



**HAL**  
open science

**ANALYSE DE LA QUALITE DE L’AIR DANS LES  
ZONES URBAINES EN AFRIQUE :  
CARACTERISATION DE LA POLLUTION GAZEUSE  
DES ESPECES CHIMIQUES NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>  
ET O<sub>3</sub> À ABIDJAN ET COTONOU**

Julien Bahino

► **To cite this version:**

Julien Bahino. ANALYSE DE LA QUALITE DE L’AIR DANS LES ZONES URBAINES EN AFRIQUE : CARACTERISATION DE LA POLLUTION GAZEUSE DES ESPECES CHIMIQUES NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> ET O<sub>3</sub> À ABIDJAN ET COTONOU. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université Félix Houphouët-Boigny, 2018. Français. NNT : . tel-02202221

**HAL Id: tel-02202221**

**<https://hal.science/tel-02202221>**

Submitted on 31 Jul 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Félix Houphouët-Boigny



Unité de Formation et de Recherche  
Sciences des Structures de la Matière et de Technologie

Année : 2017-2018

N° d'ordre : 2139 / 2018

# THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY**

**Mention** : PHYSIQUE

**Spécialité** : Physique-Chimie de l'Atmosphère

Présentée par :

**BAHINO DAGAUD JULIEN EYMARD**

Sur le thème :

---

**ANALYSE DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LES ZONES URBAINES EN AFRIQUE :  
CARACTERISATION DE LA POLLUTION GAZEUSE DES ESPECES CHIMIQUES  
NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> ET O<sub>3</sub> À ABIDJAN ET COTONOU**

---

*Soutenue le 18 / 10 / 2018*

*Devant le jury composé de :*

**Président** : M. Arsène Toka KOBÉA, Directeur de recherche, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)

**Rapporteurs** : M. Pascal Valentin HOUENOU, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)

: M. Georges Kouamé KOUADIO, Maître de Conférences, Ecole Normale Supérieure (Abidjan)

**Examineur** : M. Ignace Kouadio KOUASSI, Maître de Conférences, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)

**Directeur** : Mme Véronique YOBOUE, Professeur Titulaire, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)

**Co-directeur** : Mme Corinne GALY-LACAUX, Ingénieur de Recherche HDR, Université Toulouse III (Toulouse)



Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

République De Côte d'Ivoire  
Union - Discipline - Travail



Université Félix Houphouët-Boigny



Unité de Formation et de Recherche  
Sciences des Structures de la Matière et de Technologie

Année : 2017-2018

N° d'ordre : 2139 / 2018

# THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY**

**Mention** : PHYSIQUE

**Spécialité** : Physique-Chimie de l'Atmosphère

Présentée par :

**BAHINO DAGAUD JULIEN EYMARD**

Sur le thème :

---

**ANALYSE DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LES ZONES URBAINES EN AFRIQUE :  
CARACTERISATION DE LA POLLUTION GAZEUSE DES ESPECES CHIMIQUES  
NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> ET O<sub>3</sub> À ABIDJAN ET COTONOU**

---

*Soutenu le 18 / 10 / 2018*

*Devant le jury composé de :*

**Président** : M. Arsène Toka KOBÉA, Directeur de recherche, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)

**Rapporteurs** : M. Pascal Valentin HOUENOU, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)

: M. Georges Kouamé KOUADIO, Maître de Conférences, Ecole Normale Supérieure (Abidjan)

**Examineur** : M. Ignace Kouadio KOUASSI, Maître de Conférences, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)

**Directeur** : Mme Véronique YOBOUE, Professeur Titulaire, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)

**Co-directeur** : Mme Corinne GALY-LACAUX, Ingénieur de Recherche HDR, Université Toulouse III (Toulouse)

*A la mémoire de  
Lucien Dago GNAKPA*

*A mon père  
A ma mère*

*“Un esprit se sculpte et se façonne. C'est vous qui en avez les outils. Pour cela, restez ouvert et curieux. Attendez-vous au meilleur, et vous ne verrez que le meilleur. C'est de là que vient la chance du débutant [...]. La chance ne sourit qu'aux esprits bien préparés”.*

***Louis Pasteur (1822-1895)***

## REMERCIEMENTS

---

Ce travail de Thèse a été une aventure passionnante et enrichissante pour moi. Il est loin d'être un travail solitaire et n'aurait pu en effet se faire sans l'appui et le soutien d'un grand nombre de personnes. J'en oublierai certainement quelques-unes et je tiens ici à m'en excuser.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme recherche Européen DACCIIWA WP2 en alternance entre le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF) de l'Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan (Côte d'Ivoire) et le Laboratoire d'Aérodynamique (LA) de l'Université Toulouse III Paul Sabatier (France). Ce travail a reçu le soutien du programme AMRUGE-CI C2D qui a permis de financer toutes les mobilités. Il a également bénéficié de l'appui financier du Centre d'Excellence Africain sur le Changement Climatique, la Biodiversité et l'Agriculture Durable (CEA-CCBAD).

J'aimerais tout d'abord adresser mes sincères remerciements à mes deux directrices de thèse, Professeuse Véronique YOBOUE (LAPA-MF) et Docteur Corinne GALY-LACAUX (LA), qui ont bien voulu m'accueillir dans leur équipe de recherche respective et diriger mon travail de thèse. Vous n'avez pas hésité à partager avec moi votre passion pour la recherche scientifique.

Professeuse Véronique YOBOUE, ce travail n'aurait pu se faire sans la confiance «aveugle» que vous avez placée en moi depuis mon Master 2 en Energétique et Environnement. Votre souci de la perfection, votre disponibilité et votre patience nous ont amené à passer des journées interminables de travail. Vos suggestions et nos discussions fécondes sur les polluants gazeux et particulaires de l'atmosphère ont guidé mes premiers pas dans le domaine de la recherche. Vous avez également favorisé la codirection avec le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse (LA) où j'ai enrichi mes connaissances notamment dans les techniques de préparation de capteurs passifs et de leur analyse par chromatographie ionique. J'ai grandement apprécié votre soutien sans faille et votre implication à tous les niveaux de la vie de vos étudiants. Aucun mot ne serait assez fort pour vous traduire ma reconnaissance. Merci d'avoir accepté de diriger ce travail et de faire partie de mon jury de thèse.

Je voudrais également témoigner ma gratitude à ma co-directrice de thèse, Docteur Corinne GALY-LACAUX. La confiance que vous avez placée en moi, votre patience et vos orientations ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pu aboutir. Vous m'avez appris à être plus autonome et vous êtes restée à l'écoute de mes suggestions tout au long de ce travail. Je vous remercie aussi d'avoir favorisé mon insertion au sein du laboratoire de chimie du LA et d'avoir mobilisé quelques fois des financements pour me permettre de prolonger mes stages afin d'achever ce travail dans de meilleures conditions.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à Mme Cathy LIOUSSE, coordonnatrice du programme DACCIWA WP2 et responsable de l'équipe de recherche EDI. Vous avez pensé à associer les laboratoires du sud tels que le LAPA-MF d'Abidjan et le LPR de Cotonou à ce vaste programme Européen. Vous nous avez ainsi permis de renforcer nos capacités dans le domaine de la Physico-chimie de l'Atmosphère. Vous avez été là, toujours disponible pour répondre à mes nombreuses questions. Veuillez trouver ici toute ma gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur Paul ASSAMOI, Professeur Titulaire et ex-Directeur du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et Mécanique des Fluides pour avoir accepté ma première inscription dans ce laboratoire et avoir favorisé ma mise à disposition à l'Université Félix Houphouët-Boigny. Par sa détermination, il a su garder un niveau de formation de qualité au sein du laboratoire malgré les conditions difficiles dans lesquelles les enseignements se déroulent.

Je voudrais aussi remercier M. Arsène KOBÉA, Directeur de Recherche et Directeur du LAPA-MF pour sa grande disponibilité. J'ai bénéficié de vos encouragements et de vos conseils avisés. Les plus grandes leçons ne sont pas toujours tirées d'un livre mais d'un enseignant comme vous. Je suis très honoré, de vous voir présider mon jury de thèse.

Je tiens à remercier Professeur Pascal Valentin HOUENOU, Professeur Titulaire de classe exceptionnelle de chimie minérale et environnementale, Doyen honoraire de l'UFR Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université Nangui Abrogoua, pour avoir accepté de porter ce manuscrit à son regard d'expert en qualité de rapporteur. Merci pour vos conseils avisés qui ont contribué à améliorer la qualité de ce manuscrit.

Qu'il me soit permis à travers ces quelques lignes de témoigner mon estime et ma reconnaissance à M. Georges KOUADIO, Maître de conférences à l'Ecole Normale Supérieure d'Abidjan (ENS), ex-Directeur Général de l'Environnement et coordinateur du Projet de Gestion des Pesticides Obsolètes en Côte d'Ivoire (PROGEP-CI). C'est avec amabilité et spontanéité que vous avez accepté de faire partie de mon jury de thèse en tant que rapporteur.

Je remercie aussi M. Ignace Kouadio KOUASSI, Maître de conférences à l'Université Nangui Abrogoua, pour l'honneur qu'il me fait de participer à mon jury de thèse en qualité de d'examineur de mon travail, pour le temps consacré à la lecture de cette thèse, et pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'il m'a indiquées.

Je remercie l'ensemble du personnel du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et Mécanique des Fluides (LAPA-MF) pour l'accueil qui m'y a été réservé. Les enseignants-chercheurs, les chercheurs, les doctorants n'ont ménagé aucun effort pour m'intégrer dans cette famille et me donner le goût de la recherche scientifique. Dans ce laboratoire, j'ai été accueilli au sein de l'équipe « Aérosols et Pollution » dirigée par Professeur Véronique YOBOUE où j'ai bénéficié de l'encadrement de tous les enseignants. À Docteur Éric-Michel ASSAMOI, vous avez été un enseignant formidable et un grand frère attentionné pour tous les doctorants du LAPA-MF.

La bonne humeur que vous avez introduite au sein de ce laboratoire nous a permis de relâcher la pression à de nombreux moments. Merci pour vos conseils avisés, votre soutien, votre disponibilité et votre générosité.

A ce stade de mon propos j'aimerais m'arrêter un instant pour rendre un hommage mérité à Professeur Abdourahamane KONARE. Votre humilité et votre modestie masquent la réalité du travail considérable que vous avez effectué au sein de l'équipe Aérosol et Pollution du LAPA-MF. Merci pour l'opportunité que vous m'avez donné de m'initier au modèle climatique régional RegCM-4 et de côtoyer le temps d'un séminaire les spécialistes dans le domaine de l'environnement. Nous sommes aujourd'hui au terme de ce travail que vous avez soutenu en donnant des orientations et en renforçant nos capacités à travers des enseignements de qualité dispensés à la formation doctorale CNRI dont vous êtes l'initiateur. En tant que directeur général de la recherche scientifique et de l'innovation technologique en Côte d'Ivoire, vous avez aidé plus d'un étudiant à obtenir un financement pour son projet de thèse. Hélas vous ne serez pas là pour voir le fruit de vos efforts. Vous avez quitté cette terre au moment où nous étions prêts à vous faire honneur. Que la terre vous soit légère.

Je n'oublierais pas non plus tous ces enseignants, ces experts qui ont su donner de leur temps pour assurer notre formation par des cours, des séminaires, et des travaux pratiques au sein du LAPA-MF. Je voudrais particulièrement adresser mes remerciements à MM. Angoran AMAN, Yves KOUADIO, Doumbia VAFI, Olivier OBROU, Delfin OCHOU et Éric-Pascal ZAHIRI. Merci également aux Docteurs Evelyne TOURE, Fidèle YOROBA, Benjamin KOUASSI, Modeste KACOU, Bakary BAMBA, Adama BAMBA et Kouakou KOUADIO.

Je voudrais aussi souligner l'accueil chaleureux qui m'a été réservé par les personnels de l'équipe EDI « Emissions, Dépôts, Impacts » du Laboratoire d'Aérodologie de Toulouse et de l'Observatoire Midi-Pyrénées. Je pense en particulier à Mme Marisa VIALET. Votre gentillesse et votre sourire inaltérable m'a très vite mis à l'aise et favorisé mon insertion dans ce nouvel univers. Je pense aussi à Éric GARDRAT et à Christelle CHIRON qui n'ont pas hésité à me transmettre leur savoir faire dans les techniques de collecte et d'analyse des échantillons de particule et de gaz. Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Claire DELON, Véronique PONT, Dominique SERCA, Carine MERCADIER et Virginie REDON.

J'ai une pensée particulière pour mon frère et ami de longue date. Tu as toujours cru en mes capacités et tu as été le déclencheur de cette aventure. Merci Docteur Marcellin ADON d'avoir aidé au traitement et à la validation des données utilisées dans ce travail. Merci également d'avoir apporté ton esprit critique à la rédaction du papier Bahino et al. (2018) et à l'élaboration de ce manuscrit de thèse.

Aux Doctorants du LAPA-MF, de la formation Doctorale CRNI et du CEA-CCBAD, je voudrais vous adresser toute ma reconnaissance pour la solidarité dont vous avez fait preuve tout au long de cette aventure. Vous avez été courtois, patients et généreux durant ce parcours difficile

mais passionnant. Je pense à Sékou KEITA et Martin KONAN, mes amis de tous les jours. Nous avons ensemble traversé des expériences enrichissantes et inoubliables. Vous avez été d'un soutien sans failles dans les quelques moments de doute me rappelant sans cesse notre leitmotiv « le meilleur reste à venir » mais aussi vous avez partagé ces nombreux moments de bonheur qui ont émaillé ce parcours. Je vous prie de trouver en ces quelques mots l'expression de toute ma gratitude. Pour n'oublier personne je citerai aussi les autres doctorants du LAPA-MF tels qu'Alima DAJUMA, Dieudonné DIBY, Madina DOUMBIA, Moïse FAMIEN, Kouadio N'GUESSAN, Esther OCHO, Samuel LADJI, Maurin ZOUZOUA, Money OSSOHOU, Kassamba DIABY, Mohamed DIABY, Zié TUO, Kouacou BOSSON, Sinaly DOSSO, Sylvain GNAMIEN, Vicky KONDY. Nous constituons désormais une grande famille.

A ce stade, je voudrais penser à ma famille biologique pour son soutien indéfectible et inaltérable depuis déjà de longues années. A mon père DJAHI BAHINO, ma mère Margueritte TCHIRIKE, Feu Gnakpa DAGO merci d'avoir cru en mes capacités. Je pense aussi à mon fils Jean-Charles BAHINO qui me donne chaque jour des raisons de poursuivre mes rêves. Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes frères et sœurs, Dja Floriot GNAKPA, Hyppolite DJAHI, Léocadie DJAHI, Mireille DJAHI, Nina DJAHI, Isabelle DJAHI et Guy-Florent BAHINO.

