentiellement sur le pouvoir absorbant ou diffusant du rayonnement lumineux, qu'ils possèdent. En outre, ces propriétés dépendent fortement de leur forme, leur taille et de leur état de mélange avec d'autres espèces chimiques (Cahier, 1998). Celles-ci sont caractérisées par un indice de réfraction  $m$ , fonction de la composition chimique de l'aérosol carboné, d'un paramètre de taille  $\alpha$  fonction de sa taille et d'une efficacité d'extinction  $Q_{ext}$ . L'indice de réfraction en question, qui est un nombre complexe, s'écrit :  $m = n + ik$  ; où  $n$ , la partie réelle, représente la quantité de lumière diffusée et  $k$ , la partie imaginaire qui traduit l'absorption du rayonnement. Toutefois, notons que cet indice de réfraction dépend fortement de l'humidité relative (Mallet *et al.*, 2008).

Le paramètre de taille quant à lui s'exprime par :  $\alpha = \pi d / \lambda$  avec  $d$ , le diamètre de l'aérosol et  $\lambda$  la longueur d'onde du rayonnement incident.

On détermine également l'efficacité d'extinction  $Q_{ext}$  à partir de l'efficacité d'absorption  $Q_{abs}$  et l'efficacité de diffusion  $Q_{sca}$  à travers la relation :  $Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{sca}$ . L'albédo de simple

diffusion, qui est le rapport entre  $Q_{sca}$  et  $Q_{abs}$  et noté  $\omega$ , est aussi nécessaire à la détermination de ces propriétés. Il représente l'importance relative de la diffusion de l'aérosol relativement à son absorption. Plus il est proche de 0 plus l'aérosol a un pouvoir absorbant élevé, plus cette valeur est proche de 1 plus l'aérosol est diffusant (Guillaume, 2006).

A travers ces paramètres cités précédemment, les propriétés optiques du Black Carbon et du Carbone Organique lors d'une campagne en zone urbaine nous sont consignées dans le tableau suivant :

**Tableau I** : Propriétés optiques de base des aérosols carbonés de combustion ( $\lambda=550\text{nm}$ ) en zone urbaine tempérée (Mallet *et al.*, 2003).

Aérosol	n	k	$\omega_b$	$\sigma_{ext}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Comportement qualitatif
Carbone suie	1,87	0,569	$0,33 \pm 0,03$	$8,52 \pm 0,48$	Absorbant
Carbone organique	1,55	0,005	$0,98 \pm 0,01^f$ $0,94 \pm 0,01^a$	$\sigma_{ext}^f = 16\sigma_{ext}^a$	diffusant

<sup>f</sup> pour le mode fin (cf. granulométrie)

<sup>a</sup> pour le mode d'accumulation (cf. granulométrie)

Il est donc clair que le Black Carbon ou carbone suie a la propriété d'absorber le flux lumineux alors que le Carbone Organique présente plutôt un pouvoir diffusant élevé du rayonnement.

Le BC est thermiquement réfractaire du fait de son importante résistance aux grandes températures (sa température de fusion est d'environ 800 degrés Celsius). Bien que le BC constitue une particule ayant une durée de vie atmosphérique relativement courte (de 3,3 à 10,6 jours) (Bond *et al.*, 2013), il possède un pouvoir de réchauffement global de 100 ans (680 fois celui du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ ) (Roden *et al.*, 2006). Quant au OC, il présente un pouvoir de refroidissement global de par sa capacité à diffuser le rayonnement solaire. Toutefois le OC comprend une partie absorbante appelée « Brown Carbon (BrC) » (Kirchstetter *et al.*, 2004) dont celle issue des combustions de biomasse est capable d'absorber la lumière solaire à des longueurs d'onde qui entraînent des réactions photochimiques (Liu *et al.*, 2015).

## 1.4-Impacts des aérosols carbonés

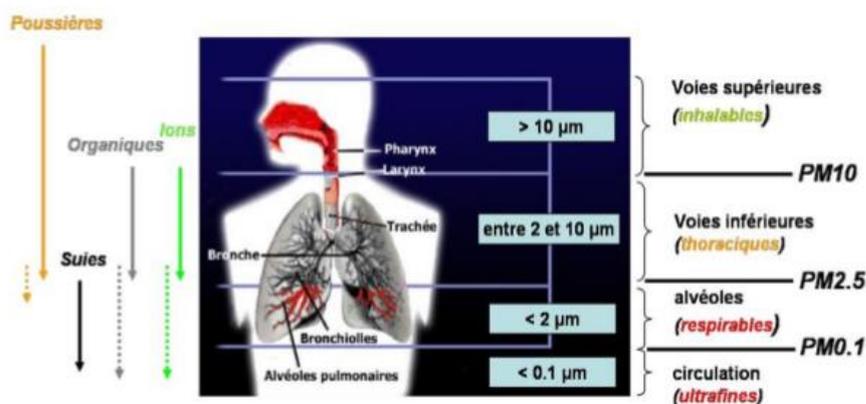
Bien que peu connu, l'impact que présentent les aérosols atmosphériques en particulier celui des aérosols carbonés, est avéré de nos jours. En raison de sa composition chimique et de ses propriétés diverses, le Black Carbon (aérosol carboné) touche à plusieurs domaines avec ses effets néfastes. Il s'agit en effet de ses impacts sur le plan sanitaire, environnemental et climatique.

### 1.4.1-Impact des aérosols carbonés sur la santé



**Figure 7** : Identification de la taille des aérosols à l'aide d'un cheveu humain et d'un grain de sable fin

Les aérosols carbonés jouent un rôle prépondérant dans la problématique de la santé en ce sens que ses effets sur la santé humaine sont de loin les plus dangereux. La figure ci-dessus est la preuve que ces particules sont pratiquement invisibles à l'œil nu, ce qui facilite leur intrusion dans notre organisme sans qu'on ne s'en aperçoive. On estime à l'heure actuelle qu'il n'y a pas de seuil en deçà duquel l'exposition à ces particules est sans effet. Ce qui signifierait que toute population fait face à un potentiel risque de maladie liée à l'inhalation de ces particules. La toxicité des aérosols carbonés est liée à leur quantité présente dans l'atmosphère, à leur taille et à leur composition chimique (Dolumbia, 2012 ; Val *et al.*, 2013). La toxicité du BC par exemple est liée au fait qu'il constitue un mélange de diverses espèces toxiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les métaux lourds etc. (Fazez *et al.*, 2012). Comme les particules fines, les plus petites particules d'aérosols carbonés sont capables de pénétrer profondément dans le système respiratoire, pouvant même atteindre les alvéoles où le passage de substances dangereuses dans la circulation sanguine est possible (Nenmar *et al.*, 2002, 2003 ; Berico *et al.*, 1997). Les particules dont le diamètre est compris entre 4 et 10  $\mu\text{m}$  ont un impact plutôt sur la région trachéo-bronchique et les plus grosses (dont le diamètre est supérieur à 10  $\mu\text{m}$ ) quant à elles se retrouvent au niveau du nez et dans les voies respiratoires supérieures (Ouafo, 2010) ou encore en entrée des poumons mais peuvent être éliminées par déglutition (Assamoi, 2011). La schématisation de l'incursion de ces particules dans le système respiratoire est présentée par la figure suivante :



**Figure 8** : Dispersion des particules d'aérosols dans le système respiratoire (Djossou, 2018).

Des conséquences terribles ne se font pas attendre après infection. Des maladies liées au mauvais fonctionnement du système respiratoire apparaissent : bronchite, sinusite, toux chronique, rhume. L'exposition à ces particules pourrait également non seulement entraîner des réactions inflammatoires au niveau des poumons mais aussi induire une altération du système nerveux engendrant ainsi des effets indésirables sur la fonction cardiaque.

Le tableau ci-dessous illustre quelques maladies à court et à long terme, liées à l'inhalation de ces particules d'aérosols.

**Tableau II** : Conséquences de l'exposition aux particules d'aérosols sur la santé (WHO, 2006)

Conséquences à court terme	Conséquences à long terme
1-réactions inflammatoires pulmonaires 2-symptômes respiratoires 3-effets négatifs sur le système cardiovasculaire 4-augmentation de l'utilisation des médicaments 5-augmentation des admissions hospitalières 6-augmentation de la mortalité.	1-augmentation des symptômes des voies respiratoires inférieures. 2-réduction de la fonction pulmonaire chez les enfants. 3-augmentation des broncho-pneumopathies obstructives 4-réduction de la fonction pulmonaire chez les adultes. 5-réduction de l'espérance de vie due essentiellement à la mortalité cardio-pulmonaire et probablement aux cancers

### 1.4.2-Impact des aérosols carbonés sur le climat

Durant ces dernières années, les aérosols carbonés comme le BC, jouent un rôle plus que crucial dans le processus du changement climatique du fait de leur capacité d'interagir avec le rayonnement solaire incident (Guillaume, 2006). En effet, comme les gaz à effet de serre, les aérosols carbonés ont le pouvoir d'absorber et/ou de diffuser le rayonnement Infra-rouge issu du Soleil et de la surface de la Terre, favorisant ainsi un effet de réchauffement ou de refroidissement selon le pouvoir optique dominant : on parle de forçage radiatif positif ou

néгатif, respectivement. Le forçage radiatif provoqué par cette interaction aérosol-rayonnement se présente sous trois formes :

- Concernant le premier type de forçage, il se traduit par l'interaction directe de ces particules avec le rayonnement solaire et celui réémis par le globe terrestre. En effet, les particules de BC présentes dans l'atmosphère ont la propriété d'absorber ces rayonnements, ce qui augmente la température moyenne de la surface terrestre et donc provoque un effet de réchauffement. Ce phénomène provoque une baisse considérable de l'albédo planétaire (forçage positif) (Haywood & Boucher, 2000). Quant au Carbone Organique par exemple, il diffuse le rayonnement solaire dans l'espace ce qui favorise une diminution de l'énergie solaire incidente au niveau de la Terre (forçage négatif) (Kiehl & Briegleb, 1993). Il s'agit de l' « **effet direct** » (Haywood & Shine, 1995).

- Lorsque ces particules, de par leurs propriétés d'absorption, arrivent à réchauffer la troposphère tout en modifiant le profil vertical de température et d'humidité (Léon *et al.*, 2002) dont dépend la circulation atmosphérique et la formation des nuages, on parle d' « **effet semi-direct** » (Hansen *et al.*, 1997 ; Ackerman *et al.*, 2000).

- Le dernier type de forçage est qualifié d' « **effet indirect** ». En effet, ces aérosols carbonés constituent des noyaux de condensation autour desquels s'agglomèrent de la vapeur d'eau pour former des gouttelettes d'eau. Ce processus est à l'origine d'une augmentation du nombre de gouttelettes d'eau dans les nuages et une diminution de leur taille, ce qui rend les nuages plus diffusants au contact du rayonnement solaire (augmentation de l'albédo) (Twomey, 1974 ; Coackley *et al.*, 1987 ; Kim & Cess, 1993) : il s'agit du premier effet indirect. Quant au second effet indirect, il s'observe lorsque la surface de la Terre se retrouve couverte par une masse nuageuse importante. Cet état de fait survient lorsque les gouttelettes d'eau formées restent en suspension dans l'air car sont trop petites et donc n'ont pas encore atteint la taille requise pour précipiter (Guillaume, 2006).

Dans ce premier chapitre, nous avons fait l'état de l'art sur les aérosols en général et sur les aérosols carbonés en particulier. A cet effet, il convient de retenir que les aérosols se subdivisent en plusieurs classes, classification qui est fonction de leur taille, leur origine, leur composition chimique et leur mode de formation. Ainsi, selon la composition chimique, on distingue les aérosols carbonés composés principalement du Black Carbon BC et du Carbone Organique OC. Ces types d'aérosols sont rejetés directement dans l'atmosphère (cas du BC exclusivement) et ces émissions sont essentiellement d'ordre anthropique. Entendons par là

qu'ils sont en effet émis par des processus de combustion, entre autre combustion du fuel fossile (gaz, pétrole...), combustion du biofuel (bois, déchets...) et la combustion de biomasse. De par leurs propriétés et caractéristiques (thermique et optique), les aérosols carbonés représentent un potentiel danger pour le climat, l'homme et son environnement.