Pour finir, je voudrais adresser mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou loin, ont participé à la réussite de ce travail par leur soutien spirituel, moral, matériel et financier : Natacha ABO, Yves N'GORAN-TEKLY, Sheiddu OUATTARA, Arnaud KONE, Sidney GNAGNE, Jean-Marie KOUAME, Nathalie DEGNY, Rodrigue Adjoumani KOUAKOU, Marc Cyril KOUADIO et Eric NAHOUNOU.

## Résumé

---

**Auteur :** Julien BAHINO

**Titre :** Analyse de la qualité de l'air dans les zones urbaines en Afrique : caractérisation de la pollution gazeuse des espèces chimiques NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> et O<sub>3</sub> à Abidjan et Cotonou.

**Directrices de thèse :** Véronique YOBOUE (LAPA-MF) & Corinne GALY-LACAU (LA)

**Lieu et date de soutenance :** Université Félix-Houphouet-Boigny (18 /10 /2018)

**Résumé :** Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme Européen DACCIWA WP2 intitulé « Air pollution and Health ». Elle vise à caractériser la pollution gazeuse moyenne en milieu urbain à Abidjan et Cotonou, deux villes importantes du sud de l'Afrique de l'Ouest. La mesure des concentrations des polluants gazeux (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>) a été réalisée à l'aide de capteurs passifs INDAAF sur des sites caractéristiques des sources majeures de pollution en Afrique de l'Ouest (feux domestiques, trafic et feux issus de combustion des déchets) de Décembre 2014 à Avril 2017. Ces mesures à moyen terme ont été ponctuées de deux campagnes intensives qui ont permis de créer des réseaux de suivi de la qualité d'air constitués de 27 sites de mesures à Abidjan et de 8 sites à Cotonou. Ces campagnes de mesures ont permis de prendre en compte outre les sources déjà citées, les sources industrielle, résidentielle et les zones suburbaines. L'ensemble des résultats validés ont permis de réaliser une base de données originale et la plus longue disponible à ce jour (28 mois) sur les concentrations des polluants gazeux dans les milieux urbains d'Afrique de l'Ouest. Cette base de données a été utilisée dans un premier temps pour évaluer la contribution de chacune des principales sources de pollution aux concentrations des polluants sur chacun des sites à moyen terme. Dans un second temps, les variations temporelles des concentrations des polluants ont été étudiées permettant ainsi de définir les niveaux moyens des polluants à Abidjan et Cotonou. Les résultats indiquent une faible saisonnalité des concentrations des polluants bien que des concentrations un peu plus élevées sont généralement mesurées pendant la saison sèche de Novembre à Février. Sur tous les sites, NH<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub> sont les polluants majeurs avec des concentrations plus élevées respectivement sur les sites feux domestiques d'Abidjan et trafic de Cotonou. L'étude de la variabilité spatiale des concentrations a montré une forte dépendance des concentrations des polluants avec les sources à proximité. Cette étude fait enfin une revue bibliographique des études menées en Afrique sur les principaux polluants issus du trafic (NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>) et permet de donner des niveaux moyens de concentrations de ces polluants en Afrique.

**Mots clés :** DACCIWA, capteurs passifs INDAAF, pollution gazeuse, Afrique de l'Ouest, urbain.

**Discipline :** Physico-chimie de l'Atmosphère

**Laboratoires :** Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides d'Abidjan (Côte d'Ivoire) & Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse (France).

## Abstract

---

This work is part of the European project DACCIWA WP2 “Air pollution and Health”. This study aims to characterize urban air pollution levels through the measurement of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub> in Abidjan and Cotonou, two major cities in West Africa. Measurement of inorganic gaseous pollutants i.e. NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub> were performed during a mid-term campaign from December 2014 to April 2017, using INDAAF passive sampler at different sites representative of major sources of air pollution in West Africa (domestic fires, traffic and waste burning) from December 2014 to April 2017. During this study period, 2 intensive campaigns were conducted during dry seasons (15 December 2015-15 February 2016 and 15 December 2016-15 February 2017). Air quality networks consisting of 27 measurement sites in Abidjan and 8 in Cotonou have been installed. In addition to the sources of air pollution already mentioned, these intensive measurement campaigns took into account other sources such as industrial, residential and suburban areas. All the validated results obtained made it possible to create an original database. To date, it is the longest (28 months) and most comprehensive database on concentrations of gaseous pollutants in urban environments in West Africa. This database was initially used to assess the contribution of each of the main sources of pollution to pollutant concentrations at each of the mid-term measurement sites. Then, temporal variations gaseous pollutant concentrations were studied, thus making it possible to define the average levels of pollutants in Abidjan and Cotonou. The results indicate low seasonality of pollutant concentrations although somewhat higher concentrations are generally measured during the dry season from November to February. At all the measurement sites, NH<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> are the major pollutants with higher concentrations at the domestic fire sites of Abidjan and Cotonou traffic respectively. The study of the spatial distribution of gaseous pollutants showed a strong dependence of pollutant concentrations with air pollution sources nearby. Finally, this study provides a bibliographical review of studies conducted in Africa on the main pollutants resulting from traffic (NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>) and makes it possible to give average levels of concentrations of these pollutants in Africa.

**Keywords :** DACCIWA, INDAAF passive sampler, gaseous pollution, West Africa, urban

## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>vi</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>x</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>xv</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>xviii</b>
<b>Acronymes .....</b>	<b>xx</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Sources des polluants gazeux en milieu urbain.....</b>	<b>9</b>
<b>I.1. Généralités sur la pollution atmosphérique.....</b>	<b>10</b>
<b>I.2. Source des polluants gazeux en milieu urbain et impact sanitaire.....</b>	<b>10</b>
I.2.1. Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ).....	10
I.2.2. Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ).....	12
I.2.3. Ammoniac (NH <sub>3</sub> ) .....	13
I.2.4. Ozone (O <sub>3</sub> ) .....	15
I.2.5. Acide nitrique (HNO <sub>3</sub> ) .....	19
<b>I.3. Transport et dépôt des polluants atmosphériques.....</b>	<b>20</b>
I.3.1. Circulation générale atmosphérique en Afrique tropicale .....	20
I.3.2. Dispersion et transport des polluants dans l'atmosphère .....	22
I.3.3. Dépôts atmosphériques (mécanismes naturels de dépollution).....	23
<b>I.4. Normes de suivi de la qualité de l'air .....</b>	<b>24</b>
I.4.1. Quelques définitions relatives à la qualité de l'air .....	25
I.4.2. Normes des principaux polluants particulaires et gazeux relatifs à la qualité de l'air.....	26
<b>Chapitre II : Protocole expérimentale de collecte et d'analyse des échantillons.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1. Présentation des zones d'étude .....</b>	<b>29</b>
II.1.1. Ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire) .....	29
II.1.2. Ville de Cotonou (Bénin) .....	34
II.1.3. Ville de Bamako (Mali).....	36
II.1.4. Ville de Yaoundé (Cameroun).....	37
<b>II.2. Protocole d'échantillonnage et d'analyse des échantillons de gaz .....</b>	<b>38</b>
II.2.1. Présentation des capteurs passifs INDAAF.....	38
II.2.2. Préparation, montage et expédition des capteurs passifs INDAAF .....	40
II.2.3. Protocole de collecte des gaz.....	46
II.2.4. Protocole d'analyse des échantillons de gaz.....	47
<b>II.3. Données météorologiques.....</b>	<b>51</b>
<b>II.4. Conclusion .....</b>	<b>54</b>

<b>Chapitre III: Caractérisation moyenne de la pollution gazeuse à Abidjan et Cotonou.....</b>	<b>55</b>
<b>III.2. Présentation de la base de données .....</b>	<b>56</b>
<b>III.3. Etude des données de pollution à partir de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)62</b>	<b>62</b>
III.3.1. Représentation des prélèvements dans un système d'axes principaux .....	64
III.3.2. Caractérisation des sources de pollution et études des corrélations entre les différents polluants. ....	70
<b>III.4. Etude des variations temporelles des concentrations des polluants gazeux.....</b>	<b>81</b>
III.4.1. Variations des concentrations moyennes mensuelles et saisonnières des polluants gazeux	81
III.4.2. Caractérisation moyenne de la pollution et variations annuelles des concentrations des polluants gazeux à Abidjan et Cotonou. ....	97
<b>III.5. Comparaison des concentrations moyennes annuelles des polluants sur les sites trafic d'Abidjan, Cotonou, Yaoundé, Bamako et Dakar.....</b>	<b>102</b>
III.5.1. Concentrations moyennes annuelles de NO <sub>2</sub> sur différents sites en Afrique. ....	103
III.5.2. Concentrations moyennes annuelles de SO <sub>2</sub> sur différents sites en Afrique. ....	105
III.5.3. Concentrations moyennes annuelles de NH <sub>3</sub> sur différents sites en Afrique. ....	105
III.5.4. Concentrations moyennes annuelles de HNO <sub>3</sub> sur différents sites en Afrique.....	105
III.5.5. Concentrations moyennes annuelles de O <sub>3</sub> sur différents sites en Afrique. ....	106
<b>III.6. Bilan des mesures de NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> dans les villes africaines.....</b>	<b>106</b>
III.6.1. Le dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) dans les villes africaines .....	108
III.6.2. Le dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) dans les villes africaines.....	111
<b>III.7. Conclusion .....</b>	<b>113</b>
<b>Chapitre IV: Etude de la distribution spatiale des polluants gazeux à Abidjan et Cotonou .....</b>	<b>115</b>
<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>116</b>
<b>IV.2. Localisation des sites de mesures.....</b>	<b>118</b>
IV.2.1. Sites d'Abidjan.....	118
IV.2.2. Sites de Cotonou.....	120
<b>IV.3. Concentrations moyennes des polluants gazeux en saison sèche à Abidjan et Cotonou. ...</b>	<b>122</b>
<b>IV.4. Méthodes d'interpolation spatiale dans les réseaux de qualité de l'air .....</b>	<b>124</b>
IV.4.1. La pondération par l'inverse de distance ou IDW (Inverse Distance Weighted) .....	124
IV.4.2. Le krigeage.....	125
IV.4.3. Validation croisée et choix de la méthode d'interpolation (MAE, RMSE, R <sup>2</sup> ).....	129
<b>IV.5. Cartes de distributions spatiales des polluants gazeux (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>) à Abidjan et Cotonou. ....</b>	<b>134</b>
IV.5.1. Cartes de distribution spatiale de NO <sub>2</sub> à Abidjan et Cotonou .....	135
IV.5.2. Cartes de distribution spatiale de SO <sub>2</sub> à Abidjan et Cotonou.....	139
IV.5.3. Cartes de distribution spatiale de NH <sub>3</sub> à Abidjan et Cotonou .....	143
IV.5.4. Cartes de distribution spatiale de HNO <sub>3</sub> à Abidjan et Cotonou .....	147
IV.5.5. Cartes de distribution spatiale de O <sub>3</sub> à Abidjan et Cotonou.....	150
<b>IV.6. Conclusion.....</b>	<b>152</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>155</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>161</b>
<b>Article tiré de thèse .....</b>	<b>174</b>

**Annexes .....202**

# Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Carte de la qualité de l'air en temps réel dans le monde le 18 /05/2018. ( <a href="http://aqicn.org/map/world/fr/#@g/11.7218/16.582/2z">http://aqicn.org/map/world/fr/#@g/11.7218/16.582/2z</a> ).....	2
<b>Figure 2:</b> Aperçu de la zone d'étude du programme DACCIWA dans le sud de l'Afrique de l'Ouest mise en évidence en bleu (Knippertz et al., 2015).....	4

## Chapitre 1 :

<b>Figure 1.1:</b> Principales voies de stockage et d'élimination des NO <sub>x</sub> dans l'atmosphère. (Deletraz, 2002) .....	12
<b>Figure 1.2:</b> Cycle de l'azote dans le sol et productions gazeuses associées (Delmas et al., 2005). .....	14
<b>Figure 1.3:</b> Perturbation du cycle de Chapman par la présence des COV (Soltys, 1998).....	17
<b>Figure 1.4:</b> Profil type de la vitesse de production d'ozone en fonction de la quantité d'oxyde d'azote (NO <sub>x</sub> ) en ppb par heures (Camredon et Aumont, 2007).....	18
<b>Figure 1.5:</b> Position des centres d'action en Janvier et Juillet (Denison et al., 2005).....	21

## Chapitre 2 :

<b>Figure 2.1:</b> Diagramme ombrothermique de la ville d'Abidjan sur la période de 1937 à 2000 (Colin et al., 1993). .....	31
<b>Figure 2.2:</b> Activités utilisant le bois de chauffe sur le site feux domestiques de Yopougon : a) fumage de poissons, b) grillage d'arachides, c) une vue des équipements installés, d) une vue des foyers de fumage.....	32
<b>Figure 2.3:</b> Site trafic d'Adjamé Liberté (Abidjan) a) une vue du trafic constitué de taxis compteurs, gbaka et de véhicules personnels, b) coffret de mesures d'aérosols sur le toit de la pharmacie des 220 logements, c) vue de face de la pharmacie des 220 logements, d) gbaka dans un embouteillage. ....	33
<b>Figure 2.4:</b> Site feux de décharge (décharge d'Akouédo) : a) amoncellement d'immondices, b) fouilleurs d'ordures, c) combustion de biomasse d) déchets plastiques. ....	34
<b>Figure 2.5:</b> Diagramme ombrothermique à Cotonou sur la période 1987-2016.....	35
<b>Figure 2.6:</b> Site trafic du Carrefour du Marché Dantokpa (Cotonou) à différentes heures de la journée. a) Embouteillage de « zemi djan » à midi b) Capteurs passifs montés sur un rail au balcon de la SOGEMA c) Vue du carrefour à 10 heures d) Voie principale menant au carrefour du marché Dantokpa. ....	36
<b>Figure 2.7:</b> Différents capteurs passifs de gaz INDAAF : (a) et (b) NH <sub>3</sub> , (c) HNO <sub>3</sub> et SO <sub>2</sub> , (d) NO <sub>2</sub> , (e) et (f) O <sub>3</sub> .....	38
<b>Figure 2.8:</b> Différentes parties d'un capteur passif de gaz INDAAF.....	40
<b>Figure 2.9:</b> Système de purification d'eau ELGA utilisé au Laboratoire de chimie du Labotroire d'Aérologie .....	41
<b>Figure 2.10:</b> Bain à ultrasons thermostaté Fisher Scientific.....	41
<b>Figure 2.11:</b> Hotte à flux laminaire IBERIS utilisée pour le séchage des éléments lavés.....	42
<b>Figure 2.12:</b> Etuve de marque Memmert utilisée pour le séchage des filtres.....	43
<b>Figure 2.13:</b> Boîtes de filtres propres référencés par date. ....	43
<b>Figure 2.14:</b> Micropipettes Eppendorf (5000 µL et 10 mL) utilisées pour le prélèvement des volumes de solution. ....	44
<b>Figure 2.15:</b> Matériel utilisé pour la préparation des solutions : a) balance électronique et b) agitateur magnétique. ....	44