## **PARTIE 2: MATERIEL ET METHODES**

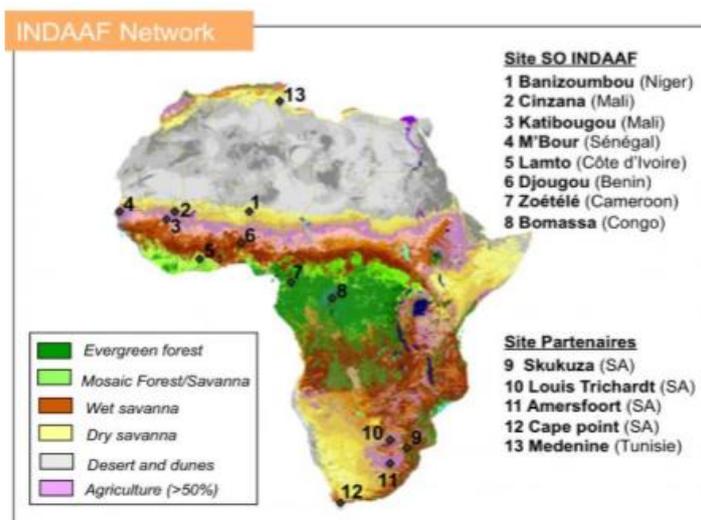
Afin d'évaluer et suivre les niveaux de concentration des aérosols carbonés émis dans l'atmosphère au niveau de nos deux sites en Côte d'Ivoire, un ensemble d'instruments et des techniques d'acquisition des données in situ sont nécessaires. Cette étude s'est appuyée sur le matériel et les techniques de mesures élaborées par le Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse (LA) en accord avec le programme international INDAAF. Nous présentons dans cette section, les différentes zones d'études avec brièvement les deux programmes de recherche impliqués. Ensuite, nous nous intéressons à la description du matériel de mesures et les différentes techniques d'échantillonnage telles que mises en place par le LA au sein d'INDAAF et en cours sur les sites du réseau. Enfin, nous terminons par une conclusion.

### **2.1. Description des sites d'étude**

Les deux sites de notre étude concernent un des sites du réseau de mesure INDAAF (Lamto, zone rurale) et un des sites du projet PASMU (site urbain, Abidjan). Une brève description du réseau INDAAF et du projet PASMU est d'abord faite.

#### **2.1.1-Présentation du réseau INDAAF**

Depuis 1994, un réseau international a été mis en place pour suivre et surveiller la composition chimique et les dépôts atmosphériques en Afrique; il s'agit du réseau INDAAF (International Network to study Deposition and Atmospheric chemistry in Africa). Ce réseau regroupe en son sein treize (13) stations réparties sur le continent africain (Figure 9), dont huit (08) en Afrique de l'Ouest, quatre (04) en Afrique du Sud et une (01) en Tunisie. Chaque site choisi est représentatif d'un écosystème particulier avec des caractéristiques spécifiques concernant les sources émettrices qu'on y trouve et la sensibilité de cette zone aux changements climatiques et écologiques. On trouve ainsi des stations représentatives d'un écosystème de savane humide (Mali, Côte d'Ivoire, Bénin), des sites représentatifs d'écosystème de savane sèche (Niger, Mali, Sénégal) et ceux représentant un écosystème de forêt (Cameroun, Congo). La figure 9 présente la carte de végétation de l'Afrique, associée à la localisation des 13 différentes stations INDAAF.



**Figure 9** : Les 13 stations de mesure du réseau INDAAF sur la carte d'Afrique (<https://indaaf.obs-mip.fr/network>)

Les principaux objectifs que ce projet s'est fixé sont le suivi à long terme des polluants atmosphériques (depuis leurs émissions jusqu'à leurs dépôts) et des flux de dépôts atmosphériques. Ce suivi passe par la détermination des concentrations et compositions de ces polluants atmosphériques (aérosols, gaz) et par la quantification de ces dépôts. Cette présente étude, s'inscrit effectivement dans le cadre de ce projet (pour Lamto).

### 2.1.2-Présentation du projet PASMU

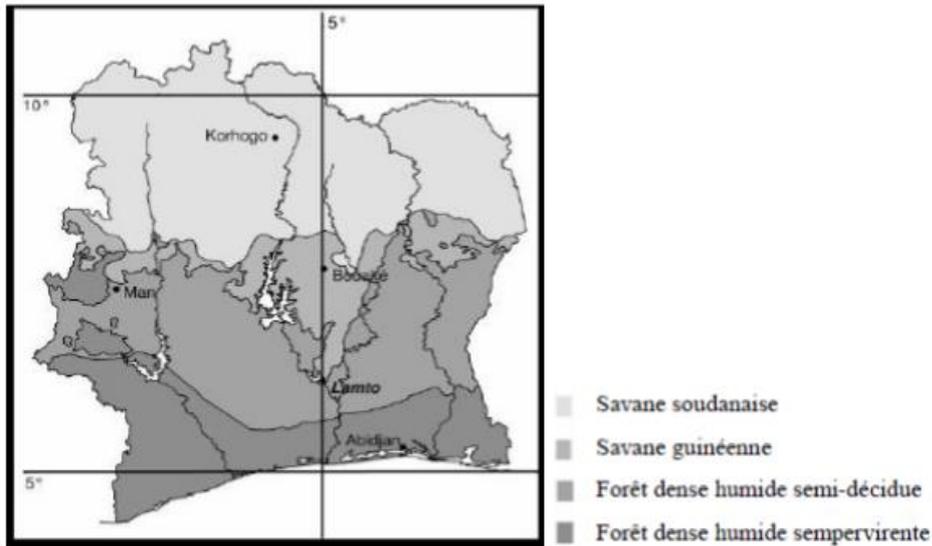
Financé par l'Agence Française du Développement (AFD), situé dans le cadre du programme National de Recherche (PNR) et assuré par l'Institut de Recherche et de Développement (IRD), le programme PASMU est un projet qui a pour objectif scientifique de créer un réseau d'observation sur le long-terme en vue d'étudier la pollution de l'air des villes d'Abidjan et de Korhogo. Cette étude se fait en lien avec l'état de santé des populations. L'un des objectifs spécifiques de ce programme est d'effectuer la caractérisation physico-chimique de la pollution de l'air à Abidjan et à Korhogo et de l'acidité des pluies dans ces villes d'Avril 2018 à Avril 2021. Cette étude s'inscrit également dans le cadre de ce programme (pour Abidjan). Nous donnerons, aux paragraphes suivants, de plus amples informations sur les situations géographique et climatique de ces zones d'études.

### 2.1.3-Présentation du site rural : la station de Lamto

#### 2.1.3.1-Situation géographiques

La réserve de Lamto représente un écosystème de savane et dispose de l'une des plus importantes bases de données scientifiques. Elle abrite deux (02) stations de recherches scientifiques : La station d'écologie tropicale et la station géophysique. La station d'écologie est une station de recherche écologique rattachée à l'Université Nangui Abrogoua d'Abidjan. Elle constitue un centre actif d'études et de formation multidisciplinaires en écologie tropicale et abrite de nombreuses collections depuis plus de 50 ans. La station géophysique quant à elle est une station de sismologie et un site de mesure pour le réseau INDAAF (International Network to study Deposition and Atmospheric chemistry in AFrica). Elle est située à la pointe du V-baoulé à 110km de l'Océan atlantique et à 160 km au Nord de la ville d'Abidjan. Lamto est localisé par les coordonnées suivantes : Latitude 6°13' Nord, Longitude de 5°02' Ouest et une Altitude de 105 m. La réserve présente une superficie d'environ 2500 ha de savane parcourue de forêt-galerie, le long des marigots et du fleuve Bandama. Il regorge un massif forestier dense et de haute pente et abrite également un sous-sol entièrement granitique dont l'altération conduit à des sols très sableux de type ferrugineux tropical (Gautier, 1990).

La pluviométrie moyenne annuelle dans cette zone est fortement marquée. A titre d'exemple, en 2014, le mois d'aout a enregistré jusqu'à 128 mm de pluie. Ce caractère humide que cette zone présente a incité les populations environnantes à pratiquer de plus en plus l'agriculture et l'élevage. La zone est donc exposée à une pollution liée à certaines exploitations agricoles. La figure 10 ci-dessous illustre le couvert végétal de la Cote d'Ivoire et la localisation de Lamto.



**Figure 10** : Couvert végétal de la Cote d’Ivoire et situation géographique de Lamto (Vuattoux et al., 2006)

### 2.1.3.2-Situations climatologiques

A Lamto, la pluviométrie est d’une extrême densité au regard des quantités de pluie collectées au cours des mois et années. Par exemple, 991,9 mm en 2014 ; 1586,2 mm en 2007 ; 128,9 mm en aout 2008. Deux principales saisons sont à distinguer : la saison sèche et la saison humide. La saison sèche s’étend sur les mois de Novembre à Février. La saison humide quant à elle débute du mois de Mars au mois d’Octobre tout en notant que le mois de Mars représente le mois de transition entre les deux saisons en question. Durant la période qui part de Mars à Octobre (saison humide), les masses d’air océaniques, fraîches et humides, transportent diverses espèces, en l’occurrence les aérosols marins, de leur source jusqu’à cette zone rurale (Yoboué *et al.*, 2005). Dans la veine, en saison sèche, ce sont des particules terrigènes et diverses espèces provenant de processus de combustion (feux de savane, combustion à ciel ouvert) qui sont entraînées par l’harmattan.

### 2.1.3-Présentation du site urbain : la ville d’Abidjan

#### 2.1.3.1-Situations géographiques

Abidjan, capitale économique de la Cote d’Ivoire, est une ville urbaine située au Sud du pays dans le golfe de Guinée. Elle s’étend sur une superficie d’environ 57 735 ha. Cette ville

peut être repérée entre 5°00' et 5°30' de latitude Nord et entre 3°50' et 4°10' de longitude Ouest (Olahan, 2010). Considérée comme un grand carrefour culturel et ayant connu ces dernières années un essor économique fulgurant, une immigration importante de diverses populations de la sous-région ouest-africaine a été remarquée. Sa population est estimée aujourd'hui, d'après le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) en 2014, à plus de 4 707 404 habitants soit 20,8 % de la population totale en Côte d'Ivoire (INS, 2015). Au vu de cette démographie galopante, cette urbanisation rapide et de la forte industrialisation que la ville connaît, elle fait donc face à de nombreuses émissions anthropiques. Abidjan est caractérisé par un climat de type subéquatorial chaud et humide, avec une alternance de deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches (Ernest *et al.*, 2013).

### 2.1.3.2-Situations climatologiques

Sur les côtes Ouest africaines, l'on connaît une alternance du profil climatique saisonnier qui est dû au passage du front intertropical (Longhurst, 1962 ; Morlière & Rebert, 1972). Le profil climatique saisonnier de la ville d'Abidjan est donc à l'image de cette alternance. En effet, son climat, de type équatorial, est défini par quatre (04) grandes saisons dans l'année : Il s'agit entre autre de :

- La grande saison sèche qui débute du mois de Décembre et prend fin au mois de Mars
- La grande saison des pluies, du mois d'Avril au mois de Juillet
- La petite saison sèche, du mois d'Aout au mois de Septembre
- La petite saison des pluies qui débute du mois d'Octobre au mois de Novembre (Ernest *et al.*, 2005).

## 2.2-Méthode de collecte des particules de BC

Le réseau INDAFF a permis à chacune de ses stations constitutives de disposer de matériels adéquats pour la mesure des différents polluants atmosphériques qui ne cessent d'ailleurs d'être une priorité pour la communauté scientifique. C'est donc dans le cadre de ce programme que le Laboratoire d'Aérodologie (LA) de Toulouse a mis en place un instrument qualifié d'armoire d'aérosols (échantillonneurs passifs), pour la collecte d'échantillons d'aérosols et des capteurs passifs pour la collecte des gaz. En effet, les échantillons d'aérosols collectés sur des filtres sont expédiés dans un laboratoire pour subir des analyses. Ils sont utilisés en permanence à Lamto pour la mesure des concentrations des gaz et aérosols. En plus de ces mesures passives, le réseau dispose d'appareils actifs pour la mesure en temps réel de BC et d'Ozone (O<sub>3</sub>). Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé deux Aethalomètres AE33

(un sur le site urbain et un autre sur le site rural) qui est un analyseur actif pour la mesure en temps réel de BC.

### 2.2.1-Description de l'analyseur actif : l'Aethalomètre AE33

La méthode active de collecte des échantillons de polluants consiste en l'utilisation d'un appareil (capteur actif) qui permet l'obtention des concentrations de BC immédiatement après échantillonnage et permet également par la même occasion d'obtenir les différents paramètres qui ont défini l'échantillonnage (fréquence d'échantillonnage, date et heure de mesure, volume de la parcelle d'air aspiré, atténuation optique etc.). Ainsi, cette collecte de particules de BC a nécessité l'utilisation de l'Aethalomètre modèle 33 (AE33) qu'on aperçoit sur la figure ci-dessous :



**Figure 11** : Photo d'un Aethalomètre modèle AE33.

L'Aethalomètre AE33 a été utilisé pour échantillonner les polluants atmosphériques et mesurer les concentrations de BC sur ces échantillons, dans la ville d'Abidjan et sur le site de Lamto. Il s'agit en effet d'un appareil de mesure de la concentration de BC à l'aide d'une approche purement optique : l'absorption (Hansen, 2005). Cette analyse, est faite à sept (07) longueurs d'ondes distinctes partant de 350 nm à 950 nm (Amodeo, 2018), auxquelles les particules de BC absorbent. En outre notons que l'AE33 est un appareil qui détermine exclusivement la concentration de BC ce qui entraîne l'élimination de toute absorption qui serait occasionnée par un autre type de particule. L'utilisation de 07 longueurs d'ondes différentes permet de recueillir le maximum de particules. L'avantage avec l'utilisation d'un capteur actif est de disposer de concentrations de BC en temps réel (immédiatement) après la collecte sans toutefois attendre qu'un quelconque échantillon soit analysé en laboratoire. Aussi, l'acquisition se fait-elle automatiquement, ne nécessitant donc pas une attention accrue de la part de l'opérateur (Barckley, 2006).