<b>Figure 2.16:</b> Conditionnement des capteurs passifs dans des boîtes plastiques avant expédition. Retour après échantillonnage dans les mêmes conditions. ....	46
<b>Figure 2.17:</b> Capteurs passifs montés en duplicate sur un rail en inox sur différents sites de mesures : a) à la décharge d’Akouédo, b) au marché de Yopougon Niangon et c) à l’Aéroport FHB. ....	47
<b>Figure 2.18:</b> Différents chromatographes ioniques Thermo Dionex utilisés au LA. ....	48
<b>Figure 2.19:</b> Diagrammes en anneaux présentant les résultats du laboratoire analytique du LA au deux dernières inter comparaisons WMO/GAW de 2017 sur 3 échantillons tests. ....	49
<b>Figure 2.20:</b> Rose des vents des d'Abidjan en saison sèche, a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. ....	52
<b>Figure 2.21:</b> Rose des vents à Cotonou en saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017....	52
<b>Figure 2.22:</b> Précipitations et Températures moyennes mensuelles de Décembre 2014 à Avril 2017 à : a) Abidjan et b) Cotonou. ....	53

### Chapitre 3 :

<b>Figure 3.1:</b> Répartition et classification des prélèvements de polluants du site feux domestiques d’Abidjan dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.....	66
<b>Figure 3.2:</b> Répartition et classification des prélèvements des polluants du site trafic d’Abidjan dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.....	68
<b>Figure 3.3:</b> Répartition et classification des prélèvements du site feux de décharge d’Abidjan dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.....	69
<b>Figure 3.4:</b> Répartition et classification des prélèvements du site trafic de Cotonou dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.....	70
<b>Figure 3.5:</b> Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site feux domestiques d’Abidjan.....	72
<b>Figure 3.6:</b> Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site trafic d’Abidjan. ....	75
<b>Figure 3.7:</b> Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site feux de décharge d’Abidjan. ....	77
<b>Figure 3.8:</b> Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site trafic de Cotonou.....	79
<b>Figure 3.9:</b> Evolution mensuelle des concentrations moyennes du dioxyde d’azote (NO <sub>2</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 2015 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou. ....	83
<b>Figure 3.10:</b> Concentrations moyennes saisonnières du dioxyde d’azote (NO <sub>2</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.....	83
<b>Figure 3.11:</b> Evolution mensuelle des concentrations moyennes de l’ammoniac (NH <sub>3</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.....	87
<b>Figure 3.12:</b> Concentrations moyennes saisonnières de l’ammoniac (NH <sub>3</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.....	87
<b>Figure 3.13:</b> Bois de chauffe exposés aux intempéries et stockés à proximité du site feux domestiques de Yopougon. ....	88
<b>Figure 3.14:</b> Evolution mensuelle des concentrations moyennes de l’acide nitrique (HNO <sub>3</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.....	90
<b>Figure 3.15:</b> Concentrations moyennes saisonnières de l’acide nitrique (HNO <sub>3</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou. ....	91
<b>Figure 3.16:</b> Evolution mensuelle des concentrations moyennes du dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.....	93
<b>Figure 3.17:</b> Concentrations moyennes saisonnières du dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou. ....	93
<b>Figure 3.18:</b> Evolution mensuelle des concentrations moyennes de l’ozone (O <sub>3</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou. ....	96
<b>Figure 3.19:</b> Concentrations moyennes saisonnières de l’ozone (O <sub>3</sub> ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.....	96

<b>Figure 3.20:</b> Evolution des concentrations moyennes annuelles des polluants gazeux sur les sites DACCIWA d'Abidjan et de Cotonou sur la période 2015-2016. ....	99
<b>Figure 3.21:</b> Concentrations moyennes des polluants gazeux (NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> ) dans les capitales d'Afrique de l'Ouest et du Centre. ....	104
<b>Figure 3.22:</b> Pays africains colorés par sous-région pour lesquelles des mesures de NO <sub>2</sub> et SO <sub>2</sub> ont été identifiées entre 2005 et 2017.....	107

#### Chapitre 4 :

<b>Figure 4.1:</b> Répartition spatiale des sites de mesures dans le district d'Abidjan .....	118
<b>Figure 4.2:</b> Répartition spatiale des sites de mesures dans la ville de Cotonou.....	121
<b>Figure 4.3:</b> Semi-variogrammes des concentrations des cinq polluants mesurés à Abidjan, du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 (a), du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 (b) et à Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 (c).....	128
<b>Figure 4.4:</b> Courbes de régression linéaires entre les concentrations des polluants observées à Abidjan (15 Déc. 2015- 15 Fév. 2016) et celles prédites par les modèles d'interpolation (IDW et Krigeage)..	131
<b>Figure 4.5:</b> Courbes de régression linéaires entre les concentrations des polluants observées à Abidjan (15 Déc. 2016- 15 Fév. 2017) et celles prédites par les modèles d'interpolation (IDW et Krigeage)..	132
<b>Figure 4.6:</b> Courbes de régression linéaires entre les concentrations des polluants observées à Cotonou (15 Déc. 2016- 15 Fév. 2017) et celles prédites par les modèles d'interpolation (IDW et Krigeage)..	133
<b>Figure 4.7:</b> Distribution spatiale de NO <sub>2</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	136
<b>Figure 4.8:</b> Distribution spatiale de NO <sub>2</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	138
<b>Figure 4.9:</b> Concentration moyenne de NO <sub>2</sub> par source de pollution à Abidjan et Cotonou.....	139
<b>Figure 4.10:</b> Distribution spatiale de SO <sub>2</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	141
<b>Figure 4.11:</b> Distribution spatiale de SO <sub>2</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	142
<b>Figure 4.12:</b> Concentration moyenne de SO <sub>2</sub> par source de pollution à Abidjan et Cotonou.....	143
<b>Figure 4.13:</b> Distribution spatiale de NH <sub>3</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	145
<b>Figure 4.14 :</b> Distribution spatiale de NH <sub>3</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	146
<b>Figure 4.15:</b> Concentration moyenne de NH <sub>3</sub> par source de pollution à Abidjan et Cotonou.....	147
<b>Figure 4.16:</b> Distribution spatiale de HNO <sub>3</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	148
<b>Figure 4.17:</b> Distribution spatiale de HNO <sub>3</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	149
<b>Figure 4.18:</b> Distribution spatiale de O <sub>3</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	151
<b>Figure 4.19:</b> Distribution spatiale de O <sub>3</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 16 Février 2017.....	152

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Liste des institutions partenaires et associées au programme DACCIWA.....	5
---	---

## Chapitre 1 :

<b>Tableau I.1:</b> Principales sources et quantités d'ammoniac atmosphérique émis à l'échelle globale. (source : <a href="http://omer7a.obs-mip.fr/mallette/fiches/L-ammoniac-NH3">http://omer7a.obs-mip.fr/mallette/fiches/L-ammoniac-NH3</a> ). .....	15
<b>Tableau I.2:</b> Quelques normes sur la qualité de l'air ambiant selon les lignes directrices de l'OMS et les décrets sur la qualité de l'air en Côte d'Ivoire et au Bénin. ....	27

## Chapitre 2 :

<b>Tableau II.1:</b> Réactions chimiques entre les gaz étudiés et les solutions imprégnées sur les filtres. Adapté d'Al-Ourabi (2002). .....	39
<b>Tableau II.2:</b> Récapitulatif des chromatographes du LA et leurs paramètres analytiques.....	48
<b>Tableau II.3:</b> Nombre d'échantillons analysés par site .....	50

## Chapitre 3 :

<b>Tableau III.1:</b> Bilan des échantillons analysés .....	57
<b>Tableau III.2:</b> Concentrations moyennes bimensuelles en ppb intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site feux domestiques d'Abidjan de Janvier 2015 à Mars 2017. ....	58
<b>Tableau III.3:</b> Concentrations moyennes bimensuelles en ppb intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic d'Abidjan de Janvier 2015 à Avril 2017.....	59
<b>Tableau III.4:</b> Concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site feux de décharge d'Abidjan de Janvier 2015 à Mars 2017. ....	60
<b>Tableau III.5:</b> Concentrations moyennes bimensuelles en ppb intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic de Cotonou. ....	61
<b>Tableau III.6:</b> Pourcentages cumulés de la variance de chacun des axes principaux (Dim1 et Dim 2) sur chacun des sites de mesures à Abidjan et Cotonou. ....	65
<b>Tableau III.7:</b> Matrice des corrélations entre les polluants gazeux collectés sur le site feux domestiques d'Abidjan. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).....	72
<b>Tableau III.8:</b> Matrice des corrélations entre les polluants gazeux collectés sur le site trafic d'Abidjan. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).....	75
<b>Tableau III.9:</b> Matrice des corrélations entre les polluants gazeux collectés sur le site feux de décharge d'Abidjan. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ). ....	77
<b>Tableau III.10:</b> Matrice des corrélations totales entre les polluants gazeux collectés sur le site trafic de Cotonou. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).....	79
<b>Tableau III.11:</b> Concentrations moyennes des polluants gazeux (en ppb) mesurés sur les sites DACCIWA d'Abidjan et de Cotonou sur la période (Décembre 2014 - Avril 2017), nombre d'échantillons prélevés entre parenthèse.....	98
<b>Tableau III.12:</b> Revue des niveaux de concentration de NO <sub>2</sub> en µg.m <sup>-3</sup> dans les capitales africaines à différentes échelles de temps (horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel) entre 2005 et 2017. ....	109
<b>Tableau III.13:</b> Revue des niveaux de concentration de SO <sub>2</sub> en µg.m <sup>-3</sup> dans les capitales africaines à différentes échelles de temps (horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel).....	112

#### Chapitre 4 :

<b>Tableau IV.1:</b> Sites de mesures des polluants gazeux lors des deux campagnes intensives d'Abidjan. 1) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016. 2) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. ....	120
<b>Tableau IV.2:</b> Sites de mesures des polluants gazeux à Cotonou lors de la campagne intensive en saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	121
<b>Tableau IV.3:</b> Concentration moyenne en ppb des polluants gazeux mesurés en saison sèche à Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. ....	122
<b>Tableau IV. 4:</b> Concentrations moyennes en ppb des polluants gazeux mesurées lors des deux campagnes intensives d'Abidjan : Campagne 1 du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, campagne 2 du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. ....	123
<b>Tableau IV.5:</b> Paramètres des semi-variogrammes .....	127
<b>Tableau IV.6:</b> Résultats de la validation croisée pour les modèles d'interpolation krigeage et IDW. ....	134

#### Annexes

<b>Tableau A2.1:</b> Concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic de Bamako.....	215
<b>Tableau A2.2:</b> Concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic de Yaoundé.....	216
<b>Tableau A3.1:</b> Concentrations moyennes bimensuelles en ppb des polluants gazeux sur les sites d'Abidjan du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016.....	218
<b>Tableau A3.2:</b> Concentrations moyennes bimensuelles en ppb des polluants gazeux sur les sites d'Abidjan du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.....	219
<b>Tableau A3.3:</b> Concentrations moyennes bimensuelles en ppb des polluants gazeux sur les sites de Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. ....	220

# Acronymes

ACP	: Atmospheric Chemistry and Physics
AD	: Site Abidjan Décharge
AFd	: Site Abidjan Feux domestiques
AFD	: Agence Française de Développement
AT	: Site Abidjan Trafic
AGETU	: Agence de Gestion des Transports Urbains
ALPHA	: Adapted Low-cost Passive High Absorption
AMMA	: African Monsoon Multidisciplinary Approach
AMRUGE	: Appui à la Modernisation et à la Réforme des Universités et Grandes Ecoles de Côte d'Ivoire
AMT	: Atmospheric Measurement Techniques
ASECNA	: Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
BAOBAB	: Base Afrique de l'Ouest Beyond AMMA Base
CAMS	: Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CCAC	: Climate and Clean Air Coalition
CEG	: Collège d'Enseignement Général
CEH	: Centre pour l'Ecologie et l'Hydrologie
CIAPOL	: Centre Ivoirien Anti-POLLution
CIO	: Confluence Intertropicale Océanique
CNRS	: Centre National de la Recherche Scientifique
CO	: monoxyde de carbone
COV	: Composés Organiques Volatils
CT	: Site Cotonou Trafic
DACCIWA	: Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa
DEBITS	: DEposition of Biogeochemically Trace Species
DELTA	: DENuder for Long term Ammonia
DLR	: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ECWMF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ETHZ	: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FIT	: Front Intertropicale
GES	: Gaz à Effet de Serre
HAP	: Hydrocarbure Aromatique Polycycliques
IBGE	: Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement
ICI	: Forum Investir en Côte d'Ivoire
IDW	: Inverse Distance Weighted
IGAC	: International Global Atmospheric Chemistry
INDAAF	: International Network to study Deposition and Atmospheric composition in Africa
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
INS	: Institut National de la Statistique de Côte d'Ivoire
INSAE	: Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique du Bénin