### **2.2.2-Principe de fonctionnement de l'analyseur actif**

Le capteur actif AE33 est un instrument qui mesure la concentration de Black Carbon en effectuant une mesure de la lumière absorbée des particules prélevées en continu sur une bande filtrante (Amodeo, 2018). En effet, à l'aide d'une pompe interne, l'AE33 aspire de l'air ambiant par son port d'entrée, à un débit de quelques litres par minute. Ce débit est contrôlé par un débitmètre interne jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur consignée par le logiciel de l'aethalomètre. Cette parcelle d'air aspirée, pourvue de particules carbonées, est ensuite déposée sur une bande filtrante en quartz et l'AE33 effectue l'analyse de façon continue tout au long de la période d'échantillonnage (Barckley, 2006). L'analyse consiste en l'absorption par les particules de BC (de par leur propriété optique) présentes dans l'échantillon d'air, du rayonnement lumineux émis par l'AE33. Il utilise 07 longueurs d'onde différentes pour pouvoir prendre en compte le maximum de BC puisqu'en fonction de sa source émettrice (combustion de biomasse, combustion du fuel fossile), le BC absorbe à une longueur d'onde différente de celle d'un autre. Et la mesure de la concentration de BC est extraite de la mesure du coefficient d'absorption à 880 nm (Amodeo, 2018) car c'est à cette longueur d'onde que les particules de BC absorbent plus de la lumière. Au cours de ce processus, la bande filtrante ne bouge pas mais n'avance que lorsque la tache a atteint une certaine densité (Barckley, 2006). L'analyse nous fournit une nouvelle lecture de la concentration de BC avec une fréquence de 30 minutes dans notre cas.

### **2.2.3-Collecte d'échantillons de BC par l'analyseur actif**

Pour la mesure des concentrations de BC dans la zone de Lamto, un Aethalomètre AE33 a été installé sur le site dans le cadre du réseau INDAAF. En effet, la zone, comme présentée ci-dessus est pourvue de végétations et connaît plusieurs pratiques agricoles dans les zones avoisinantes, ce qui suppose l'existence de sources de combustion en l'occurrence la combustion de biomasse, les feux de brousses etc. La fréquence d'échantillonnage est de 30 minutes en saison humide et de 10 minutes en saison sèche.

A Abidjan, l'Aethalomètre a été installé à Cocody sur un site de l'Université Félix Houphouët-Boigny dans le cadre du projet PASMU. Rappelons que Cocody est une commune résidentielle, abritant quelques écoles et institutions universitaires. L'appareil donne des valeurs de concentrations exprimées en  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Elles sont donc ramenées en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en les multipliant par le coefficient  $10^{-3}$ .

Ce chapitre nous a permis, après introduction des sites d'études, de présenter les différentes techniques de mesure des aérosols, particulièrement celles du Black Carbon. Concernant la présente étude, nous avons choisi la technique de mesure par analyseur actif de type Aethalomètre AE33 à sept longueurs d'ondes dont le principe se base sur les propriétés optiques du BC. C'est une technique de mesure assez innovante et autonome. Le protocole de mesure, incorporé, nous a permis de disposer de la base de données nécessaire à l'accomplissement de ce travail. Les différentes zones d'études en l'occurrence Lamto et Abidjan, ont également été présentées et leurs situations climatologiques, décrites.

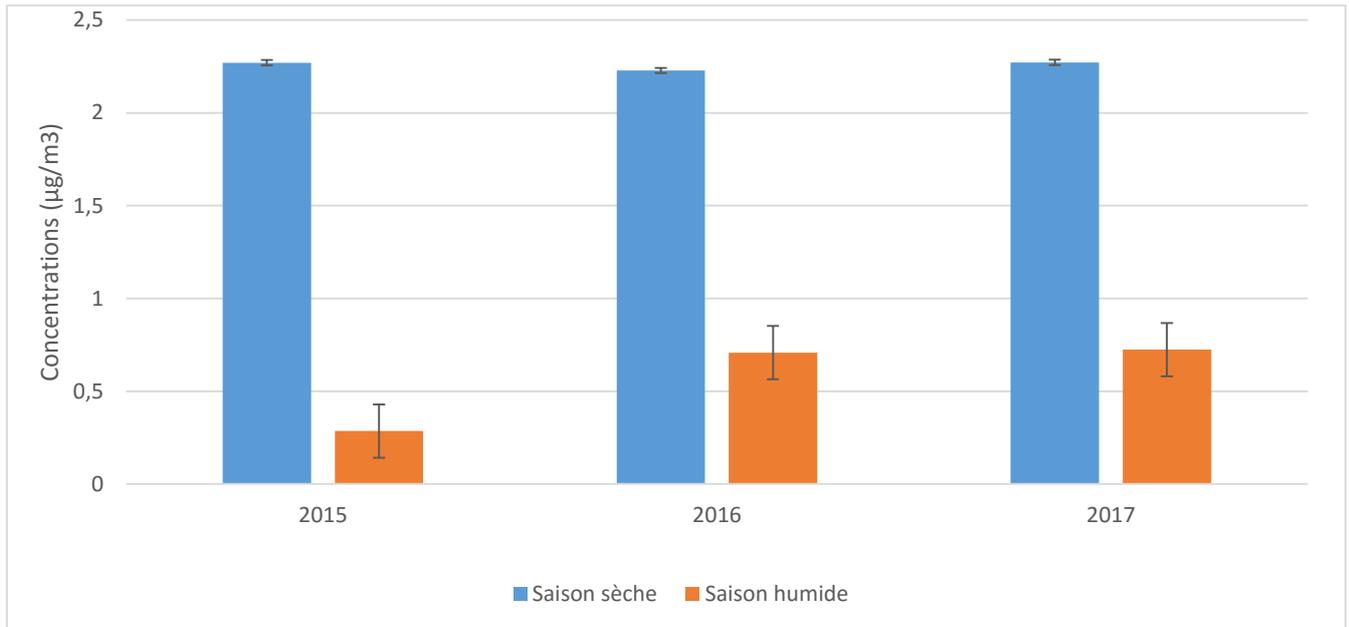
## **PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Ce travail a pour objectif l'évaluation des niveaux de concentrations des particules carbonées BC en atmosphère rurale et urbaine en Côte d'Ivoire, plus précisément Lamto et à Abidjan. Le BC est connu pour être un traceur de combustion et ayant des impacts sur la santé des populations. Dans la présente étude, la collecte des données s'est effectuée à l'aide d'un Aéthalomètre AE33 dans les deux zones d'étude (rurale et urbaine). A Lamto (milieu rural), la mesure s'est faite de Janvier 2015 à Mai 2017 avec un pas de temps de 30 min en saison humide et 10 min en saison sèche et à Abidjan, sur le site de l'Université FHB de Juillet 2018 à Janvier 2020. Cette section comporte trois parties. La première présente les évolutions saisonnières, mensuelles et diurnes à Lamto. L'autre partie, quant à elle s'intéresse aux évolutions journalière et diurnes moyennes dans la ville d'Abidjan. Notons qu'au niveau de la zone urbaine, des échelles temporelles différentes ont été utilisées du fait de nombreuses discontinuités que connaît la base de données. Enfin, une étude comparative entre les niveaux de concentrations obtenus sur le site rural et le site urbain est faite en lien avec les sources concernée.

### **3.1- Concentrations de BC à la station humide de Lamto : zone rurale**

#### **3.1.1- Caractérisation des concentrations saisonnières de BC**

La figure 12 ci-dessous nous montre le profil des concentrations saisonnières de BC à la station de Lamto, sur toute la période d'étude c'est-à-dire de Janvier 2015 à Mai 2017. Pendant la saison sèche (Novembre-Février), les concentrations obtenues d'une année à une autre sont pratiquement du même ordre de grandeur sur cette période. En effet, ces concentrations de BC varient entre de  $2,23 \mu\text{g.m}^{-3}$  à  $2,27 \mu\text{g.m}^{-3}$  respectivement en 2016 et en 2017.



**Figure 12** : Concentrations saisonnières de BC sur toute la période d'étude (2015 à 2017) à Lamto

Sur cette période d'étude (Janvier 2015 à Mai 2017), on enregistre une moyenne correspondante à la saison sèche de  $2,26 \pm 0,02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Quant à la saison humide (Mars-Octobre), les fluctuations sur cette période sont notables de 2015 à 2016 et peu perceptibles de 2016 à 2017. Les concentrations de BC varient de  $0,28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en 2015 à  $0,72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en 2017 avec une moyenne de  $0,57 \pm 0,19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  sur la même période d'étude.

On observe donc en général que les niveaux de concentration de Black Carbon dans l'atmosphère sont plus importants en saison sèche qu'en saison humide. Cet état de fait pourrait être attribué aux émissions dues aux différents processus de combustion (feux de biomasse en particulier) (Sigha *et al.*, 2003) dans cette zone. En effet, tout comme dans les zones forestières tropicales humides, la présence dans l'atmosphère des particules carbonées est généralement liée aux émissions de feux de biomasse, de feux domestiques et de la végétation (Ouafo, 2010), dans les savanes. Par ailleurs, en zone rurale, des pratiques agricoles comme l'agriculture itinérante et la préparation des terres agricoles par brulis sont des pratiques liées aux activités humaines responsables de ce fait. Les feux de biomasse sont donc importants en saison sèche et jouent un grand rôle en ce sens qu'ils permettent de rendre cultivables les terres (moyens de défrichage) avant la mise en culture. Abbabie et al (2006) ont montré qu'en pleine saison sèche environ 80% de la surface du sol de la savane est brûlée annuellement, influençant ainsi les niveaux de concentration de BC. En ce qui concerne les feux domestiques, ils constituent un facteur tout aussi probant de rejet de BC dans l'atmosphère du fait qu'ils représentent des combustions de certains biocombustibles comme le bois ou encore le charbon de bois, qui sont

utilisés comme moyens de production d'énergie (pour la cuisson, le chauffage etc.) dans nos domiciles ruraux.

En saison humide, globalement, les concentrations de BC sont faibles (dans l'ordre de  $0.7 \mu\text{g.m}^{-3}$  en 2016 et 2017 et de  $0.3 \mu\text{g.m}^{-3}$  en 2015). Ce qui peut s'expliquer par de forts taux de pluies pendant ces périodes et donc d'un dépôt conséquent des particules atmosphériques. Aussi, pendant cette période, les habitants en zone rurale s'adonnent aux semis et aux récoltes, ce qui réduit considérablement les brûlages de champs qui induiraient une émission de BC. Cependant, notons que l'ordre de grandeur des concentrations de BC en saison humide de 2015 est largement inférieur aux autres. Ceci pourrait signifier qu'il y a eu, en saison humide, beaucoup plus de précipitations en 2015 qu'en 2016 et 2017, à la station de Lamto.

**Tableau III** : Concentrations minimales (Min), maximales (Max) et moyennes (Moy) annuelles et saisonnières de BC à Lamto (2015-2017).

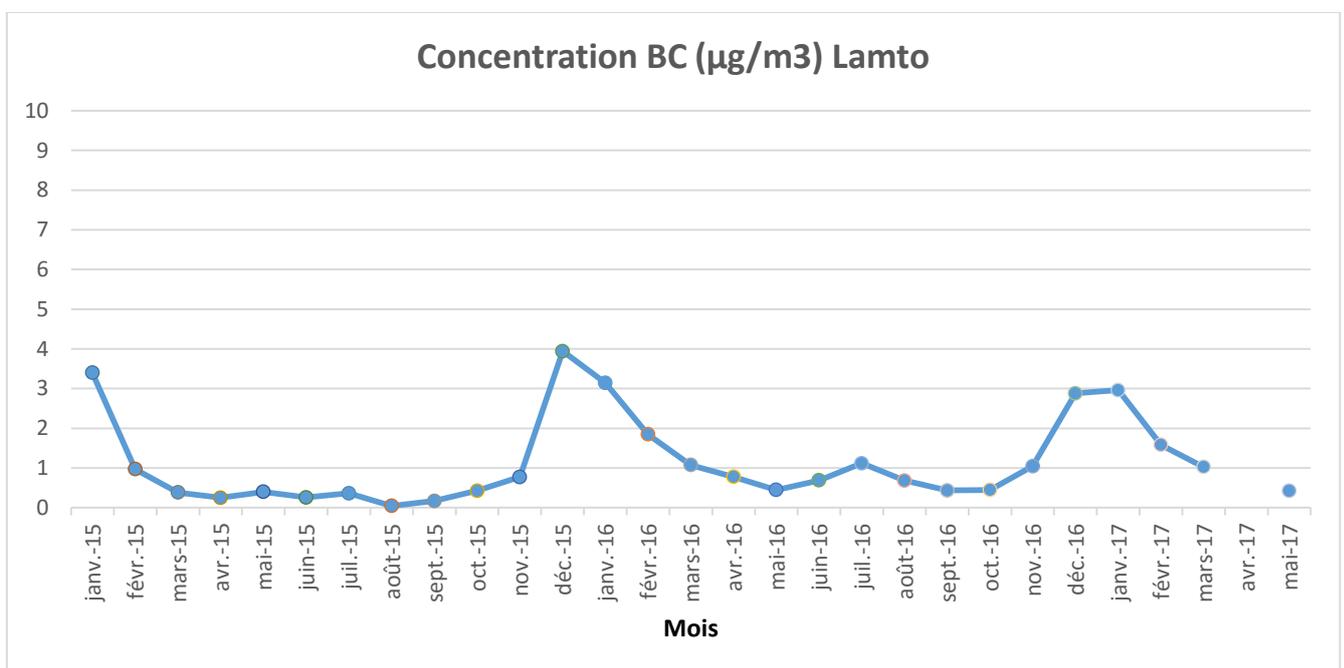
		Concentration de BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
		S.S	S.H	MOY
2015	Min	0,77	Min 0,04	0,95 $\pm$ 0,91
	Max	3,94	Max 0,42	
	Moy	2,27	Moy 0,28	
2016	Min	1,05	Min 0,43	1,21 $\pm$ 0,7
	Max	3,14	Max 1,12	
	Moy	2,23	Moy 0,71	
2017	Min	1,56	Min 0,4	1,5 $\pm$ 0,77
	Max	2,96	Max 1,02	
	Moy	2,27	Moy 0,73	
2015-2017	Min	2,23	Min 0,28	1,2 $\pm$ 0,18
	Max	2,27	Max 0,73	
	Moy	2,2 $\pm$ 0,019	Moy 0,6 $\pm$ 0,19	