---

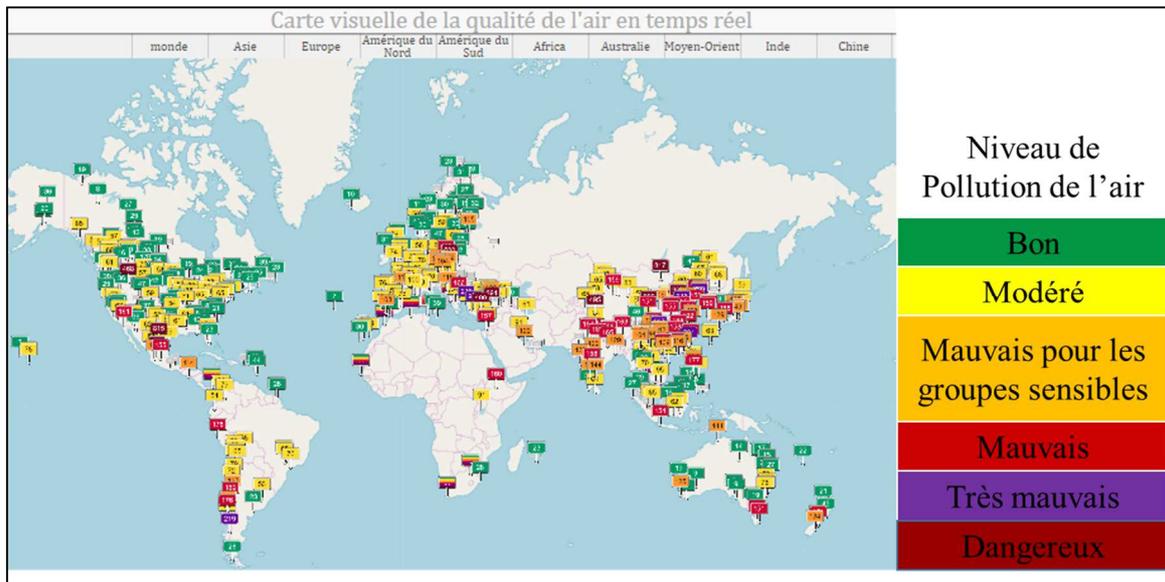
IPCI	: Institut Pasteur de Cote d'Ivoire
IQA	: Indices de Qualité de l'Air
KNUST	: Kwame Nkrumah University of Science and Technology
LA	: Laboratoire d'Aérologie de Toulouse
MAE	: Mean Absolute Error
METAR	: METeorological Aerodrome Report
MO	: Met Office
NAMA	: Nationally Appropriate Mitigation Action
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PASMU	: Pollution de l'air et Santé dans les villes de Côte d'Ivoire
PCA	: Principal Component Analysis
PK	: Point Kilométrique
PM	: Particulate Matter
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
POLCA	: POLLution des Capitales Africaines
PTFE	: Polytétrafluoroéthylène
PVC	: Polychlorure de vinyle
RMSE	: Root Mean Square Error
SICTA	: Société Ivoirienne de Contrôle Techniques Automobiles et Industriels
SOGEMA	: Société de Gestion des Marchés Autonomes
SONATT	: SOciété Nationale des Transports Terrestres
UAC	: Université d'Abomey-Calavi
UBP	: Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II
UE	: Union Européenne
UFHB	: Université Félix Houphouët-Boigny
UNAMACI	: Union Nationale des Marchés de Côte d'Ivoire
UNDP	: United Nations Development Programme
UNIVLEEDS	: University of Leeds
UNIVMAN	: University of Manchester
UNIVYORK	: University of York
UPD	: Université Paris Diderot
UPMC	: Université Pierre et Marie Curie
UPS	: Université Paul Sabatier (Toulouse III)
UREAD	: University of Reading
WMO	: World Meteorological Organization
WP2	: Work Package 2
ZEM	: ZEMIDJAN (Taxi-moto à 2 roues)
ZCIT	: Zone de Convergence Intertropicale

# Introduction générale

La qualité de l'air constitue un problème sanitaire majeur dans les zones urbaines ces dernières années. Les activités humaines rejettent un grand nombre de substances polluantes dans l'atmosphère qui ont un impact direct sur le changement climatique et la santé humaine. Ces activités entraînent une dégradation des écosystèmes. Les polluants de l'air ambiant sont des gaz (oxydes d'azote, ozone, dioxyde de soufre, métaux, composés organiques, etc.) ou des particules plus ou moins fines telles que PM10 et PM2.5 en suspension dans l'atmosphère. Plusieurs études scientifiques ont en effet rapporté qu'un grand nombre de décès prématurés ainsi que des maladies respiratoires et cardiovasculaires sont liés à la pollution de l'air (Adams et Kanaroglou, 2016; Brook et al., 2004; Goldemberg et al., 2018; Khafaie et al., 2016; Murray, 2001; Pope III et al., 2002; Pope III et Dockery, 2006 ; WHO, 2006). Selon l'estimation de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2012, 11,6 % des décès dans le monde étaient liés à la pollution de l'air intérieur et extérieur. Cela représente près de 6,5 millions de décès par an dont 3 millions sont attribuables uniquement à la pollution de l'air ambiant. La plus grande part de ces décès (88 %) est survenue dans des pays à faible revenu ou à revenu intermédiaire (Newel et al., 2017; Suk et al., 2016 ; WHO, 2016). En outre, selon l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), 700 000 décès prématurés étaient liés à la pollution de l'air en Afrique en 2013 (Roy, 2016).

Les activités anthropiques telles que le trafic automobile, les activités industrielles, et l'urbanisation massive sont considérées comme les principales sources d'émissions de polluants gazeux et particulaires dans l'air et de leurs importantes concentrations mesurées dans les environnements urbains (Bard, 2017; Kampa et Castanas, 2008; Sleiman, 2016). Dans les grandes villes d'Europe, d'Asie et d'Amérique du Nord, des réseaux de suivi de qualité de l'air sont installés dans le but d'informer les pouvoirs publics et la population en temps réel sur les différents niveaux de pollution. Les études menées dans ces villes soulignent l'urgence de prendre des mesures pour réduire les émissions de polluants dans l'atmosphère afin d'atténuer les impacts sur la santé et l'environnement. Cependant, en Afrique, où les chercheurs ont constaté que la pollution atmosphérique cause plus de décès prématurés par an que l'eau non potable ou la malnutrition, les réseaux de surveillance de la qualité de l'air sont presque inexistants (Roy, 2016). Quelques études réalisées dans le cadre de projets ou programmes scientifiques, avec des objectifs et des techniques de mesures différentes ont permis d'avoir un aperçu sur les niveaux de pollution dans certaines villes Africaines et notamment en Afrique de

l'Ouest (Josipovic et al., 2010; Norman et al., 2007). La figure 1 montre la disponibilité de données de pollution dans le monde en temps réel et met en évidence le déficit observé en Afrique.



**Figure 1:** Carte de la qualité de l'air en temps réel dans le monde le 18 /05/2018. (<http://aqicn.org/map/world/fr/#@g/11.7218/16.582/2z>).

Les rares études publiées sur la qualité de l'air ont porté majoritairement (44 %) sur la pollution extérieure par les particules (PM2.5 et PM10), tandis que 28 % portaient sur la pollution atmosphérique intérieure par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), 22 % sur les gaz à effet de serre (GES) et 6 % sur les émissions de mercure (Hg) (Fayiga et al., 2018). D'autres études ont révélé que 17%, 10%, 34%, 17% et 22% des niveaux de PM2.5 (respectivement 34 %, 6 %, 21 %, 14 % et 25 % pour les PM10) en Afrique sont dus respectivement au trafic, à l'industrie, aux feux domestiques, aux autres sources anthropiques et à des sources naturelles (karagulian et al., 2015). Les études globales et régionales sur les polluants gazeux sont beaucoup plus rares et pratiquement inexistantes en Afrique de l'Ouest.

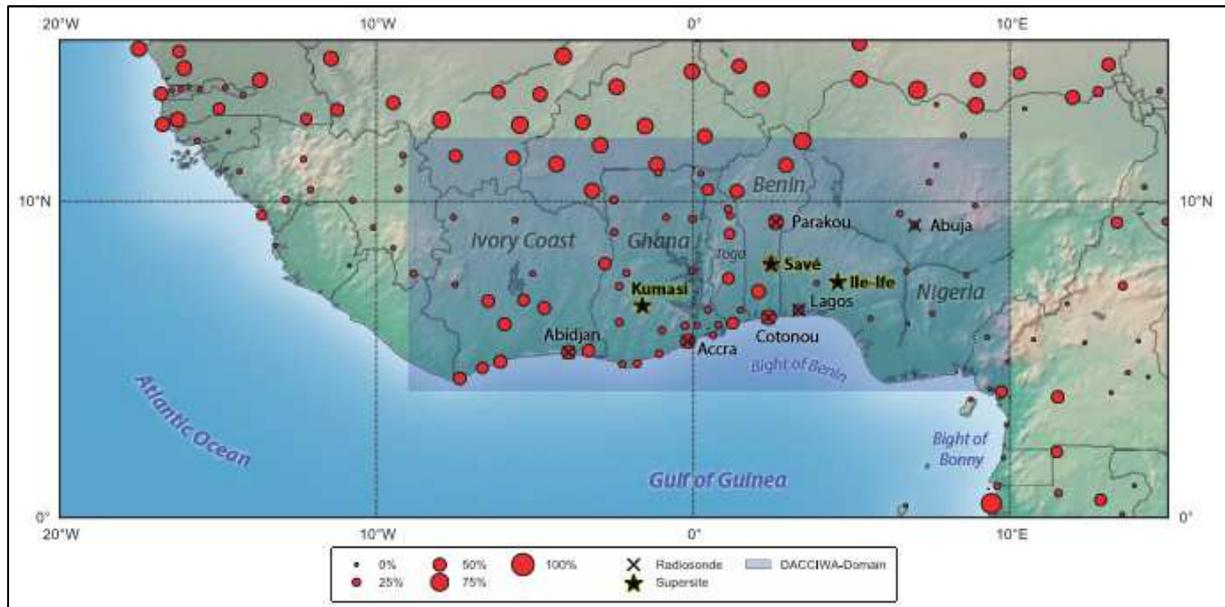
La sous-région Ouest Africaine connaît une reprise économique ces dernières années caractérisée par une forte croissance économique estimée à 2,7 % en 2017 avec une perspective de 3,5 % en 2018 (IMF, 2017). La plupart de ces activités économiques sont concentrées dans les villes. Cela a favorisé une forte explosion démographique dans les villes en raison de l'exode rural massif et des migrations importantes des populations ouest-africaines (Denis et Moriconi-Ebrard, 2009). Cette intense activité économique associée à la croissance démographique rapide, à la forte urbanisation et à l'expansion mal maîtrisée des villes engendre des émissions

anthropiques de plus en plus importantes de polluants gazeux et particulaires en Afrique de l'Ouest. Les effets ainsi générés sur la qualité de l'air, la santé des populations, les écosystèmes, la sécurité alimentaire et le climat régional sont en grande partie mal connus (Fourn et Fayomi, 2006; Norman et al., 2007). L'évaluation de ces impacts est assez complexe du fait de l'interaction de plusieurs paramètres tels que les effets du changement climatique global, la forte dépendance de cette région à la mousson Ouest Africaine, la compréhension scientifique incomplète des interactions entre émissions, nuages, rayonnement, précipitations et circulations régionales, et un manque de réseaux d'observation de la qualité de l'air.

En effet, il existe très peu de données qualifiées sur les niveaux de concentration des polluants et sur les paramètres météorologiques en Afrique de l'Ouest. Des initiatives ont été prises à travers certains programmes et projets de recherche tels que AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine), INDAAF (International Network to study Deposition and Atmospheric composition in AFrica) et POLCA (POLlution des Capitales Africaines). Ces études expérimentales ont été menées aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain et ont concerné certaines capitales africaines telles que Bamako, Dakar, Yaoundé et Amersfoort (Adon et al., 2016; Conradie et al., 2016; Liousse et Galy-Lacaux, 2010; Lourens et al., 2011; Val et al., 2013). Cependant, certaines importantes capitales d'Afrique de l'Ouest comme Abidjan et Cotonou n'ont pas bénéficié de telles études. Il s'avère donc nécessaire d'y conduire des études similaires pour mieux comprendre la dynamique atmosphérique régionale et les impacts locaux et régionaux de la pollution. De nouvelles initiatives telles que CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) et WMO/IGAC (World Meteorological Organization/ International Global Atmospheric Chemistry) pourraient contribuer à combler le manque de données dans cette région du monde.

Le programme européen DACCIWA (Dynamics - Aerosols - Chemistry - Clouds Interactions in West Africa) lancé en Décembre 2013 s'inscrit dans la continuité des actions menées par les programmes précédents et dans le même esprit que ces nouveaux projets cités plus haut. Ce programme, financé par l'Union Européenne (UE) et coordonné par le Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) en Allemagne, s'intéresse aux liens entre météorologie, climat et pollution de l'air au Sud de l'Afrique de l'Ouest (de la Côte d'Ivoire au Nigéria) (figure 2). Il a permis pour la première fois à des scientifiques d'étudier intégralement les impacts des émissions naturelles et anthropiques sur l'atmosphère de cette région, ainsi que sur la santé des populations, grâce à des données d'observation de grande qualité collectées lors de campagnes

intensives de terrain de grande ampleur et de mesures sur le long terme (Chiu et al., 2017; Fink et al., 2017; Knippertz et al., 2015, 2017; Lohou et al., 2017; Morris and Evans, 2017).



**Figure 2:** Aperçu de la zone d'étude du programme DACCIWA dans le sud de l'Afrique de l'Ouest mise en évidence en bleu (Knippertz et al., 2015).

Ce programme a nécessité une collaboration multidisciplinaire qui a réuni plusieurs partenaires scientifiques et associés issus de 8 pays d'Afrique et d'Europe. Le tableau 1 présente la liste des institutions partenaires et associées au programme DACCIWA.

Les partenaires du programme DACCIWA ont chacun travaillé sur des thématiques différentes qui ont été regroupées en sept groupes de travail ou Work Package (WP). Ce sont :

- WP 1 : Dynamique de la couche limite atmosphérique
- WP 2 : Pollution de l'air et santé
- WP 3 : Chimie atmosphérique
- WP 4 : Interactions nuage-aérosol
- WP 5 : Processus radiatifs
- WP 6 : Processus précipitants
- WP 7 : Processus de Mousson

**Tableau 1:** Liste des institutions partenaires et associées au programme DACCIWA

<b>Pays</b>	<b>Institutions partenaires et associées au programme DACCIWA</b>
Allemagne	<ul style="list-style-type: none"><li>• Karlsruhe Institut of Technology (KIT)</li><li>• Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)</li></ul>
Royaume Uni	<ul style="list-style-type: none"><li>• European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECWMF)</li><li>• Met Office (MO)</li><li>• University of Leeds (UNIVLEEDS)</li><li>• University of York (UNIVYORK)</li><li>• University of Reading (UREAD)</li><li>• University of Manchester (UNIVMAN)</li></ul>
Suisse	<ul style="list-style-type: none"><li>• Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)</li></ul>
Ghana	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kwame Nkrumah University of Science and Technology Kumasi (KNUST)</li></ul>
Nigeria	<ul style="list-style-type: none"><li>• Obafemi Awolowo University (OAU)</li></ul>
France	<ul style="list-style-type: none"><li>• Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)</li><li>• Université Toulouse III Paul Sabatier (UPS)</li><li>• Université Pierre et Marie Curie (UPMC)</li><li>• Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II (UBP)</li><li>• Université Paris Diderot (UPD)</li></ul>
Bénin	<ul style="list-style-type: none"><li>• Université d'Abomey-Calavi (UAC)</li></ul>
Côte d'Ivoire	<ul style="list-style-type: none"><li>• Université Félix Houphouët-Boigny à Abidjan (UFHB)</li><li>• Institut Pasteur de Côte d'Ivoire (IPCI)</li></ul>

Les résultats obtenus par ces différents groupes de travail ont été publiés dans des revues scientifiques (Bahino et al., 2018 ; Keita et al., 2018 ; Djossou et al., 2018 ; Bessardon et al., 2017 ; Brocchi et al., 2016; Chazette et al., 2017 ; Denjean et al., 2017 ; Kalthoff et al., 2017; Krysztofiak-Tong et al., 2017; Stratmann et al., 2017; Taylor et al., 2017; Tocquer et al., 2017).

Le mémoire de thèse que nous présentons ici s'inscrit pleinement dans le cadre des activités du groupe de travail 2 (WP2). Le WP2 vise à mettre en relation les sources d'émission, les concentrations des polluants atmosphériques et les impacts sur la santé des populations en termes de maladies respiratoires et apparentées sur des sites urbains caractéristiques des principales sources de pollution en Afrique de l'Ouest. Les populations ciblées sont celles vivant à proximité des principales sources de pollution identifiées dans les pays au Sud de

l'Afrique de l'Ouest. Les principales sources de pollution identifiées dans le cadre du programme DACCIWA sont les feux domestiques, le trafic routier et les feux issus de l'incinération des déchets dans les décharges. Le WP2 focalise son action sur deux grandes villes d'Afrique de l'Ouest que sont Abidjan (Côte d'Ivoire) et Cotonou (Bénin) et qui n'avaient pas bénéficié des programmes précédents. Ces villes présentent des particularités telles que le trafic routier qui est caractérisé par une circulation importante d'engins à deux roues avec des moteurs à deux ou quatre temps à Cotonou tandis qu'il est le fait de la circulation de véhicules de seconde main et de véhicules de transport vétustes roulant au diesel à Abidjan. Ces villes connaissent aussi une forte croissance démographique et une forte urbanisation.

La stratégie dans le WP2 est basée sur la multidisciplinarité. Elle fait appel à des compétences dans différents domaines tels que la physico-chimie de l'atmosphère, la médecine, la toxicologie et l'épidémiologie. Ces compétences sont mises en relation grâce à une approche multivariée incluant des mesures expérimentales à court et moyen-terme, des enquêtes épidémiologiques, des données satellites et de la modélisation. Les activités du WP2 se déclinent en 4 principales tâches qui sont :

- Tâche 2.1 : Inventaire d'émission et scénarios régionaux
- Tâche 2.2 : Modélisation régionale de la pollution atmosphérique et des impacts sanitaires.
- Tâche 2.3 : Mesures à long terme des concentrations des polluants de combustion et recensement des maladies respiratoires.
- Tâche 2.4 : Aérosols de combustion et leurs effets toxicologiques au niveau des sources.

La tâche 2.3 a permis de faire le suivi durant trois ans des concentrations de polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{O}_3$ , COV) et particulaires ( $\text{PM}_{2.5}$ ) sur 4 super-sites à Abidjan et à Cotonou représentant les principales sources de pollution identifiées (Bahino et al., 2018 ; Djossou et al., 2018). Ces mesures à moyen-terme ont été ponctuées par des campagnes intensives en saison sèche et en saison humide incluant d'autres sources de pollution couplées à des enquêtes épidémiologiques et des mesures d'exposition individuelle.

C'est dans le cadre de la tâche 2.3 du programme DACCIWA WP2 que s'inscrit ce travail de thèse qui s'intitule : « **Analyse de la qualité de l'air dans les zones urbaines en Afrique : caractérisation de la pollution gazeuse des espèces chimiques  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  et  $\text{O}_3$  à Abidjan et Cotonou** ». Ce travail qui ne présente qu'une partie des résultats obtenus ou attendus à la fin de la mise en œuvre du WP2 poursuit 4 principaux objectifs.

**Le premier objectif** est de caractériser les sources majeures de pollution en Afrique de l'Ouest identifiées dans le cadre du programme DACCIWA sur chacun des quatre sites de mesures à Abidjan et Cotonou et d'évaluer leur contribution aux concentrations des polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ).

**Le second objectif** de ce travail est d'étudier les variations temporelles (mensuelles, saisonnières, annuelles et interannuelles) à moyen-terme des concentrations des polluants gazeux sur les quatre sites retenus et de faire une caractérisation moyenne des niveaux de pollution gazeuse par type de source à Abidjan et Cotonou.

**Le troisième objectif** vise à produire des cartes de pollution gazeuse de chacune des deux villes afin d'étudier la distribution spatiale des polluants gazeux en tenant compte de la majorité des sources potentielles de pollution.

**Le quatrième objectif** de cette thèse est d'évaluer le niveau moyen de la pollution dans les villes Africaines à travers une étude comparative des concentrations moyennes de certains polluants gazeux obtenues lors de différents programmes de recherche.

Ce travail de thèse a débuté par l'identification des sites et l'installation des équipements de mesures à Abidjan et Cotonou. Ensuite, une formation sur les techniques de collecte et d'analyse des échantillons de gaz au laboratoire d'Aérodologie de Toulouse a permis de nous rendre autonomes. Pendant 28 mois lors de diverses campagnes de mesures, nous avons collecté des échantillons qui ont tous été analysés. Le traitement des résultats d'analyse et le calcul des concentrations ambiantes des polluants ont permis d'aboutir à une base de données originale. La base de données réalisée sera intégrée à la base de données régionale BAOBAB (Base Afrique de l'Ouest Beyond AMMA Base) et disponible sur le site du programme DACCIWA (<http://baobab.sedoo.fr/DACCIWA/>; Brissebrat et al., 2017). Cette base de données permettra d'apporter des réponses aux 4 principaux objectifs de ma thèse.

Le manuscrit de thèse que nous présentons ici s'articule autour de 4 chapitres.

**Le premier chapitre** fait un rappel de quelques généralités sur la pollution atmosphérique. L'accent est mis sur l'étude des sources des polluants gazeux dont les impacts sanitaires sont connus. Il décrit aussi les phénomènes de transport et de dépôt des polluants atmosphériques en lien avec les conditions météorologiques particulières de la région tropicale Africaine. Ce chapitre s'achève par un rappel des normes de suivi de la qualité de l'air mis en place à travers

les politiques nationales en Côte d'Ivoire et au Bénin et à travers les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air.

Le **deuxième chapitre** présente le protocole expérimental utilisé tout au long de cette étude à travers une présentation des zones d'étude et une description des sites de mesures retenus dans le cadre du programme DACCIWA. Les techniques de collecte et d'analyse des échantillons de gaz et les méthodes de calcul des concentrations ambiantes des polluants y sont également décrites.

Dans le **troisième chapitre**, les résultats du suivi à moyen terme des concentrations des polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) sur des sites représentatifs des principales sources de pollution (feux domestiques, trafic routier, feux de décharge) sont présentés. Après la présentation de la base de données obtenue sur chaque site, une évaluation de la contribution des sources identifiées aux concentrations des polluants a été faite grâce à des méthodes statistiques décrites brièvement dans ce chapitre. Ce chapitre étudie aussi les variations temporelles des concentrations des polluants afin de dégager les cycles mensuels, saisonniers et annuels. Les résultats de la caractérisation moyenne de la pollution durant la période d'étude à Abidjan et Cotonou ont été comparés aux résultats obtenus sur d'autres sites urbains à Dakar, Bamako et Yaoundé. Ce chapitre présente également, une étude comparée des résultats d'études scientifiques menées en Afrique sur les concentrations moyennes des principaux polluants issus du trafic routier ( $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$ ).

Dans le **quatrième chapitre**, les résultats des trois campagnes intensives réalisées sur 27 sites au total à Abidjan et 8 sites à Cotonou pour étudier la distribution spatiale des concentrations des polluants gazeux sont présentés. A partir des mesures ponctuelles de concentrations de polluants gazeux, les cartes de pollution de chaque polluant ont été réalisées en utilisant des méthodes d'interpolation utilisant les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Cette étude tient compte d'autres sources potentielles de pollution et permet aussi d'évaluer la concentration moyenne des polluants par types de sites. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus dans d'autres villes d'Afrique et d'Asie. Les résultats de l'étude présentée au chapitre 4 ont fait l'objet d'un article scientifique intitulé « *A pilot study of gaseous pollutants' measurement ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ) in Abidjan, Côte d'Ivoire: contribution to an overview of gaseous pollution in African cities.* ». Cet article est présenté en annexe de ce manuscrit.

Ce manuscrit s'achève par une conclusion générale qui reprend les principaux résultats obtenus et qui dégage les perspectives que nous offre une telle étude.

**Chapitre I :**  
**Sources des polluants gazeux en milieu urbain**

## **I.1. Généralités sur la pollution atmosphérique**

La pollution atmosphérique a très tôt constitué une préoccupation majeure pour les pouvoirs publics. Le 14 Septembre 1967, le conseil de l'Europe a défini la pollution atmosphérique comme suit : « Il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses constituants est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment ou de créer une gêne. » (Degobert, 1995). Cette définition montre que la notion de pollution atmosphérique est vaste et susceptible d'évoluer en fonction de nos connaissances scientifiques et technologiques. Elle met aussi en lumière que la notion de polluant ne renferme pas seulement les composants chimiques dont les effets nocifs sur la santé des populations et des écosystèmes sont avérés mais aussi ceux capables de susciter une gêne ou d'altérer les sens humains à travers le dégagement d'odeurs nauséabondes ou même la baisse de la visibilité par des fumées. Ces derniers aspects sont repris par les décrets portant sur la qualité de l'air en Côte d'Ivoire (2017) et au Bénin (2001). Ils définissent la pollution de l'air comme l'émission volontaire ou accidentelle dans l'air, de fumées ou de substances de nature à créer des nuisances pour les êtres vivants, à compromettre leur santé ou la sécurité publique ou nuire à la production agricole, à la conservation des édifices ou au caractère des sites et paysages.

La pollution de l'air peut être d'origine naturelle ou liée aux activités anthropiques et les polluants peuvent être aussi bien primaires que secondaires. Dans les milieux urbains les polluants gazeux tels que  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  et  $\text{O}_3$  dont les effets sur la santé et l'environnement sont connus font souvent l'objet d'un suivi particulier. Des normes de qualité de l'air ont même été établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour limiter les concentrations de certains d'entre eux (Krzyzanowski et Cohen, 2008). Dans ce qui suit nous présenterons pour chaque polluant cité plus haut les sources, les impacts et les normes établies lorsqu'elles existent.

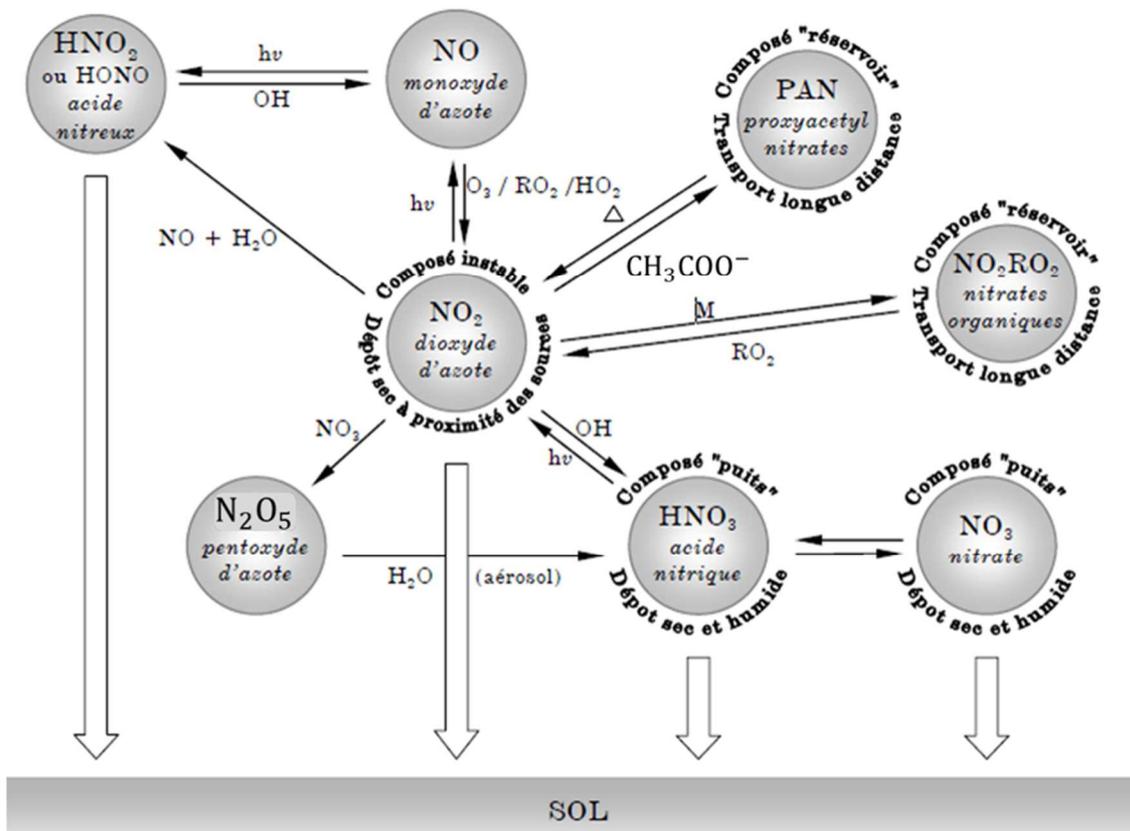
## **I.2. Source des polluants gazeux en milieu urbain et impact sanitaire**

### **I.2.1. Dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ )**

Le dioxyde d'azote fait partie de la famille des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Les oxydes d'azote de formule chimique générale  $\text{N}_x\text{O}_y$  regroupent principalement le monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ), le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Commandré, 2002). Le dioxyde d'azote constitue le polluant majeur de l'atmosphère terrestre. C'est un gaz brun rougeâtre qui

dégage une odeur âcre et irritante à forte concentration (5 ppm). A faible concentration, le  $\text{NO}_2$  a une couleur brun jaunâtre.  $\text{NO}$  est rapidement oxydé en  $\text{NO}_2$ . L'équilibre photochimique entre  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$  s'établit en moins de 1 à 2 minutes.  $\text{NO}_2$  est au centre d'un grand nombre de réactions conduisant à l'élimination de l'azote réactif de l'atmosphère en se transformant principalement au contact de l'air en acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et en nitrates organiques toxiques contribuant ainsi à l'acidification des pluies et à l'eutrophisation des cours d'eau et des sols.  $\text{NO}_2$  peut aussi contribuer à un recyclage de l'azote par la formation d'espèces réservoirs (moins réactives) de  $\text{NO}_x$ . Il participe aussi aux réactions atmosphériques conduisant à la formation de l'ozone troposphérique. Les principales voies de réaction des  $\text{NO}_x$  sont présentées à la figure 1.1 (Deletraz, 2002). Dans les milieux urbains  $\text{NO}_2$  est principalement formé sous l'action de la chaleur dans les procédés industriels (industrie manufacturière, transformation d'énergie...), les processus de combustion des combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz naturel) et l'agriculture périurbaine. Dans le secteur du transport, les gaz d'échappements des automobiles et plus particulièrement les véhicules diesels représentent une partie importante de la pollution atmosphérique par le  $\text{NO}_2$ .  $\text{NO}_2$  peut aussi être naturellement émis par les sols, les feux de brousse ou la foudre (Van der A et al., 2008).