Nous avons obtenu une moyenne de  $2,2 \mu\text{g.m}^{-3}$  en saison sèche et de  $0,6 \mu\text{g.m}^{-3}$  en saison humide, sur la période d'étude. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par (Ouafo, 2010) ( $1,7 \mu\text{g.m}^{-3}$  pour la S.S et  $0,8 \mu\text{g.m}^{-3}$  pour la S.H) lors des études menées de 2005 à 2009, à Djougou (Bénin) qui est caractéristique d'un écosystème de savane humide. La concentration moyenne de BC obtenue en saison sèche est aussi similaire à celle observée lors de la campagne FOS-DECAFE en 1991 ( $1,9 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) (Lioussé & Cachier, 1992). On remarque néanmoins que

les valeurs obtenues à Lamto sont légèrement supérieures de celles obtenues à Djougou, ce qui confirme le caractère plus humide de la savane de Djougou que celle de Lamto.

### 3.1.2- Variations des concentrations mensuelles de BC

La figure 13 ci-dessous présente les variations des concentrations mensuelles de BC sur la période de Janvier 2015 à Mai 2017, à la station de Lamto. Néanmoins notons qu'il y a eu des données manquantes en occurrence celles d'Avril 2017 et celles de juin 2017 à Décembre 2017. Sur cette période d'étude, les concentrations de BC varient entre  $0,046 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Aout 2015) et  $3,942 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Décembre 2015) avec une moyenne de  $1,141 \pm 0,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figure 13** : Variations des concentrations mensuelles de BC sur toute la période d'étude (Janvier 2015 à Mai 2017).

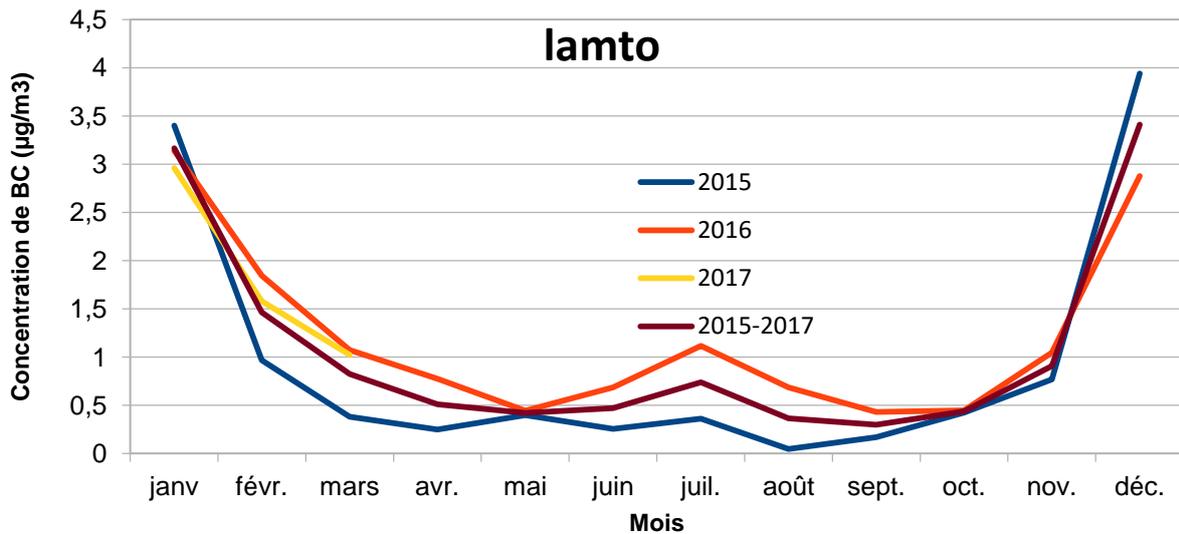
A Lamto, la saison sèche couvre les mois allant de Novembre à Février et la saison humide s'étend de Mars à Octobre. Globalement, on observe une baisse progressive des concentrations de BC des mois de Janvier jusqu'aux mois de Mars, pratiquement une constance d'Avril à Octobre puis une augmentation de ces concentrations des mois de Novembre aux mois de décembre. Il est donc clair que les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant la saison sèche : le pic qui correspond à la valeur maximale apparait en Décembre 2015 ( $3,942 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les valeurs minimales sont plutôt obtenues pendant la saison humide : la valeur minimale correspond à  $0,046 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Aout 2015). Le rapport Max/Min des concentrations de BC sur cette période est donc de l'ordre de 85,6.

Le Black Carbon est un traceur de source de combustions. Les fortes valeurs de concentration de BC observées en saison sèche pourraient être dues à l'intensification des feux de biomasse dans cette zone. En effet, en zone rurale, la saison sèche marque le début de la préparation des terres pour la mise en culture, ce qui nécessite les brûlages de biomasse à ciel ouvert comme moyens de défrichage. La production du charbon de bois, l'utilisation du bois de chauffe pour la cuisson représentent également une cause d'émissions de particules carbonées dans l'atmosphère. Abbadie *et al* (2006) ont même montré que 80% de la surface du sol à Lamto est brûlée par an.

Pour ce qui est de la saison des pluies, les faibles niveaux de concentrations de BC s'expliquent par le fait qu'à cette période, les précipitations abondent, ce qui permet le lessivage de l'atmosphère (BC en l'occurrence). Cette période marque également la fin de la plupart des processus de combustion de biomasse puisque les sols retrouvent leur verdure et l'humidité en surface.

### **3.1.3- Evolution des concentrations mensuelles moyennes**

La figure 14 présente l'évolution des concentrations mensuelles par an de 2015 à 2017 et leur moyenne sur ladite période, de Black Carbon à Lamto. Nous observons dans l'ensemble, que l'évolution des concentrations mensuelles de BC est nettement similaire d'une année à une autre. Sur cette période d'étude, les résultats obtenus indiquent des valeurs maximales en période sèche (Novembre-Février) correspondant aux pics de concentrations de BC émis par les feux de biomasse à cette période à Lamto. Les plus faibles valeurs sont plutôt observées en saison humide (mars-octobre) à l'exception du mois de juillet qui présente un pic de concentration. La baisse de précipitations, la combustion du bois et la production du charbon peuvent expliquer le pic observé au mois de juillet. Ce mois correspond en effet à l'intra-saison, c'est-à-dire un mois sec entre deux saisons humides.

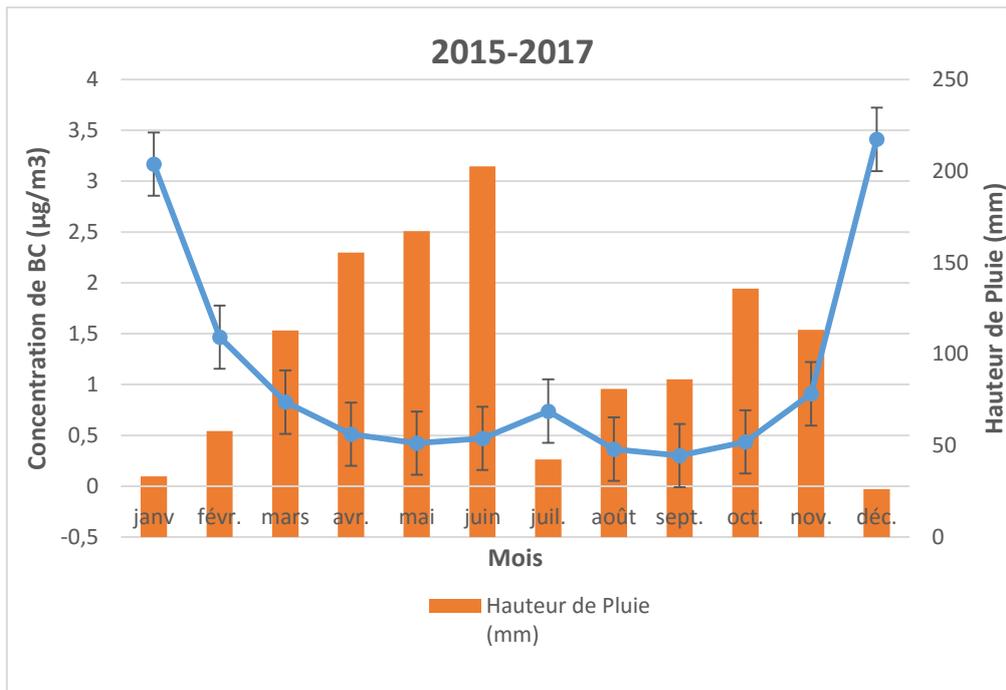


**Figure 14** : Evolution des concentrations mensuelles moyennes sur toute la période (2015-2017).

L'évolution des concentrations mensuelles moyennes de BC sur la période (2015-2017), est quasi-identique à celle obtenue pour chaque année. Les valeurs minimales sont obtenues durant la saison humide (avril-octobre) et les plus fortes concentrations, durant la saison sèche à Lamto qui correspond aux mois de Novembre à Février. Le mois de Mars représente le mois d'intersaison (mois de transition), ce qui explique cette valeur importante de concentration. Les concentrations mensuelles moyennes à Lamto sur la période d'étude fluctuent entre  $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Septembre) et  $3,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Décembre). Par ailleurs, la valeur constatée en Décembre étant supérieure à celles observées pendant les autres mois de la saison sèche pourrait être liée à la sécheresse très marquée provoquant ainsi des feux de brousse, responsables du rejet dans l'atmosphère de BC.

### 3.1.4- Caractérisation des concentrations mensuelles moyennes en fonction de la pluviométrie

Afin d'analyser l'influence du paramètre « précipitation » sur l'évolution des concentrations mensuelles moyennes, nous avons superposé la pluviométrie et les concentrations moyennes mensuelles de BC, comme illustré à la figure 15 ci-dessous.



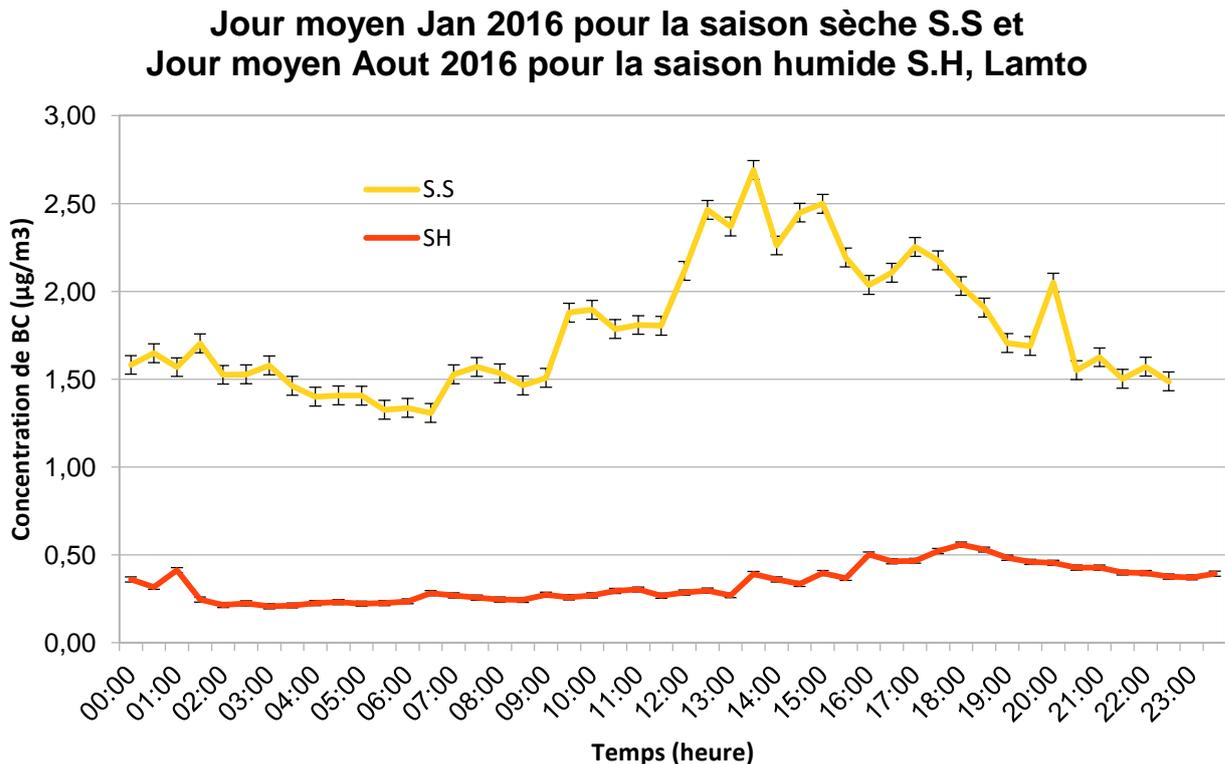
**Figure 15** : Evolution des concentrations mensuelles moyennes de BC et des précipitations mensuelles moyennes sur la période (Janvier 2015-mai 2017).