Les concentrations de  $\text{NO}_2$  dans l'atmosphère des milieux urbains ont un certain nombre d'impacts sur l'environnement et la santé des populations. Sous l'effet des rayons solaires, ces substances peuvent se transformer en polluants atmosphériques acides, notamment en particules de nitrate et engendrer une acidification des milieux, qui peut entraîner des chutes de feuilles ou d'aiguilles, des nécroses et influencer de façon importante les milieux aquatiques. Un apport excédentaire d'azote dans les milieux naturels et notamment les sols peut conduire à une eutrophisation du milieu et par conséquent à une réduction de la biodiversité. C'est également un gaz précurseur de particules secondaires. En se combinant avec d'autres substances il peut former des particules fines qui auront un impact sur la santé. En effet les concentrations de  $\text{NO}_2$  augmentent considérablement la probabilité de maladies respiratoires. L'exposition au  $\text{NO}_2$  génère des troubles respiratoires, une aggravation des crises d'asthme, une inflammation de la paroi des poumons qui augmente la sensibilité aux attaques microbiennes et des bronchites chroniques chez les sujets fragiles (Chauhan et al., 1998; Speizer et al., 1980). Les études épidémiologiques ont montré que les symptômes bronchitiques chez l'enfant asthmatique augmentent avec une exposition de longue durée au  $\text{NO}_2$  tandis que des concentrations élevées de  $\text{NO}_2$  augmentent la vulnérabilité des personnes âgées atteintes d'une maladie cardiaque aux attaques.



**Figure 1.1:** Principales voies de stockage et d'élimination des NOx dans l'atmosphère. (Deletraz, 2002)

### I.2.2. Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)

Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est un gaz dense, incolore, ininflammable et très soluble dans l'eau. Il possède une odeur pénétrante qui irrite les yeux et les voies respiratoires. Le SO<sub>2</sub> peut réagir avec les vapeurs d'eau atmosphérique et former un brouillard et des aérosols d'acide sulfurique. C'est le principal précurseur des sulfates et des particules en suspension dans l'atmosphère. Il est aussi l'un des responsables de l'acidification des pluies à travers la production d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) qui se fait généralement en présence d'un catalyseur comme le NO<sub>2</sub>.

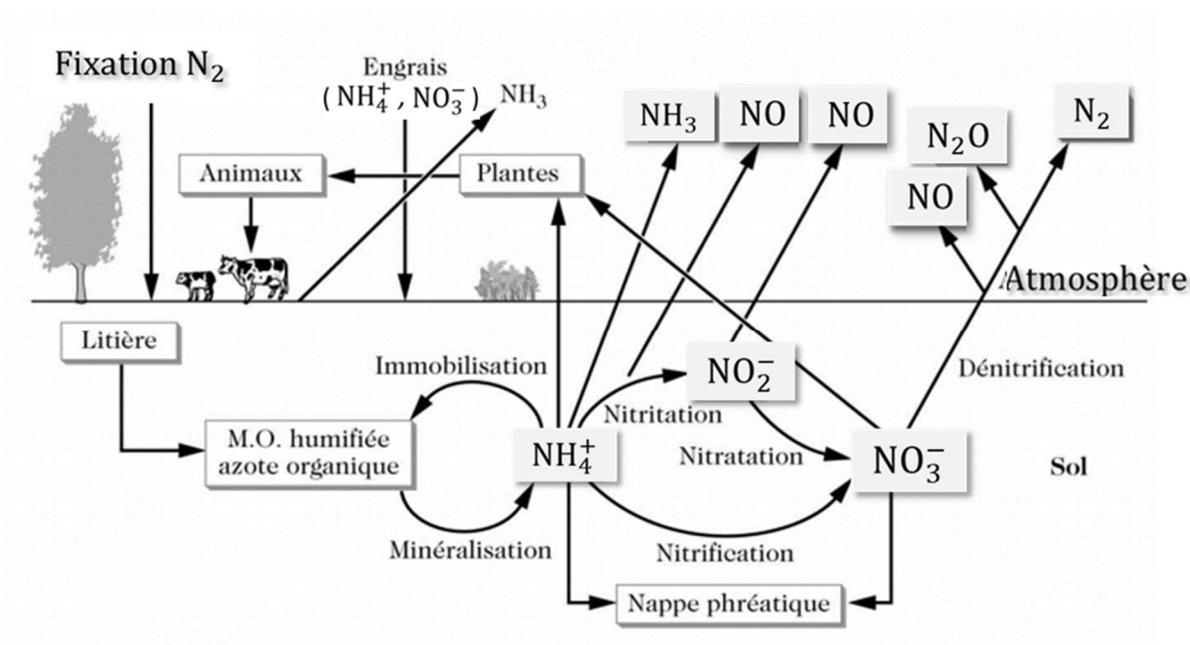
SO<sub>2</sub> est émis dans l'atmosphère par des sources aussi bien naturelles qu'anthropiques. La principale source naturelle de SO<sub>2</sub> est constituée par les éruptions volcaniques. Ces émissions se retrouvent généralement dans la stratosphère compte tenu de la vitesse d'éjection de SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Le SO<sub>2</sub> d'origine anthropique atmosphérique provient essentiellement de processus de combustion de combustibles fossiles au cours desquelles les

impuretés soufrées contenues dans les combustibles sont oxydées par l'oxygène de l'air. En effet, ce polluant gazeux est rejeté aussi bien par de multiples petites sources mobiles ou fixes telles que les installations de chauffage domestique et les véhicules à moteur diesel. Il est aussi émis par des sources ponctuelles plus importantes comme les centrales de production électrique ou de vapeur, les chaufferies urbaines et les industries du pétrole (Rodriguez and Hrbek, 1999; Tam et al., 1990). La combustion du charbon est la source anthropique la plus importante, suivie des émissions liées aux activités de l'industrie pétrole.

Le  $\text{SO}_2$ , lorsqu'il est fortement concentré, a une odeur piquante et peut provoquer une irritation des muqueuses, de la peau et des voies respiratoires affectant ainsi le système respiratoire et le fonctionnement des poumons. L'inflammation de l'appareil respiratoire entraîne de la toux, une production de mucus, une exacerbation de l'asthme, des bronchites chroniques et une sensibilisation aux infections respiratoires. Le nombre des admissions à l'hôpital pour des cardiopathies et la mortalité augmentent les jours de fortes concentrations en  $\text{SO}_2$  (<http://www.respire-asso.org/dioxyde-de-soufre-so2/>). La réaction avec l'eau produit de l'acide sulfurique qui est à l'origine du phénomène des pluies acides.

### **I.2.3. Ammoniac ( $\text{NH}_3$ )**

L'ammoniac de formule  $\text{NH}_3$  est un gaz incolore et irritant. Il est très soluble dans l'eau et se dépose rapidement sur la végétation. Il peut constituer une source de pollution importante pour les écosystèmes sensibles, et conduire à l'eutrophisation de certains écosystèmes. Une fois émis dans l'atmosphère,  $\text{NH}_3$  ne reste que quelques heures dans l'atmosphère, mais engendre une cascade d'effets environnementaux (cascade de l'azote) qui, à des concentrations élevées, affectent la faune, la flore et la qualité de l'air localement (Galloway et al., 2003, 2008). C'est un composé qui peut être émis par des sources aussi bien naturelles qu'anthropiques.  $\text{NH}_3$  est naturellement émis dans l'atmosphère lors des activités microbiennes qui accompagnent le cycle de l'azote dans le sol à un pH supérieur à 8. La figure 1.2 présente le cycle de l'azote dans le sol et les productions gazeuses associées. Les zones océaniques riches en azote, notamment les zones côtières, peuvent aussi être une source de  $\text{NH}_3$  atmosphérique. Les émissions anthropiques d'ammoniac sont pour l'essentiel d'origine agropastorale. En effet, une grande partie de  $\text{NH}_3$  provient des déjections des animaux d'élevage et de la décomposition bactérienne de l'urée. Aussi l'utilisation abusive des engrais chimiques riches en azote et l'épandage intensif de lisier dans de nombreuses plantations industrielles entraînent une émission importante de  $\text{NH}_3$ .



**Figure 1.2:** Cycle de l'azote dans le sol et productions gazeuses associées (Delmas et al., 2005).

Des études récentes ont aussi montré que la combustion de biomasse, de biocarburants, de carburants et certains procédés industriels pouvaient constituer une source importante de  $\text{NH}_3$  (Akagi et al., 2011 ; Behera et al., 2013; Paulot et al., 2017). Dans les zones urbaines, les feux domestiques, le trafic et l'activité industrielle sont généralement considérés comme les sources majeures de  $\text{NH}_3$  (Perrino et al., 2002; Prevot et al., 2017; Sapek, 2013; Sun et al., 2017; Sutton et al., 2000; Teng et al., 2017; Whitehead et al., 2007). Dans les capitales d'Afrique de l'Ouest, les feux domestiques et le brûlage de la biomasse constituent la principale source d'émission de  $\text{NH}_3$  (Adon et al., 2010; Liousse et al., 2014). Par exemple, les émissions anthropiques de  $\text{NH}_3$  pour les sources de feux domestiques à Bamako (Mali) et à Dakar (Sénégal) ont été estimées en 2005 à  $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ TgNH}_3 \cdot \text{an}^{-1}$  et  $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ TgNH}_3 \cdot \text{an}^{-1}$  respectivement (Adon et al., 2016). Le bilan global des émissions de  $\text{NH}_3$  est donné par le tableau I.1.

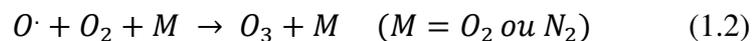
**Tableau I.1:** Principales sources et quantités d’ammoniac atmosphérique émis à l’échelle globale. (source : <http://omer7a.obs-mip.fr/mallette/fiches/L-ammoniac-NH3>).

<b>Sources de NH<sub>3</sub></b>	<b>Tg (N) / an</b>
<b>Sources naturelles</b>	
Sols	2,4
Océans	8,2
Animaux sauvages	0,1
<b>Total sources naturelles</b>	<b>10,7</b>
<b>Sources anthropiques</b>	
Combustibles fossiles	0,1
Combustion de biomasse	5,7
Sols cultivés (fertilisation)	9,0
Cultures (plantes)	3,6
Elevage	21,6
<b>Total sources anthropiques</b>	<b>40</b>
<b>Total naturel + anthropiques</b>	<b>50,7</b>

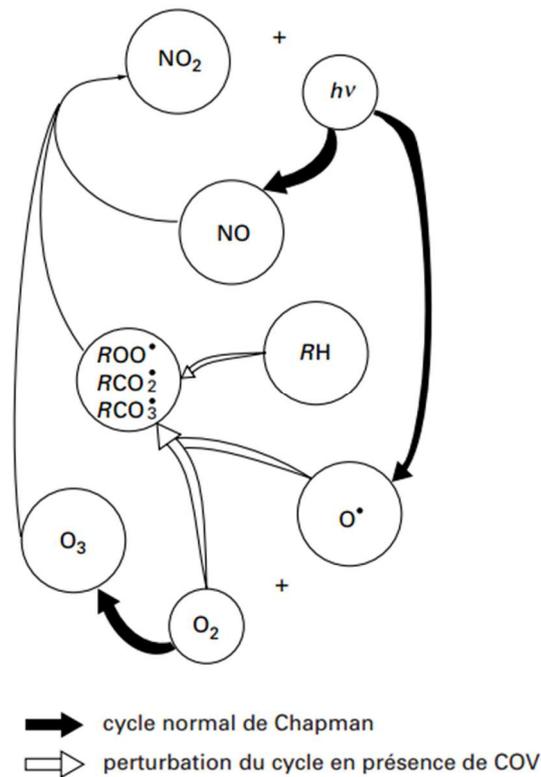
#### **I.2.4. Ozone (O<sub>3</sub>)**

L’ozone est un gaz atmosphérique composé de trois atomes d’oxygène. C’est une espèce relativement stable. C’est une molécule remarquable qui joue à la fois le rôle de protecteur et de polluant de la vie sur terre. En effet, on le retrouve en grande quantité dans la stratosphère (entre 15 et 35 km de la surface de la terre) où il joue, de par ses propriétés physiques, le rôle d’absorbeur du rayonnement ultra-violet (UV) du soleil et protège les organismes terrestres de ce rayonnement au pouvoir destructeur. L’ozone agit donc comme un filtre invisible qui protège toutes les formes de vie contre les dangers d’une surexposition aux rayons UV. L’ozone stratosphérique représente 90 % de l’ozone contenu dans l’atmosphère. On retrouve aussi l’ozone au niveau des basses couches atmosphériques dans la troposphère. L’ozone troposphérique est un polluant secondaire qui est issu de processus photochimiques. Ses propriétés oxydantes en font un des principaux éléments intervenant dans la plupart des processus de chimie atmosphérique. Même s’il n’est pas directement émis par des sources anthropiques, l’ozone troposphérique est considéré comme un indicateur de la qualité de l’air compte tenu de ses impacts nocifs pour la santé humaine, la faune et la flore (Duan et al., 2008; Hagenbjörk et al., 2017; WHO, 2006). C’est donc l’ozone troposphérique qui fera l’objet de cette étude.

Comme indiqué plus haut, l’ozone troposphérique est un polluant secondaire. C’est-à-dire qu’il n’est pas émis directement dans l’atmosphère par des sources particulières identifiées. Il existe deux sources principales de l’ozone troposphérique. Une petite partie de l’ozone troposphérique provient du transport depuis la stratosphère. La grande majorité de l’ozone troposphérique est issue de la réaction photochimique entre des polluants primaires appelés précurseurs. Le principal précurseur conduisant à la formation de l’ozone est le dioxyde d’azote ( $\text{NO}_2$ ). En effet, la combustion et les rejets des gaz d’échappement émettent à la fois des oxydes d’azote ( $\text{NO}_x$ ) et des gaz organiques. Sous l’action du rayonnement UV, ces deux familles de composés interagissent et forment du  $\text{NO}_2$ . Le  $\text{NO}_2$  est alors rapidement photolysé sous un rayonnement de courte longueur d’onde ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) conduisant ainsi à la formation du monoxyde d’azote et un atome d’oxygène radicalaire (réaction 1.1). L’oxygène radicalaire réagit avec le dioxygène présent dans l’air pour conduire à la formation d’ozone (réaction 1.2). Ce processus de production de  $\text{O}_3$  s’équilibre avec un processus de destruction de l’ozone qui fait intervenir  $\text{NO}$  pour régénérer  $\text{NO}_2$  (réaction 1.3). C’est le cycle normal de production d’ozone selon Chapman (Soltys, 1998).