La variation mensuelle moyenne de la pluviométrie sur cette période d'étude est assez notable. En général, les précipitations augmentent du mois de Janvier au mois de juin où elles atteignent le pic maximal. Elles connaissent une décroissance rapide de juin à juillet, mois à partir duquel elles croissent jusqu'en octobre avant de chuter jusqu'en Décembre. Globalement, les précipitations connaissent une fluctuation entre les valeurs 26,15 mm mesurée en Décembre et 202,5 mm enregistrée en Juin. D'après le graphe obtenu, les faibles valeurs sont obtenues en mois de saison sèche et en Juillet, où le niveau de concentration de BC est élevé. Tandis que les plus grandes sont enregistrées en saison humide, saison qui connaît les plus faibles concentrations de BC. Il s'en suit que la pluviométrie influence considérablement les niveaux de concentration des particules de BC dans l'atmosphère. En clair, la concentration de BC atmosphérique et la pluviométrie évoluent dans le sens contraire : Plus il pleut, moins il y a présence de BC dans l'atmosphère et moins il pleut, plus les niveaux de concentration augmentent. Par ailleurs, nous obtenons un coefficient de corrélation d'environ -0,67. Ce résultat relève d'une forte corrélation négative entre les concentrations mensuelles moyennes et les précipitations : voire l'un des paramètres augmente lorsque l'autre a tendance à diminuer. En effet, cet état de fait pourrait être attribué au phénomène de lessivage de l'atmosphère à travers lequel les particules de BC présentes dans l'atmosphère sont entraînées vers le sol,

pendant la pluie. Aussi, pouvons-nous justifier cette tendance par le fait que lors des moments pluvieux, les sources d'émissions de BC comme les feux de savane ne sont pas très actives.

### 3.1.5- Variations des concentrations diurnes

La figure 16 illustre la variation temporelle des concentrations diurnes de BC pour un jour moyen d'un mois de saison sèche (Janvier 2016) et d'un mois de saison humide (Aout 2016).



**Figure 16** : Evolution des concentrations diurnes moyennes de BC à Lamto en saison sèche et en saison humide.

A l'analyse, nous observons que les niveaux de concentrations de BC d'un jour moyen en saison sèche (S.S) sont largement supérieurs à ceux d'un jour moyen en saison humide (S.H). Nous avons un facteur de variation d'environ 3 entre les niveaux de concentrations de BC en saison sèche et ceux en saison humide. L'évolution diurne des concentrations de BC en saison sèche présente des variations assez perceptibles. En effet, de 00h jusqu'entour de 7h, les concentrations oscillent autour de 1,5 µg/m<sup>3</sup>. A partir de 7h, on assiste à une hausse progressive des concentrations atteignant le pic de 2,69 µg/m<sup>3</sup> autour de 13h30, suivie d'une chute progressive jusqu'à 21h où elles atteignent de nouveau 1,5 µg/m<sup>3</sup> et se maintiennent toute la nuit, pour reprendre de nouveau le même cycle diurne. On observe donc une variation sensible en journée que nous pourrions relier à deux situations :

° Aux activités agricoles, en effet la hausse de concentration débute à 7h, croit jusqu'entour de 14h et décroît jusqu'en fin de soirée (19h). Ce qui correspond au début et à la fin des activités agricoles dans la journée. Le pic autour de 14h correspond à l'heure de mis à feux des parcelles agricoles. C'est également à cette heure que les combustions de biomasse et activités de production de charbon de bois, se multiplient dans les zones avoisinantes de la réserve, en général l'heure à laquelle la température est la plus élevée de la journée afin de faciliter la combustion. Entre 17h et 19h correspond en général au temps de latence ou d'extinction de foyers après le départ des paysans. Le pic observé entre 19h et 21h pourrait être justifié par certaines activités domestiques qui nécessitent l'utilisation de procédés qui constituent des sources d'émission de BC, c'est-à-dire la combustion du bois pour la cuisson, des feux de bois nocturnes autour desquels s'agglomèrent des habitants.

°° Aux paramètres climatiques en particulier la température. En effet en saison sèche, durant la journée (du lever au coucher soleil), les températures sont assez élevées et l'humidité est faible, ce qui facilite certains processus d'émissions de BC comme les feux de brousses, les feux de bois etc.

En ce qui concerne l'évolution diurne en saison humide, la variabilité est quasi statique sur les 24h. En effet, pendant cette période, on assiste au lessivage des particules de BC en suspension dans l'atmosphère, ce qui induit une faible valeur des concentrations de BC quel que soit l'heure (autour de 0,5 µg/m<sup>3</sup>). Toutefois, une valeur maximale est atteinte aux environs de 18h (0,56 µg/m<sup>3</sup>). Cela pourrait être attribué aux activités domestiques dans les domiciles à ces heures.

**Tableau IV:** Concentrations minimales (Min), maximales (Max) et moyennes (Moy) diurnes, en saisons sèche et humide (2016).

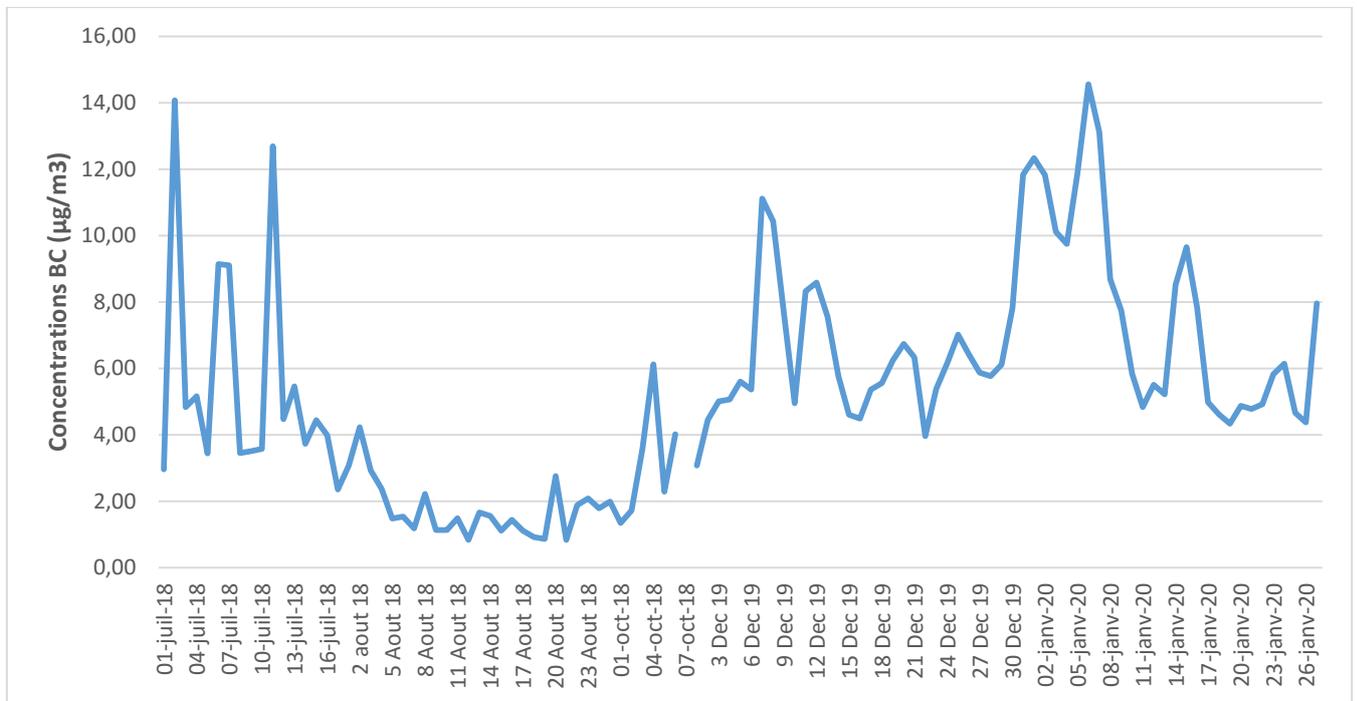
		Concentration de BC (µg/m <sup>3</sup> )	
		S.S	S.H
Diurne	Min	1,31	Min 0,21
	Max	2,69	Max 0,56
	Moy	1,79 ± 0,3	Moy 0,34 ± 0,09

### 3.2- Concentrations de BC à Abidjan : milieu urbain

#### 3.2.1- Variations des concentrations journalières de BC sur la période d'étude

Nous présentons sur la figure 17 les variations des concentrations journalières de BC à Abidjan du 01 Juillet 2018 au 27 Janvier 2020. Rappelons qu'il y a eu un manque de données

du 18 au 31 Juillet 2018 ; du 26 Aout au 30 Aout 2018 ; Septembre 2018 ; du 08 au 31 Octobre 2018 ; De Novembre 2018 à Novembre 2019 et du 26 au 31 Décembre 2019. De même, rappelons que la grande saison sèche s'étend de Décembre à Mars et la petite d'Août à Septembre ; La grande saison humide, d'Avril à Juillet et la petite, d'Octobre à Novembre.



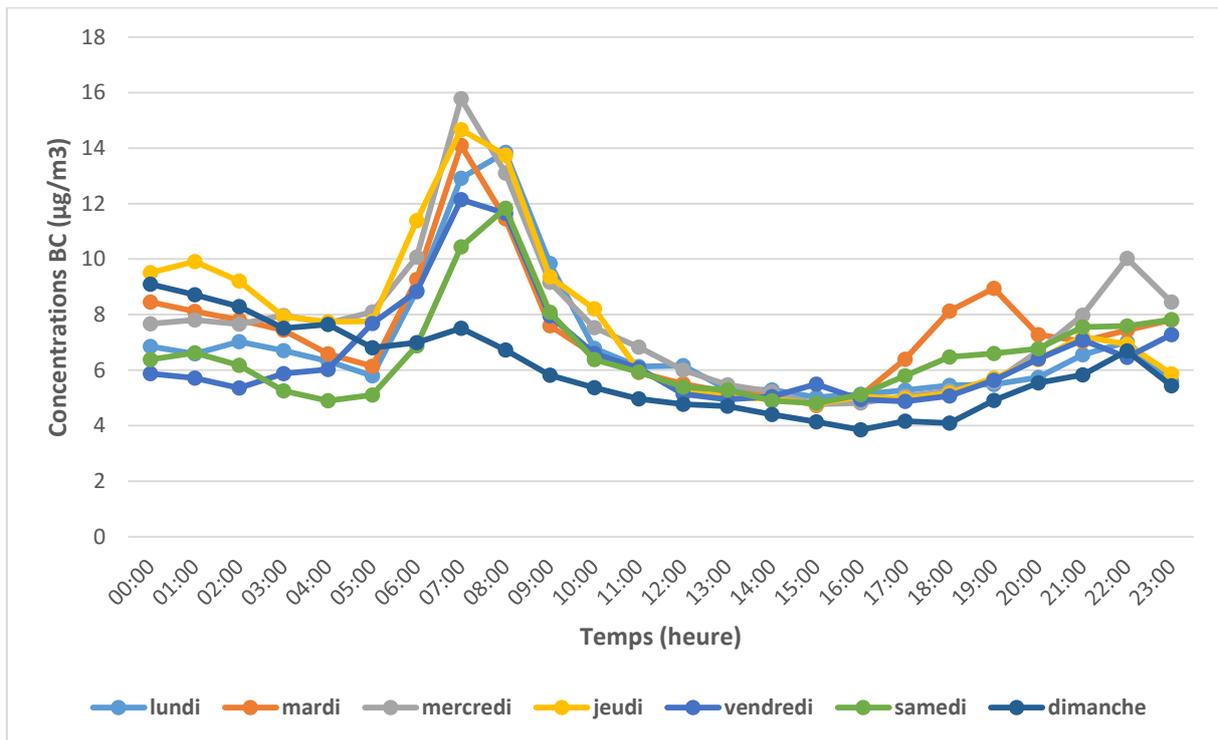
**Figure 17** : Variations des concentrations journalières de BC sur la période, à Abidjan

On remarque sur l'année 2018 que les concentrations de BC diminuent progressivement de Juillet à Août ( $14,07 \mu\text{g.m}^{-3}$  à  $0,83 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) puis augmentent d'Aout à Octobre où elles atteignent une valeur maximale de  $6,12 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Les concentrations présentent des valeurs importantes en Décembre et Janvier avec des pics de  $11,11 \mu\text{g.m}^{-3}$  et  $14,56 \mu\text{g.m}^{-3}$  respectivement. Bien que le mois de Juillet (mois de saison humide) présente une valeur élevée de concentrations de BC, on observe tout de même des concentrations journalières de BC un peu plus importantes en saison sèche à l'exception du mois d'Aout.

Ce faible niveau en Août est en partie dû d'une part à une baisse du trafic routier due à la période des vacances. Période pendant laquelle les populations urbaines sont absentes (déplacement à l'intérieur ou à l'extérieur du pays). D'autre part, aux faibles températures de l'air que connaît la ville Abidjan durant ce mois d'Août. Ces faibles températures de l'air s'expliquent par des températures de surfaces océaniques (SST), plus froides au large des côtes du Golfe de Guinée. En effet, ces basses températures ne favorisent pas certains processus de combustions comme la combustion de déchets, observée par endroit aux alentours du site.

Les niveaux de concentrations relativement élevés du mois de Juillet quoiqu'étant en pleine saison des pluies, peuvent se justifier en zone urbaine par des émissions de trafic assez importantes. En effet la chute du niveau de concentration de BC après mi-juillet peut être interprétée comme une chute du trafic routier liée à la période des grandes vacances scolaires. En fait, comparées aux combustions de biomasse, les combustions fossiles constituent les sources majeures de rejet de BC en saison humide qu'en saison sèche (Thierno, 2012).

### 3.2.2- Evolution diurne de BC pour tous les jours de la semaine



**Figure 18** : Evolutions des concentrations diurnes moyennes de BC des jours de la semaine (Du lundi au dimanche) sur la période 01 décembre 2019- 27 janvier 2020, à Abidjan

La figure 18 présente l'évolution diurne des concentrations de BC des jours de la semaine (Lundi au Dimanche). Les jours de la semaine sont moyennés sur deux mois (01 décembre 2019 au 27 janvier 2020). L'analyse indique une allure assez similaire de l'évolution diurne des concentrations de BC pour les jours de la semaine du Lundi au Samedi, à l'exception de dimanche. Les concentrations de BC croissent progressivement en début de matinée de 5h à 8h entre  $5,11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (samedi) et  $15,77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (mercredi), elles décroissent ensuite jusqu'à 12h autour de  $4,77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , heure à partir de laquelle elles restent pratiquement constantes jusqu'à 16h. A partir de 16h, les concentrations présentent de nouveau une hausse jusqu'aux environs de 21h avant de redescendre à environ  $5,88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  vers 00h. On note que l'évolution diurne de

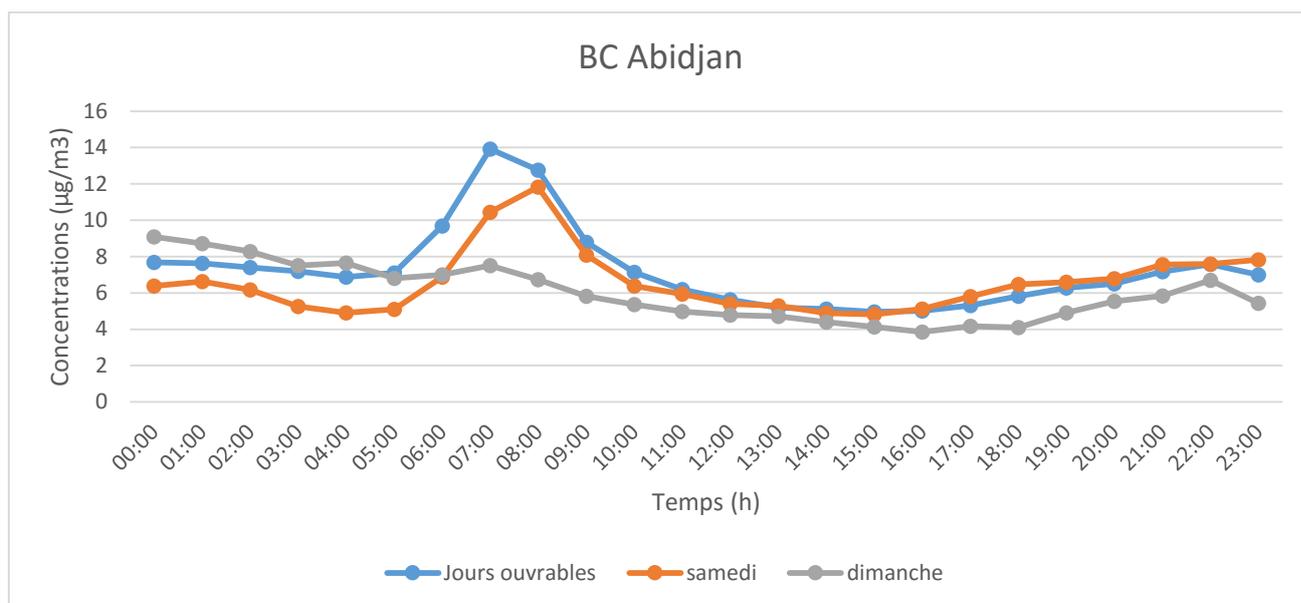
BC pour Samedi à la même allure que celle des jours (Lundi-Vendredi). Nous notons cependant un décalage temporel et un niveau de concentration bas. On observe par contre dans la soirée du jour samedi, une hausse des concentrations (à partir de 16h avec  $5,11 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) qui se maintiennent jusqu'à environ minuit (à  $7,82 \mu\text{g.m}^{-3}$ ).

Les évolutions des concentrations de BC présentent donc en général des pics en début de matinée et le soir, correspondants aux heures de pointes (Thierno, 2012). Tandis que les plus faibles valeurs sont obtenues entre midi et 16h. Ce pic observé dès 7h suggère la corrélation existante entre source de trafic et émissions de BC. En effet, en début de matinée, la principale source est le trafic routier qui s'intensifie à cause des personnes qui se rendent au travail : plusieurs engins (automobiles, motos à deux roues etc.) en circulation, dégagent de la fumée noire qui est ensuite rejetée dans l'atmosphère. Cet état de cause pourrait être combiné à la stabilité de la couche limite (faible température en surface les matins) qui empêche la dispersion du BC (pollution locale). Aussi pouvons-nous souligner la contribution de plusieurs industries de raffinage de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel...) qui dégagent en grande quantité des polluants carbonés dont le BC dans l'atmosphère.

Les niveaux de concentrations montent à partir de 16h et cela peut s'expliquer par le fait du retour à domicile caractérisé par un trafic routier important. Les valeurs élevées observées dans la nuit (19h-21h) peuvent être attribuées à certains facteurs. A ce moment-là, les feux domestiques se produisent intensément (la plupart des gens utilisent la combustion du bois et du charbon de bois pour la cuisson), les sources de de trafic sont aussi importantes en raison de la circulation nocturne et l'on assiste souvent à des brulages de pneus. Les concentrations baissent de 00h à environs 4h, marquant ainsi la fin de certaines activités émettrices et une diminution considérable de la circulation automobile.

### **3.2.3- Différences diurnes entre jours ouvrables et jours fériés**

Les concentrations diurnes de BC ont été moyennées du lundi au vendredi afin de distinguer l'évolution globale de ces concentrations pendant les jours ouvrables de celles obtenues pendant le week-end (Samedi et Dimanche) et parallèlement permettre la mise en évidence du fait que les émissions de BC soient modulées par les activités humaines professionnelles. Rappelons que ces mesures ont été effectuées à l'Université UFHB d'Abidjan.



**Figure 19** : Evolution des concentrations diurnes moyennes de BC pour les jours ouvrables (du lundi au vendredi) et pour les jours fériés (samedi et dimanche) sur la période 01 décembre 2019-27 janvier 2020, à Abidjan.

On note une variabilité quasi-identique dans les deux cas (jours ouvrables, samedi et dimanche). On observe de même les maxima entre 6h-9h et de 17h jusqu'à tard dans la nuit. L'évolution des concentrations de BC les dimanches présente des niveaux de concentrations assez faibles et une allure différente (entre 5,82 et 7,50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) par rapport à ceux obtenus les jours ouvrables (entre 8,78 et 13,92  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et les samedis (6,98 et 11,83  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Cela pourrait s'expliquer par une baisse considérable d'activités professionnelles et donc du trafic pendant le week-end, qui est encore plus marqué les dimanches (jour consacré au repos) comparativement aux samedis. Le même phénomène est observable entre 9h et 17h, heure à partir de laquelle les concentrations de BC croissent. De 19h à 22h, les concentrations les samedis (de 6,6 à 7,59  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) sont plus importantes que celles observées les jours ouvrables (de 6,59 à 7,58  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et les dimanches (de 4,9 à 6,69  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). En effet, il s'agit de l'effet week-end qui est caractérisé par la sortie massive de personnes (trafic routier), des ventes nocturnes (combustion du bois, combustion du charbon de bois) etc. Toutefois, les fortes concentrations observées les dimanches vers 2h-4h pourraient s'expliquer par la stabilité que connaît la couche limite atmosphérique à ces heures induisant ainsi le piégeage des particules d'aérosols près de la surface.

A l'issue des travaux effectués par Thierno (2012) dans la ville de Bamako, les concentrations diurnes pendant les jours ouvrables et le week-end étaient respectivement de 30  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  et 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , pics obtenus entre 6h et 9h. Comparativement à nos travaux, les

concentrations obtenues en week-end sont du même ordre de grandeur, alors que les concentrations obtenues à Bamako pendant les jours ouvrables sont environ 2 fois plus élevées que celles obtenues dans le cadre de nos travaux.

**Tableau V:** Comparaison des concentrations diurnes (jours ouvrables et week-end) à Bamako (2008) et Abidjan (2018-2020).

Références	Concentration de BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	Jours ouvrables	Week-end
Thierno <i>et al</i> (2012)	30	10
Nos travaux de 2015 à 2017	13,92	11,83

### 3.3- Comparaison des niveaux de concentrations de Lamto à ceux d'Abidjan

Nous avons précédemment relevé que l'étude temporelle des concentrations de BC mesurées sur le site urbain (Abidjan) n'a pu être faite qu'à l'échelle diurne contrairement au site rural (Lamto) où la base de données disponible nous a permis de faire une analyse à différentes échelles temporelles (mensuelle, saisonnière, journalière et horaire). De ce fait, dans cette section, nous comparons les niveaux de concentrations diurnes de BC observés sur les deux sites de notre étude, le site rural (Lamto) et le site urbain (Abidjan). A Lamto, la variabilité des concentrations diurnes de BC est plutôt faible en période sèche avec une concentration maximale de  $2,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (18h) et un minimum de  $1,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (6h30). En saison humide, on observe une variabilité quasi-identique des concentrations de BC avec un maximum de  $0,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et un minimum de  $0,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (3h). En zone urbaine (Abidjan) par contre, les variations des concentrations diurnes de BC sont assez importantes. On observe un maximum de  $15,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Mercredi aux environs de 7h) et un minimum de  $3,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (obtenue vers 16h). La variabilité des concentrations de BC en zone urbaine (Abidjan) est assez notable par rapport à celle observée en zone rurale (Lamto).

Par ailleurs nos analyses révèlent d'une part des niveaux de concentrations de BC obtenus à Lamto (zone rurale) plus faibles que ceux observés à Abidjan (zone urbaine). En effet, à l'échelle diurne, la plus faible valeur des concentrations recueillies à Abidjan ( $3,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est supérieure à la valeur maximale obtenue à Lamto. Le rapport entre les valeurs maximales est de l'ordre de 5,86. Nous notons également que les sources d'émissions en zone urbaine sont actives en permanence contrairement à celles en zone rurale qui sont plutôt intermittentes : les sources d'émission sont plus actives en saison sèche qu'en saison humide. D'autre part, les concentrations observées sur le site urbain d'Abidjan sont du même ordre de grandeur que celles

obtenues à Bamako (week-end) et environ deux fois en-dessous les jours ouvrables. Notons également que certaines de ces concentrations en milieu urbain sont légèrement au-dessus de la norme journalière fixée par l'OMS ( $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (Thierno, 2012). Ainsi, les niveaux de concentrations de BC en zone urbaine sont alarmants contrairement à ceux en zone rurale, dont les niveaux demeurent en deçà des normes journalières internationales. Ce résultat, tout aussi prévisible, souligne une fois de plus l'action anthropique sur la composition chimie de l'atmosphère et la qualité de l'air, particulièrement dans les grands centres urbains africains en proie à une démographie galopante et à une urbanisation peu planifiée.