Cette description sommaire ne doit pas cacher la réalité de la chimie de l’ozone qui est non linéaire et qui fait intervenir des dizaines de réactions. En effet, ce cycle normal est perturbé par la présence dans l’atmosphère de différentes substances qui sont les composés organiques volatils (COV) et les radicaux issus de la combustion du méthane ( $\text{CH}_4$ ) ou issus de la réaction du monoxyde carbone (CO) avec le radical hydroxyde (OH). La figure 1.3 montre la perturbation du cycle de Chapman en présence de COV.



**Figure 1.3:** Perturbation du cycle de Chapman par la présence des COV (Soltys, 1998).

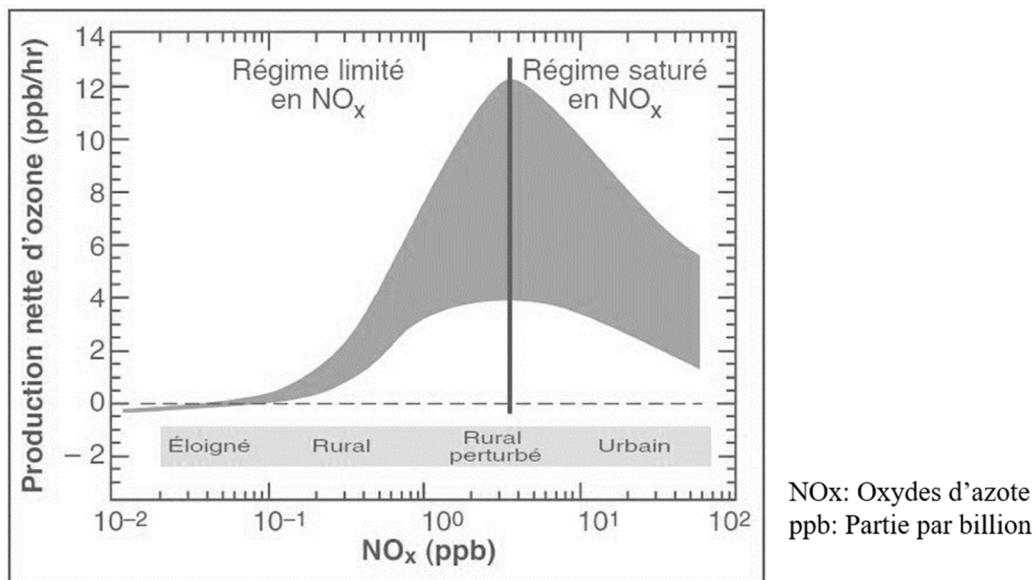
Les concentrations d’ozone dans la troposphère augmentent lorsque le cycle de l’état photo stationnaire est perturbé par l’ajout de COV ou de CO qui mène à la formation de radicaux peroxy permettant de convertir NO en NO<sub>2</sub> sans consommer O<sub>3</sub>. Cet ozone a donc tendance à s’accumuler entrainant ainsi une augmentation des concentrations dans l’atmosphère. La régénération de NO<sub>2</sub> peut donc se faire soit par oxydation de NO par O<sub>3</sub> (bilan nul de O<sub>3</sub>), soit par réaction de NO avec un radical peroxy. Il y a donc compétition pour NO entre ces deux types de réactions. Par conséquent, deux régimes chimiques gouvernant la production d’ozone et faisant intervenir les NO<sub>x</sub> et les COV se distinguent aussi bien aux échelles locales et régionales que globales.

- Un régime saturé en NO<sub>x</sub> (ou pauvre en COV)
- Un régime limité en NO<sub>x</sub> (ou riche en COV)

À un endroit précis, le niveau de concentration en O<sub>3</sub> dépend de l’émission de ses précurseurs (COV et NO<sub>x</sub>), du transport à grande distance de O<sub>3</sub> et des paramètres météorologiques (Hagenbjörk et al., 2017). Dans les zones urbaines à fortes concentrations de NO<sub>x</sub> (saturées en NO<sub>x</sub>) et à faible rapport COV / NO<sub>x</sub>, le taux de production d’ozone est généralement faible et les concentrations sont de l’ordre de quelques parties par billion (ppb)

ppb. Dans certains endroits, des concentrations élevées peuvent être observées, en raison de la recirculation des masses d'air atmosphériques et des conditions météorologiques spécifiques. Lorsqu'on quitte le centre-ville pour les zones périurbaines, on constate une augmentation du rapport COV / NO<sub>x</sub> et une production élevée d'O<sub>3</sub> en raison de l'absence de sources majeures de NO<sub>x</sub>, de la dilution de la masse d'air et de la présence plus importante de COV biogéniques. La figure 1.4 indique la vitesse de production d'ozone en ppb par heure en fonction des concentrations en NO<sub>x</sub> et du milieu considéré.

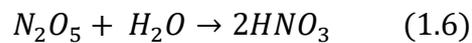
À des concentrations trop élevées, l'ozone a des effets marqués sur la santé de l'homme. On observe alors des problèmes respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme, une diminution de la fonction pulmonaire et l'apparition de maladies respiratoires. En Europe, on considère actuellement que l'ozone est l'un des polluants atmosphériques les plus préoccupants. C'est ainsi que plusieurs études européennes ont signalé un accroissement de la mortalité quotidienne de 0,3 % et des maladies cardiaques de 0,4 % pour chaque augmentation de 10 µg/m<sup>3</sup> de la concentration en ozone (Airparif, 2013).



**Figure 1.4:** Profil type de la vitesse de production d'ozone en fonction de la quantité d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) en ppb par heures (Camredon et Aumont, 2007).

### I.2.5. Acide nitrique (HNO<sub>3</sub>)

L'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) est un polluant gazeux secondaire connu comme un des principaux produits de l'oxydation des composés azotés gazeux. En effet, HNO<sub>3</sub> est le résultat de plusieurs processus de transformation chimique de NH<sub>3</sub> et NO<sub>x</sub> (NO<sub>2</sub> + NO) guidés par la présence des oxydants tels que H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et OH (Hanke et al., 2003 ; Kumar et al., 2004; Seinfeld et Pandis, 2016). HNO<sub>3</sub> est le principal puits des NO<sub>x</sub> à travers deux principales réactions. Pendant le jour, NO<sub>2</sub> réagit avec le radical OH et conduit à la formation de HNO<sub>3</sub> (réaction 1.4). La nuit en l'absence des radicaux diurnes (OH et NO), le radical NO<sub>3</sub> réagit avec NO<sub>2</sub> pour former le pentoxyde d'azote N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (réaction 1.5) (Bey, 1997). Ce dernier entre en réaction avec l'eau à la surface des aérosols pour conduire à la formation de HNO<sub>3</sub> (réaction 1.6). Ces transformations chimiques permettent à HNO<sub>3</sub> d'être sous la forme d'espèces plus stables dites « réservoir », d'être transporté et de se former loin de la source de ses précurseurs. HNO<sub>3</sub> est éliminé de l'atmosphère soit par dépôt sec, soit par dépôt humide. C'est l'un des acides minéraux contribuant aux pluies acides (Cogbill et Likens, 1974).



L'acide nitrique est généralement utilisé sous forme de solution aqueuse dans plusieurs activités humaines qui peuvent constituer des sources importantes d'émission dans l'atmosphère. HNO<sub>3</sub> est utilisé dans la fabrication d'engrais, de colorants, de réactifs analytiques, d'explosifs et de produits pharmaceutiques, photographiques et textiles. Il est aussi utilisé dans la préparation des nitrates organiques et sels métalliques. Certains moteurs diesel peuvent aussi émettre directement HNO<sub>3</sub> dans l'atmosphère.

HNO<sub>3</sub> a de nombreuses conséquences sur l'environnement. Sa grande solubilité favorise sa dissolution dans les pluies à l'origine des pluies acides (pH < 5,6) qui détruisent les édifices et perturbent les écosystèmes agricoles et aquatiques. Ces pluies acides détruisent aussi les forêts et accentuent le réchauffement climatique. HNO<sub>3</sub> est un gaz irritant dangereux pour la santé humaine.

### **I.3. Transport et dépôt des polluants atmosphériques**

Les polluants émis dans l'atmosphère par les différentes sources naturelles et anthropiques se retrouvent à différentes altitudes. Elles y subissent l'influence des mouvements des masses d'air qui sont très importants dans les régions tropicales africaines. Certains de ces polluants, en fonction des conditions atmosphériques, subissent des réactions chimiques et sont transportés loin des sources d'émission. Dans cette section, le phénomène de transport de ces polluants atmosphériques à l'échelle de l'Afrique tropicale en donnant une brève description de la dynamique des masses d'air de cette région sera abordé. Ensuite le transport et le dépôt des polluants atmosphériques ont été expliqués.

#### **I.3.1. Circulation générale atmosphérique en Afrique tropicale**

L'Afrique a une superficie de 30 221 532 km<sup>2</sup>. Elle représente 6 % de la surface totale du globe terrestre et 20 % des terres émergées. En Afrique tropicale, la circulation générale des masses d'air est gouvernée par la circulation de trois grandes masses d'air qui se développent sous l'influence de trois systèmes anticycloniques permanents, décrits succinctement ci-dessous :

- l'anticyclone de l'Atlantique Nord ou anticyclone des Açores au niveau du parallèle 30°N. Il est à l'origine des alizés du Nord-Est formant le flux de masse d'air chaud et sec appelé Harmattan ou alizé boréal,

- l'anticyclone de l'Atlantique Sud ou anticyclone de Saint Hélène sur le parallèle 30°S. Il est à l'origine des alizés du Sud-Est. Ces derniers se chargent lourdement en humidité au-dessus de l'océan, traversent l'équateur et sont alors déviés vers le Sud-Ouest. En arrivant sur les côtes africaines, ils forment le flux de mousson ou alizé austral,

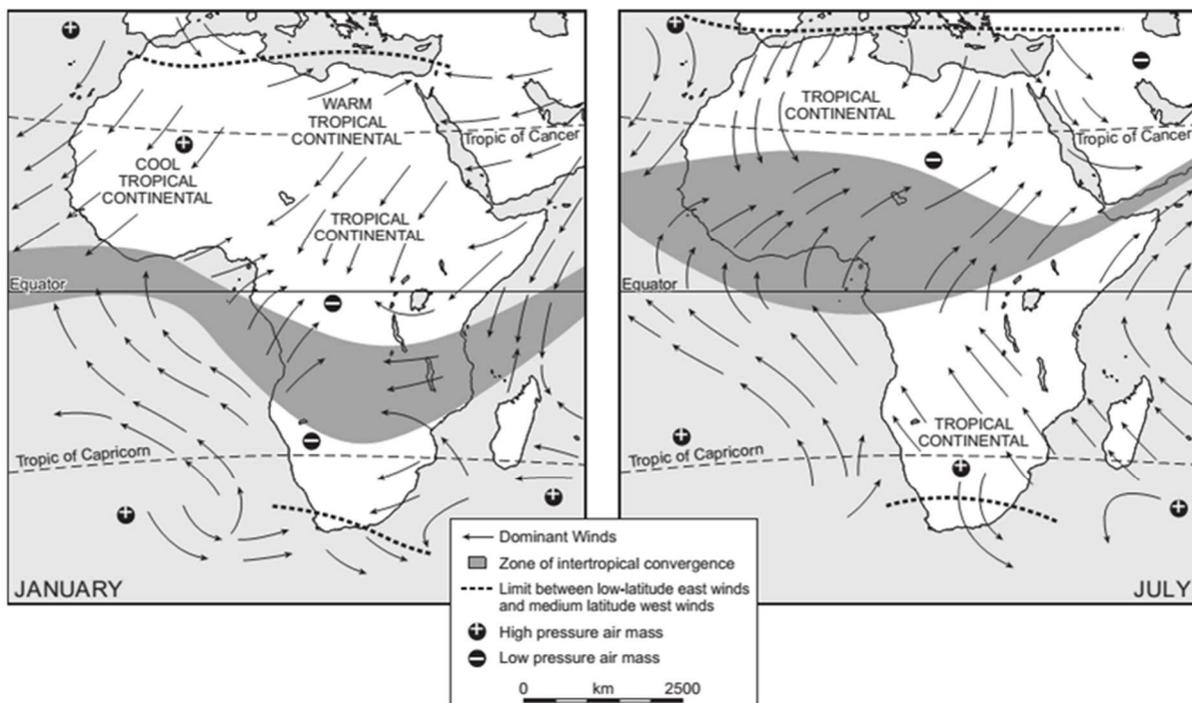
- l'anticyclone de Madagascar (anticyclone de l'Océan indien) localisé au Sud-Est du continent dans l'Océan Indien.

La zone de convergence entre les flux d'Harmattan et de mousson sur le continent constitue une zone frontale appelée Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) dont la trace au sol est appelée Front Intertropical (FIT). La surface de contact entre la mousson et les vents alizés de Sud-Est (air indien humide et instable) détermine la Confluence Intertropicale Océanique (CIO).

En Afrique de l'Ouest, la pluviométrie, facteur déterminant du climat, est liée au mouvement Nord-Sud de la ZCIT. De Janvier à Juillet, la ZCIT progresse lentement vers le

Nord jusqu'à atteindre son extension méridionale maximale (18 à 20 ° Nord), puis il revient à nouveau vers le Sud où sa progression s'arrête vers 5 à 7° Nord (Sultan et Janicot, 2003). A l'échelle annuelle, les positions les plus extrêmes de ces deux zones sont atteintes en Janvier et Juillet et illustrées sur la figure 1.5. Le mouvement de la ZCIT accompagné de celui des différentes masses d'air (l'Harmattan et le flux de mousson) implique de fortes variations climatiques saisonnières, en induisant la saison sèche et la saison humide. Les systèmes convectifs jouent un rôle prépondérant dans la redistribution et l'injection en haute troposphère de nombreux composés atmosphériques, et particulièrement des NOx, provenant des éclairs, sols et combustions de biomasse (Jacob et al., 1996). En altitude, 3 courants-jets (ou vents forts) sont notables au-dessus de l'Afrique de l'Ouest:

- le Jet d'Est Africain (JEA, situé autour de 14-16°N et vers 600 hPa), qui est la dépression thermique saharienne (Thorncroft et Blackburn, 1999),
- le Jet d'Est Tropical (JET, situé autour de 10°N et 200 hPa), associé à la mise en place de la mousson indienne,
- le Jet d'Ouest Subtropical (JOST, situé entre 25 et 30°N vers 200 hPa).