Dans le cadre du programme international INDAAF (milieu rural), réseau d'observation et de suivi de la composition atmosphérique en Afrique tropicale, et celui du projet PASMU (milieu urbain), ce travail nous a permis de déterminer et d'analyser les niveaux de concentrations de Black Carbon BC à différentes échelles temporelles à Lamto et Abidjan. Cette étude a permis d'incriminer les sources d'émissions de BC en zones rurale et urbaine. A la station de Lamto, nous avons estimé les niveaux des concentrations moyennes diurnes, mensuelles et saisonnières de BC. Les plus fortes valeurs des concentrations mensuelles sont enregistrées durant la saison sèche ( $3,942 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en Décembre 2015), et les plus faibles, en saison humide ( $0,046 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en Aout 2015) avec une moyenne de  $1,14 \pm 0,84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Les concentrations moyennes saisonnières de BC varient de  $2,23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  à  $2,27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  avec une moyenne de  $2,2 \pm 0,02$  en saison sèche. En saison humide, elles varient de  $0,28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  à  $0,73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  avec une moyenne de  $0,6 \pm 0,19$ . L'ordre de grandeur d'une saison à une autre est de 3,11 pour les maxima, 7,96 pour les minima et 3,67 pour les moyennes.

En saison sèche, les concentrations diurnes varient de  $1,31$  à  $2,69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (pic à 13h30) avec une moyenne de  $1,79 \pm 0,3$ , et de  $0,21$  à  $0,54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (pic à 18h) avec une moyenne de  $0,34 \pm 0,09$  en saison humide. Les variations saisonnières et l'évolution des concentrations diurnes de BC présentent d'importantes valeurs en saison sèche qu'en saison humide. Notre analyse a montré que les concentrations de BC en zone rurale de Lamto sont liées principalement aux sources de combustion de biomasse à travers le brûlage des terres agricoles et les feux domestiques. Les émissions de BC dans l'atmosphère à Lamto sont secondairement influencées par des paramètres climatiques comme la pluie, à travers le phénomène de lessivage ; et par les températures de l'air dont la hausse en journée de saison sèche favorise les combustions de biomasse à ciel ouvert.

Nos travaux effectués en zone urbaine d'Abidjan ont permis de distinguer les niveaux de concentrations journalières de BC variant de ( $0,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en août 2018) à ( $14,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en décembre 2020) avec une moyenne de  $5,31 \pm 2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les niveaux de concentrations diurnes de BC, les jours ouvrables varient de ( $13,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à 7h) à ( $6,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à 4h) et de ( $11,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à 8h) à ( $3,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à 16h) les jours fériés. En zone urbaine, nos analyses ont montré que la principale source de pollution en aérosol BC est la source trafic routier, source à laquelle s'ajoute la source domestique (ménages et commerces).

L'étude comparative des niveaux de concentration de BC en milieux rural et urbain indique des niveaux de concentrations de BC en zone urbaine plus alarmants, contrairement à ceux des zones rurales, dont les niveaux demeurent en deçà des normes journalières internationales. Le rapport entre les valeurs maximales est de l'ordre de 5,86.

La variabilité des concentrations diurnes de BC à Lamto, est plus notable durant la période sèche avec une concentration maximale de  $2,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (18h) et un minimum de  $1,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (6h30). Tandis qu'elle demeure quasi-identique durant les périodes humides.

La variabilité des concentrations de BC en zone urbaine (Abidjan) est assez notable par rapport à celle observée en zone rurale (Lamto). Cette variabilité est permanente contrairement en zone rurale qui a un caractère saisonnier. Ce résultats semblent être liés au fait que les sources d'émissions en zone urbaine sont actives en permanence contrairement à celles en zone rurale qui sont plutôt intermittentes.

## **CONCLUSION**

Ce travail de Master a été effectué dans le cadre des activités du réseau d'observation INDAAF (en milieu rural) et du projet PASMU (en milieu urbain). Il est consacré à l'évaluation et au suivi des niveaux de concentrations des aérosols Black Carbon en milieu rural (de Janvier 2015 à Mai 2017) et urbain (Abidjan : Juillet 2018-Janvier 2020). Le Black Carbon est un traceur de combustion connu pour ses impacts sur la santé des populations. Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé les concentrations atmosphériques de BC obtenues par un analyseur actif, l'Aethalomètre AE33, dans le cadre du réseau INDAAF (rural) et PASMU (urbain). Un des avantages de l'analyseur actif est la mesure en temps réel, contrairement aux passifs pour lesquels, une analyse ultérieure en laboratoire pour la collecte des données, est nécessaire.

En milieu rural, la collecte s'est faite à la station de Lamto sur une période de trois ans (de 2015 à 2017). En milieu urbain (Abidjan), l'échantillonnage s'est fait de Juillet 2018 à Janvier 2020. A Lamto, les résultats de la présente étude ont permis d'évaluer les niveaux de concentrations de l'aérosol carboné Black Carbon à plusieurs échelles de temps. A l'échelle saisonnière, on observait une valeur moyenne de  $2,2 \pm 0,019 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en saison sèche et de  $0,6 \pm 0,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en saison humide. Le ratio S.S/S.H est de 3,67. A l'échelle mensuelle, les concentrations de BC oscillent entre  $0,046 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Août) et  $3,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Décembre) avec une moyenne de  $1,141 \pm 0,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur la période d'étude. Il en ressort que les plus fortes concentrations mensuelles de BC sont observées en période de saison sèche. En ce qui concerne les concentrations diurnes saisonnières, les moyennes sont de  $1,79 \pm 0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et de  $0,34 \pm 0,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en saisons sèche et humide respectivement. Le ratio S.S/ S.H est de 5,26. Notre étude a montré que les concentrations de BC sont principalement liées aux processus de combustions de biomasses à travers des activités anthropiques telles que l'agriculture itinérante et les feux de savanes. On assiste pendant ces périodes à des combustions de biomasses qui seraient nécessaires à la mise en culture, à des combustions de bios fuels comme le bois, par moment. Elle a également montré que la variation des concentrations de BC à Lamto a aussi un caractère saisonnier qui s'explique par le fait que les sources impliquées dans ces émissions telles que la source feux de savane, sont très actives en saison sèche. Les concentrations de BC sont aussi influencées par des facteurs météorologiques comme la pluie : les concentrations moyennes mensuelles diminuent en saison humide car l'atmosphère est lessivée par la pluie.

En milieu urbain, la base de données mise à disposition ne nous a pas permis de faire une étude à l'échelle mensuelle ni saisonnière. La caractérisation a plutôt été faite à l'échelle journalière principalement par rapport aux jours ouvrables et les jours de week-end. Les concentrations diurnes de BC constatées les jours ouvrables sont supérieures à celles observées les jours fériés. L'évolution à cette échelle présente deux pics, le premier en début de matinée (7h-9h :  $8,78$  et

13,92  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) et l'autre dans la soirée (19h-22h : 6,59 à 7,58  $\mu\text{g.m}^{-3}$ ). Les concentrations diurnes les plus faibles s'observent entre 12h et 17h. Les maxima obtenus étaient principalement liés aux sources de combustions du fuel (trafic routier, industries...) tandis que les plus petites valeurs dans l'après-midi se justifient par la diminution de toutes ces activités citées plus haut. On observait toutefois de grandes valeurs les samedis dans la nuit en raison de l'effet « samedi soir ». L'étude a montré qu'en milieu urbain l'évolution des concentrations est principalement influencée par la source trafic (combustions fuel fossile de moteur de véhicule) et la source feux domestiques (combustion de bois, charbon etc). Ces deux sources étant liées aux activités anthropiques en rapport avec le mode de vie urbain. Au vue de ces deux analyses (milieux rural et urbain), il en ressort que les sources émettrices de BC en zone urbaine sont actives toute l'année et émettent de fortes concentrations de BC en zone urbaine, comparées à celles en zone urbaine et dégagent de fortes concentrations de BC, comparées à celles en zone rurale qui sont plutôt sporadiques (les feux de savane sont actifs en saison sèche où l'on observe de fortes valeurs de concentrations de BC). Ce travail se présente donc comme une contribution à l'étude de la composition chimique atmosphérique plus précisément de la pollution particulaire, en vue d'aboutir à une surveillance de la qualité de l'air en Afrique où les impacts des actions sur l'environnement et le climat sont avérés. Les activités anthropiques (trafic routier, les activités industrielles et domestiques), l'urbanisation non planifiée, la démographie galopante, sont considérées en Afrique tropicale comme des sources majeures d'émissions de polluants (particulaires et gazeux) dans l'atmosphère. Ces polluants pourraient induire dans les décennies à venir, une pollution atmosphérique plus inquiétante dans les grands centres urbains en Afrique tropicale si rien est fait. De ce point de vue, il est essentiel de surveiller les niveaux des polluants atmosphériques gazeux et particulaires en milieux urbains et ruraux, en poursuivant les campagnes de mesures et d'évaluer par la suite leurs impacts sur le climat, l'environnement et la santé des populations. C'est donc dans ce cadre que différents programmes et projets se déroulent. En l'occurrence, le Programme international INDAAF, qui a permis cette présente étude et le projet PASMU (Pollution de l'Air et Santé dans les Milieux Urbains de Côte d'Ivoire). Ce projet est en cours d'exécution (Avril 2018-Avril 2021) sous coordination par le Professeur YOBOUE Véronique, responsable de l'équipe « Aérosols et pollutions » du Laboratoire d'Aérodologie de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF). Il regroupe en son sein des équipes interdisciplinaires de Physico-chimistes, médecins, toxicologues, sociologues de différents instituts de recherches et des universités d'Abidjan, de Korhogo et de Toulouse. PASMU a pour objectif d'étudier la pollution

de l'air des villes d'Abidjan et Korhogo (Côte d'Ivoire) et son impact sur la santé des populations urbaines, particulièrement sur l'appareil respiratoire.

En vue de continuer la surveillance des niveaux de concentrations des polluants gazeux et particulaires, il serait primordial de poursuivre les campagnes de mesures de ces polluants. Particulièrement, poursuivre ces campagnes à Abidjan afin d'établir une carte de pollution de BC, car le seul site pour cette étude (UFHB) n'est pas représentatif de la ville d'Abidjan. En outre, pour s'assurer de la fiabilité du nouvel appareil de mesure (AE33), l'on devrait inter-comparer les résultats obtenus sur différentes stations du réseau INDAAF. Enfin, en tenant compte des sources d'émission de BC en milieu urbain, l'on devrait également mettre en place des politiques d'urbanisation adéquates afin de minimiser les émissions de BC.

## **REFERENCES**

- Ackerman S., Toon O., Stevens E., Heymsfield A.J., Ramanatahn V. & Welton E. J. (2000). Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, 288 : 1042-1047.
- Adon Aka J., Liousse C., Doumbia T., Baeza-Squiban A., Cachier H., Léon J-F., Yoboué V., Akpo B.A., Galy-Lacaux C., Guinot B., Zouiten C., Xu H., Gardrat E. & Kéita S. (2020). Physico-chemical characterization of urban aerosols from specific combustion sources in West Africa at Abidjan in Côte d'Ivoire and Cotonou in Benin in the frame of the DACCIWA program. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20 : 5327-5354.
- Adon M., Delon C., Yoboué V., Solmon F. & Kaptue Tchuenta A.T. (2013). Dry deposition of nitrogen compounds (NO<sub>2</sub> , HNO<sub>3</sub> , NH<sub>3</sub>), sulfur dioxide and ozone in west and central African ecosystems using the inferential method. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 11351–11374.
- Adon M., Galy-Lacaux C., Yoboué V., Delon C., Lacaux J.P., Castera P. & Gardrat E. (2010). Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10: 7467– 7487.
- Adon M., Yoboué V., Galy-Lacaux C., Liousse C., Diop B., Doumbia E.H.T., Gardrat E., Ndiaye S.A. & Jarnot C. (2016). Measurements of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub> in West African urban. *Atmosphere Environment*, 135: 31–40.
- Assamoi E.M., (2011). Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030 : élaboration d'inventaires et évaluation . Thèse de Doctorat en Physique-Chimie de l'Atmosphère, Université de Toulouse, (Toulouse,France), 246p.
- Aymoz, G. (2005). Etude de la fraction carbonée de l'aérosol atmosphérique à Chamonix et St Jean de Maurienne : évolutions saisonnières, sources et caractéristiques chimiques. Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Joseph Fourier, (Grenoble 1, France), 276p.
- Bahino D.J. (2013). Caractéristiques chimiques des aérosols carbonés collectés par spéciation de taille PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> dans la forêt équatoriale de Zoétélé (Cameroun) . Mémoire de Master 2 Energetique et Environnement, Université Félix Houphouet Boigny Abidjan, (Abidjan,Cote d'Ivoire), 74p.
- Bahino J., Yoboué V., Galy-Lacaux C., Adon M., Akpo A., Keita S., Liousse C., Gardrat E., Chiron C., Ossouhou M., Gnamien S. & Djossou J. (2018). A pilot of gaseous pollutants measurement (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub>) in Abidjan, Cote d'Ivoire : Contribution to an overview of gaseous pollution in African cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18 : 5173-5198.

- Berico M., Luciani A. & Formignani M. (1997). Atmospheric aerosol in an urban area – measurements of TSP and PM10 standards and pulmonary deposition assessment. *Atmospheric Environment*, 31(21): 3659–3665.
- Bodhaine B.A. (1995). Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 100: 8967–8975.
- Bond T.C., Streets D.G., Yarber K.F., Nelson S.M., Woo J.H. & Klimont Z. (2004). A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J. Geophys. Res., Atmospheres*, 109: 2140-2550.
- Bond T.C., Doherty S. J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G. & Zender C.S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment: Black Carbon in the climate system. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 118: 5380–5552.
- Brocard D., Lacaux C., Lacaux J-P., Kouadio G. & Yoboue V. (1996). Emissions from the combustion of biofuels in western Africa. *Biomass Burn. Glob. Change*, 1: 350–360.
- Cahier H. (1998). Carbonaceous Combustion Aerosols. *Atmospheric Particles*, ed : 296-348.
- Chevrier F. (2018). Black Carbon, Bilan de mesures de l'année 2017. *Air PACA, Qualité de l'Air*, 1 : 2-3.
- Chiron C., Ossouhou M., Gniamian S. & Djossou J. (2018). A pilot study of gaseous pollutants measurement (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, and O<sub>3</sub>) in Abidjan, Côte d'Ivoire : Contribution to an overview of gaseous pollution in African cities. *Atmospheric Chemistry Physics*, 18 : 5173-5198.
- D'Almeida G.A., (1986). A model for Saharan dust transport, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25 : 903-916.
- Delmas R., Lacaux J.P., Menaut J.C., Abbatic L., Le Roux X., Helas G. & Lobert G. (1995). Nitrogen Compound emission from biomass burning in tropical African savanna. *FOS/DECAFE 91 Experiment (Lamto, Ivory Coast). Journal of Atmospheric Chem*, 22 : 175-194.
- Djossou, J. (2018). Analyse de la pollution atmosphérique en zones urbaines en Côte d'Ivoire et au Bénin dans le cadre du programme DACCIWA : Pollution particulaire. Thèse de

- Doctorat en Physique de l'Atmosphère, Université D'Abomey-Calavi (Cotonou, Benin), 159 p.
- Djossou J., Léon J-F., Akpo A., Liousse C., Yoboué V., Bedou M., Bodjrenou M., Chiron C., Galy-Lacaux C., Gardrat E., Abbey M., Keita S., Bahino J., Touré N'Datchoh E., Osohou M. & Awanou C.N. (2018). Mass concentration, optical depth and carbon composition of particulate matter in the major southern West African cities of Cotonou (Benin) and Abidjan (Cotee d'Ivoire). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18: 6275-6291.
- Doumbia T., (2012). Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique urbaine en Afrique de l'Ouest et étude d'impact sur la santé. Thèse de Doctorat en Physique et Chimie de l'Atmosphère, Université Paul Sabatier (Toulouse, France), 232 p.
- Galy-Lacaux C., Laouali D., Descroix L., Gobron N. & Liousse C. (2009). Long term precipitation chemistry and wet deposition in a remote dry savanna site in Africa (Niger). *Atmosphere Chemistry*, 9 : 1579-1595.
- Guillaume B. (2006). Les aérosols: émissions, formation d'aérosols organiques secondaires, transport longue distance-Zoom sur les aérosols carbonés en Europe. Thèse de Doctorat en Physique et Chimie de l'Atmosphère, Université de Toulouse (Toulouse, France), 280 p.
- Hansen A. (2005). The Aethalometer. *Magee Scientific Company*, Berkeley (California, USA), 208 p.
- Hansen A.D.A., Conway T.J., Strele L.P., Bodhaine B.A., Thoning K.W., Tans P. & Novakov T. (1989). Correlations among combustion effluent species at Barrow, Alaska: Aerosol black carbon, carbon dioxide, and methane. *Journal of Atmospheric Chem*, 9: 283–299.
- Hansen J., Sato M. & Ruedy R. (1997). Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research*. 102: 6831-6864.
- Hao W. M. & Liu M-H. (1994). Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 8(4): 495-503.
- Haywood J.M., Shine K.P. (1995). The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget. *Geophys. Res. Lett*, 22: 603-606.
- Haywood J., Boucher O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 38(4): 513 – 543.
- Hodzic A. (2005). Modélisation des aérosols de pollution en Ile-De-France. Thèse De

- Doctorat De L'école Polytechnique, Institut Pierre-Simon Laplace (France), 272 p.
- IPCC. (2001). The scientific basis, *Contribution of Working Group I in The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York (USA), 881 p.
- IPCC. (2007). The Physical Science Basis, *Contribution of Working Group I at the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York (USA), 978p.
- Junker C. & Liousse C. (2008). A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860-1997. *Atmospheric Chemistry Physics*, 8: 1-13.
- Kacenenbogen-Tilot M. (2008). Application de la télédétection spatiale à la surveillance de la pollution en aérosols. Thèse de Doctorat en Lasers, Molécules, Rayonnement Atmosphérique, Université de Lille I, (Lilie I, France), 181 p.
- Keita S. (2018). Emissions anthropiques des gaz et particules issus des combustions en Afrique: élaboration d'inventaire et évaluation d'incertitudes. . Thèse de Doctorat en Physique Chimie de l'Atmosphère, Université Felix Houphouet Boigny D'abidjan (Abidjan, Cote d'Ivoire), 214 p.
- Kiehl J.T. & Briegleb B.P. (1993). The relative roll of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 260: 311-314.
- Kirchstetter T.W., Novakov T., Hobbs P.V. (2004). Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 109 p.
- Korgo B. (2014). Caractérisation optique et microphysique des aérosols atmosphériques en zone urbaine ouest africaine: application aux calculs du forçage radiatif à Ouagadougou. Thèse de Doctorat en Physique de l'Atmosphère, Université Blaise Pascal (Ouagadougou, Burkina Faso), 162 p.
- Lacaux J-P., Brocard D., Lacaux C., Delmas R., Brou A., Yoboué V. & Koffi M. (1994). Traditional charcoal making: an important source of atmospheric pollution in the African tropics. *Atmospheric Research*, 35: 71-76.
- Liousse C., Penner J.E., Chuang C., Walton J.J., Eddleman H. & Cachier H. (1996). A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 101: 19411-19432.
- Mallet M., Pont V., Liousse C., Gomes L., Pelon J., Osborne S., Haywood J., Roger J.,

- Dubuisson P., Mariscal A., Thouret V. & Goloub P. (2008). Aerosol direct radiative forcing over djougou (northern Benin) during the African monsoon multidisciplinary analysis dry season experiment (special observation period-0). *Journal of Geophysical Research*, 113: 10.
- Mallet M., Roger J.C., Despiiau S., Dubovik P. & Putaud J.P. (2003). Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE. *Atmospheric Research*, 69: 73-97.
- Nenmar A., Hoet P.H.M., Dinsdale D., Vermeylen J., Hoylaerts M.F. & Nemery B. (2003). Diesel exhausts particles in lung acutely enhance experimental peripheral thrombosis. *Circulation*, 107: 1202-1208.
- Nenmar A., Hoet P.H.M., Vanquickenborne B., Dinsdale D., Thomeer M., Hoylaerts M. F., Vanbilloen H., Mortelmans L. & Nemery B. (2002). Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*, 105 : 411-414.
- Ouafo, M.L. (2010). Etude de la composition physico-chimique, des sources émettrices et des effets sur la santé humaine des aérosols atmosphériques en zones rurales et urbaines en Afrique tropicale. Thèse de Doctorat en Chimie Atmosphérique, Université de Toulouse (Toulouse, France), 208 p.
- Roden C.A., Bond T.C., Conway S., Pinel A.B.O. (2006). Emission Factors and Real-Time Optical Properties of Particles Emitted from Traditional Wood Burning Cookstoves. *Environmental Science & Technology*, 40: 6750–6757.
- Sciare J., Favez O., Sarda-Estève R., Oikonomou K., Cachier H. & Kazan V. (2009). Long-term observations of carbonaceous aerosols in the Austral Ocean atmosphere: Evidence of a biogenic marine organic source. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114 p.
- Seinfeld J.H. & Pandis S.N. (1998). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. *J. Wiley, New York, Chichester*, 1326 p.
- Tegen I., Koch D., Lacis A. & Sato M. (2000): Trends in tropospheric aerosol loads and corresponding impact on direct radiative forcing between 1950 and 1990 : A model study. *Journal of Geophysical Research*, 105: 26971-26989.
- Twomey S.A. (1974). Pollution and the planetary albedo, *Atmospheric Environment*, 8: 1251-1256.
- Val S., Liousse C., Doumbia T., Galy-Lacaux C., Cachier H., Marchand N., Badel A., Gardrat E., Sylvestre A. & Baeza-Squiban A. (2013). Physico-chemical characterization of African urban aerosols (Bamako in Mali and Dakar in Senegal) and their toxic effects

- in human bronchial epithelial cells: description of a worrying situation. *Particle and Fibre Toxicology*, 10:10-15.
- Whitby K.T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment*, 12: 135-159.
- WHO. (2006). Air quality guidelines, global update 2005, World Health Organization regional office for Europe. *Copenhagen*, 484 p.
- Yoboué V., Galy-Lacaux C., Lacaux J.P. & Silué S. (2005). Rainwater Chemistry and 56 Wet Deposition over the Wet Savana Ecosystem of Lamto (Côte d'Ivoire). *Atmospheric Chemistry*, 52 :117-141.

## RESUME

Ce mémoire de Master s'est consacré à l'évaluation et au suivi des niveaux de concentrations du Black Carbon (BC, polluant particulaire carboné) en milieu rural (Lamto : de Janvier 2015 à Mai 2017) et urbain (Abidjan : Juillet 2018-Janvier 2020). Il s'inscrit dans le cadre du réseau d'observation INDAAF pour la zone rurale et dans le cadre du projet PASMU pour la zone urbaine. Les concentrations ont été mesurées en temps réel à l'aide d'un appareil actif, l'Aéthalomètre AE33 à sept longueurs d'ondes.

Sur le site rural de la savane humide de Lamto, nous observons des concentrations moyennes mensuelles qui varient de  $0,094 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Août) à  $3,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Décembre) avec une valeur moyenne mensuelle de  $1,141 \pm 0,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . L'étude saisonnière a mis en évidence une saisonnalité bien marquée avec une concentration moyenne en saison sèche, plus de trois (03) fois plus élevée que celle en saison humide, respectivement de  $2,2 \pm 0,019 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et de  $0,6 \pm 0,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations diurnes donnent des moyennes de  $1,79 \pm 0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et de  $0,34 \pm 0,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivement en saisons sèche et humide (ordre de grandeur : 5,26). Ces fortes concentrations de BC observées en saison sèche sont fortement liées aux différents processus de combustions (feux de savanes) très actifs à cette période de l'année et aux paramètres climatiques, en particulier la pluviométrie. En zone urbaine, l'étude n'a pu être possible qu'à l'échelle du jour et les niveaux de concentrations journalières de BC observés varient entre  $0,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $14,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations horaires calculées fluctuent entre  $3,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (autour de 16h) et  $13,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (7h) et varient suivant les jours de la semaine. Malgré les discontinuités dans la base de données en zone urbaine, notre étude a réussi à montrer que l'évolution des concentrations de BC est influencée majoritairement par des activités anthropiques en rapport avec le mode de vie urbain que sont la source trafic routier et la source feux domestiques (ménage). L'étude comparative entre le rural et l'urbain montre des concentrations journalières environ 6 fois plus élevées sur le site urbain, dues aux sources de combustion plus intenses et permanentes, contrairement à la source feux de savane qui est sporadique (présente en saison sèche).

Mots clés : Black Carbon, INDAAF, PASMU, combustion, rural, urbain.

## ABSTRACT

This Master's thesis was devoted to the evaluation and monitoring of the levels of concentrations of Black Carbon (BC, a carbonaceous particulate pollutant) in rural areas (Lamto: from January 2015 to May 2017) an urban areas (Abidjan: July 2018- January 2020). It is a part of the framework of the INDAAF observation network for rural areas and within the framework of the project PASMU for the urban area. Concentrations were measured in real time using a active device, the seven-wavelength Aethalometer AE33. On the rural site of the Lamto wet savannah, we observe concentrations monthly averages that range from  $0.094 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (August) to  $3.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (December) with an monthly mean value of  $1.14 \pm 0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The seasonal study found a well marked seasonality with an average concentration in the dry season, more than three times higher than in the wet season, by  $2.2 \pm 0,019 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $0.6 \pm 0.19$ , respectively. Daytime concentrations give averages of  $1.79 \pm 0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $0.34 \pm 0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectively in the dry and wet seasons (order of magnitude : 5.26). These high BC concentrations observed in the dry season are strongly related to the different combustion processes (savannah fires) which are very active at this time of the year and in the climatic parameters, in particular rainfall. In the urban areas, the study was only possible at the scale of the day and the levels of observed daily BC concentrations range from  $0.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $14.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The calculated hourly concentrations fluctuate between  $3.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (around 4 pm) and  $13.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (7am) and vary dependind on the day of the week. Despite the discontinuities in the data in urban areas, our study was able to show that the evolution of the concentrartions of BC is mainly influenced by antropogenic activities related to the mode of urban life as the source of road traffic and the source of domestic (fousehold) traffic lights. The study comparaison between rural and urban show daily concentrations approximately six times emissions at the urban site, due to more intense and permanent combustion sources, unlike the savannah fire source which is sporadic (present in the dry season).

Keywords : Black Carbon, INDAAF, PASMU, combustion, rural, urban