**Figure 1.5:** Position des centres d'action en Janvier et Juillet (Denison et al., 2005)

### I.3.2. Dispersion et transport des polluants dans l'atmosphère

En fonction de l'intensité des activités qui les génèrent, les polluants primaires comme les  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$  sont injectés dans l'atmosphère à différentes altitudes. L'existence de ces polluants dans l'atmosphère est rythmée par leur émission, leur dispersion et leur transport par le vent. La dispersion des polluants dans l'atmosphère s'effectue essentiellement dans la couche limite atmosphérique, couche la plus troublée, agitée sans cesse par des mouvements turbulents tant horizontaux que verticaux (Diaf et al., 2003). Cette dispersion est influencée par plusieurs paramètres (vent, l'ensoleillement, la température, le temps de résidence des polluants, la topologie locale, la pluie etc...) et se fait en plusieurs étapes successives qui sont l'ascension, la dispersion locale, la diffusion régionale et le transport sur de longues distances.

Pendant la phase d'ascension, le panache de polluants s'élève et sa trajectoire dépend :

- de sa température. Les effluents gazeux possèdent souvent une température nettement supérieure à la température ambiante. Cette énergie thermique entraîne une surélévation variable du panache, excepté dans le cas où la densité de l'effluent est nettement plus élevée que celle de l'air environnant ;
- de sa vitesse d'éjection (verticale)  $V_s$  qui peut atteindre 10 m/s ;
- de la vitesse horizontale  $u$  et de la direction du vent au voisinage de la source de pollution : plus le rapport  $V_s/u$  est grand, plus la surélévation est importante et le risque de pollution locale au voisinage de la source émettrice est considérablement réduit. Lorsque les polluants sont issus de sources diffuses (circulation automobile), généralement près du sol, leur vitesse d'éjection et leur température sont faibles. Cette première phase est alors très brève, voire inexistante et commence alors la diffusion.

La phase de diffusion débute lorsque le panache acquiert une densité sensiblement égale à celle de l'air ambiant. Le panache devient horizontal et n'a plus de mouvement propre. Sa diffusion dépend alors des conditions météorologiques et de la turbulence atmosphérique. Cette phase est influencée d'une part par la dynamique liée au relief, aux obstacles à la surface du sol et au cisaillement du vent. D'autre part, elle est influencée par les variations de la température de l'air avec l'altitude.

Progressivement, les polluants tendent à se répartir uniformément à l'intérieur d'un volume d'atmosphère appelé couche de mélange. Le panache perd alors ses paramètres d'émission. Les polluants sont transportés alors sur de longues distances, à plusieurs centaines,

voire plusieurs milliers de kilomètres des sources d'émission. Au cours de leur transport, certains polluants primaires voient leur composition chimique évoluer au travers de réactions photochimiques homogènes et hétérogènes. On parle alors de vieillissement chimique des polluants. Ces transformations photochimiques donnent naissance à d'autres espèces chimiques appelées polluants secondaires. La durée du séjour atmosphérique des polluants dépend donc de leur nature chimique et physique mais aussi des conditions météorologiques.

Quelques soit la durée de leur séjour dans l'atmosphère, les polluants finissent par disparaître par des mécanismes distincts. Leur élimination de l'atmosphère se fait par dépôt sur la surface du globe. Les deux principaux processus de dépôt atmosphérique sont présentés dans ce qui suit.

### **I.3.3. Dépôts atmosphériques (mécanismes naturels de dépollution)**

Deux principaux processus sont à l'origine de l'élimination des particules et gaz de l'atmosphère. Les polluants se déposent à la surface du globe soit par dépôt sec, soit par dépôt humide.

#### **I.3.3.1. Dépôt sec**

Les polluants atmosphériques peuvent se déposer sur les surfaces bâties, la végétation, les sols et les eaux de surface par des processus « secs », c'est-à-dire des processus qui ne dépendent pas de précipitations. Les mécanismes fondamentaux qui mènent à des dépôts secs des polluants sont la sédimentation, les impacts par inertie ou interception et la diffusion sur une surface. Les trois premiers mécanismes concernent seulement les particules alors que la diffusion concerne les polluants gazeux et particulaires. La diffusion d'un gaz ou d'une particule de l'atmosphère vers une surface est généralement décomposée en plusieurs étapes. Pour tous les polluants (gazeux et particulaires), on considère deux étapes qui correspondent, premièrement, au transfert de l'atmosphère vers la surface par la turbulence atmosphérique, et deuxièmement, au transfert du polluant dans une couche très fine en contact avec la surface. Cette couche est peu affectée par la turbulence atmosphérique et est donc considérée comme étant en régime quasi-laminaire.

### **I.3.3.2. Dépôt humide**

Le deuxième mécanisme de dépôt des polluants atmosphériques est le dépôt humide. Il peut être défini comme le transfert des polluants de l'atmosphère vers des surfaces sous l'effet des précipitations (pluie, neige, grêle, brouillard, etc...). Le transfert des polluants de l'atmosphère à la surface se fait selon deux phénomènes fondamentaux qui sont :

- la capture par les gouttes de pluie de polluants gazeux ou particulaires dans le nuage : « rainout » ;
- la capture par les gouttes de pluie de polluants gazeux ou particulaires lors de la précipitation sous le nuage : « washout ».

Si les nuages et les précipitations sont très efficaces pour lessiver les polluants de l'atmosphère, ce processus est limité dans l'espace et le temps et l'on peut que considérer globalement, que les intensités des dépôts secs et humides sont équivalentes.

## **I.4. Normes de suivi de la qualité de l'air**

Une norme de qualité de l'air est définie comme une prescription concernant la qualité de l'air. Elle est essentiellement définie en fonction de la quantité de polluants chimiques dans l'air, mais aussi d'autres paramètres physiques, comme la température, l'humidité ou la pression. En matière de qualité de l'air, les réglementations peuvent être distinguées au niveau mondial et national. L'ensemble de ces réglementations a pour principales finalités :

- l'évaluation de l'exposition de la population et de la végétation à la pollution atmosphérique ;
- l'évaluation des actions entreprises par les différentes autorités dans le but de limiter cette pollution ;
- l'information sur la qualité de l'air.

Afin de donner des repères à la communauté scientifique et aux décideurs, les lignes directrices de l'OMS sur la qualité de l'air en relation avec la santé ont été publiées en 2006. Ces lignes directrices fixent les seuils à ne pas dépasser pour chaque polluant majeur. La Côte d'Ivoire, soucieuse des enjeux que constitue la qualité de l'air dans les villes, s'est elle aussi dotée d'une législation à travers le décret N° 2017-125 du 22 Février 2017 relatif à la qualité de l'air. Ce décret résulte de la volonté du gouvernement ivoirien de lutter contre la dégradation continue de l'air, liée à l'accroissement du parc automobile et au développement des activités industrielles. Il fixe, d'une part, les valeurs limites des paramètres de la qualité de l'air ambiant

et celles des gaz et particules émis par les véhicules automobiles et motocyclettes et définit, d'autre part, les procédures de contrôle de la qualité de l'air ainsi que les sanctions prévues à cet effet. La Côte d'Ivoire entend ainsi prévenir les risques environnementaux et lutter contre la pollution de l'air et l'une de ses conséquences, qui est la recrudescence des maladies respiratoires. Près de 16 ans auparavant, le Bénin avait lui aussi pris le décret N° 2001-110 du Avril 2001 fixant les normes de la qualité de l'air en application du décret 98-030 du 12 Février 1998 portant loi-cadre de l'environnement en république du Bénin.

Les lignes directrices de l'OMS et les législations nationales définissent différents seuils et valeurs limites pour chaque polluant en fonction des objectifs recherchés. Quelques définitions sont aussi apportées pour faciliter la compréhension des termes utilisés dans les dites législations. Dans ce qui suit un rappel de quelques termes importants sera fait, suivi des principales normes sur les polluants emblématiques.

#### **I.4.1. Quelques définitions relatives à la qualité de l'air**

##### **- Polluants de l'air :**

Les polluants de l'air sont des substances qui, une fois émises dans l'air libre, produisent des effets nocifs sur la santé de l'homme et sur l'environnement.

##### **- PM2.5 :**

Ce sont des particules en suspension dans l'atmosphère passant dans un orifice d'entrée calibré, avec un rendement de séparation de 50 % pour un diamètre aérodynamique maximum de 2,5 µm.

##### **- PM10 :**

Ce sont des particules en suspension dans l'atmosphère passant dans un orifice d'entrée calibré, avec un rendement de séparation de 50 % pour un diamètre aérodynamique maximum de 10 µm.

##### **- Objectifs de qualité :**

C'est le niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère à atteindre dans une période donnée, fixée sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine et/ou pour l'environnement.

**- Seuil d'alerte :**

C'est le niveau de concentration de substances polluantes dans l'air au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou la dégradation de l'environnement.

**- Seuil d'information et de recommandation :**

C'est le niveau de concentration des substances polluantes au-delà duquel une exposition à court terme présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaires l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.

**- Valeur cible :**

C'est le niveau de concentration à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble.

**- Valeur limite :**

C'est le niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement.

#### **I.4.2. Normes des principaux polluants particuliers et gazeux relatifs à la qualité de l'air**

Des normes correspondant aux objectifs de qualité l'air ont été définis par les lignes directrices de l'OMS en 2005. Ces normes concernent un certain nombre de polluants particuliers et gazeux dont les effets sur la santé sont avérés. Les lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air sont destinées à être utilisées partout dans le monde. Elles ont été élaborées pour soutenir les actions menées en vue d'atteindre une qualité de l'air permettant de protéger la santé publique dans différents contextes. Des normes relatives à la qualité de l'air sont aussi fixées par chaque pays, afin de protéger la santé publique de ses citoyens, et en tant que telles constituent un élément important de la gestion des risques et des politiques environnementales nationales.

Les normes nationales varieront en fonction de la stratégie adoptée pour parvenir à un équilibre entre les risques sanitaires, la faisabilité technologique, des considérations économiques et divers autres facteurs politiques et sociaux qui, à leur tour, vont dépendre, entre autres choses, du degré de développement et de la capacité nationale en matière de gestion de la qualité de

l'air (WHO, 2006). C'est le cas en Côte d'Ivoire et au Bénin où des normes relatives à la qualité de l'air ont été prises en fonction des réalités locales. Le tableau I.2 présente les normes de certains polluants identifiés par les lignes directrices de l'OMS en comparaison avec les législations nationales adoptées en Côte d'Ivoire et au Bénin.

**Tableau I.2:** Quelques normes sur la qualité de l'air ambiant selon les lignes directrices de l'OMS et les décrets sur la qualité de l'air en Côte d'Ivoire et au Bénin.

Type de polluants	Polluants	OMS (2005)	Côte d'Ivoire (2017)	Bénin (2001)
Particules grossières et fines	PM10	50 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 24 \text{ h}$ 20 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	20 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	230 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 24 \text{ h}$ 50 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$
	PM2.5	25 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 24 \text{ h}$ 10 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	10 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	-
Polluants gazeux	NO <sub>2</sub>	200 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{h}$ 40 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	40 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	150 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 24 \text{ h}$ 100 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$
	SO <sub>2</sub>	500 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 10 \text{ min}$ 20 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 24 \text{ h}$	20 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$	1300 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{h}$ 200 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 24 \text{ h}$ 80 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / \text{an}$
	O <sub>3</sub>	100 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 08 \text{ h} / 24 \text{ h}$	120 $\mu\text{g} / \text{m}^3 / 08 \text{ h} / 24 \text{ h}$	0,08 ppm / 08 h

**Chapitre II :**  
**Protocole expérimental de collecte et d'analyse  
des échantillons**

## **II.1. Présentation des zones d'étude**

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse s'est principalement focalisée sur 2 villes d'Afrique de l'Ouest. Il s'agit notamment de la ville d'Abidjan, capitale de la Côte d'Ivoire, et de la ville de Cotonou capitale du Bénin. L'objet de cette section est de donner quelques caractéristiques géographiques, socio-économiques et météorologiques de chacune de ces villes. Les sites moyen-terme représentatifs des principales sources de pollution en Afrique de l'Ouest et identifiés dans le cadre du programme DACCIWA seront aussi présentés. Les sites trafic de Yaoundé et de Bamako pour lesquels des mesures ont été réalisées dans le cadre du programme POLCA (POLlution de l'air des Capitales Africaines) et dont les résultats seront plus tard comparés à ceux de DACCIWA sont aussi présentés dans cette section.

### **II.1.1. Ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire)**

#### **II.1.1.1. Situation géographique et socio-économique d'Abidjan**

Ville cosmopolite de l'Afrique subsaharienne, Abidjan est la capitale économique de la Côte d'Ivoire. Située dans le sud du pays au bord du golfe de Guinée et à une altitude de 18 m, le district d'Abidjan est compris entre les latitudes 5°00' et 5°30' Nord et entre les longitudes 3°50' et 4°10' Ouest (Olahan, 2010). Son rayonnement économique rapide a favorisé un fort exode rural des populations ivoiriennes et a attiré un grand nombre de populations étrangères venant principalement de la sous-région ouest-africaine (Dongo et al., 2009; Zoro, 2001). Les différents courants migratoires internes ont déplacé vers Abidjan plus de 29 499 citoyens entre 1997 et 1998 (Zanou, 2001). Sa population est estimée aujourd'hui selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 2014 à plus de 4 707 404 habitants soit 20,8 % de la population totale de la Côte d'Ivoire (INS, 2015). Cette démographie galopante entraîne un accroissement de sa superficie vers les banlieues (Bingerville, Songon, Bassam et Anyama). En effet l'ex ville d'Abidjan d'une superficie de 422 km<sup>2</sup> avec une densité de 16 075,6 habitants au km<sup>2</sup> a été érigée en District Autonome par la loi N° 2001 - 478 du 09 Août 2001, faisant passer ainsi sa superficie à 2119 km<sup>2</sup>. L'agglomération abidjanaise s'étend désormais sur un périmètre de 53 km sur 40 km soit 0.6 % du territoire national. Les limites territoriales du District d'Abidjan se confondent avec le département d'Abidjan. La population abidjanaise se répartie donc sur 10 communes et 3 sous-préfectures que sont Abobo, Adjamé, Anyama, Attécoubé, Bingerville, Cocody, Koumassi, Marcory, Plateau, Port-Bouët, Treichville, Songon et Yopougon. Le nouveau schéma directeur d'urbanisme du District appelé le « Grand

Abidjan » prévoit son extension à 6 autres communes périphériques (Grand-Bassam, Bonoua, Alépé, Azaguié, Dabou et Jacqueville). Le District passera alors de 13 à 19 communes à l'horizon 2030 avec une population estimée à 8 414 000 habitants.

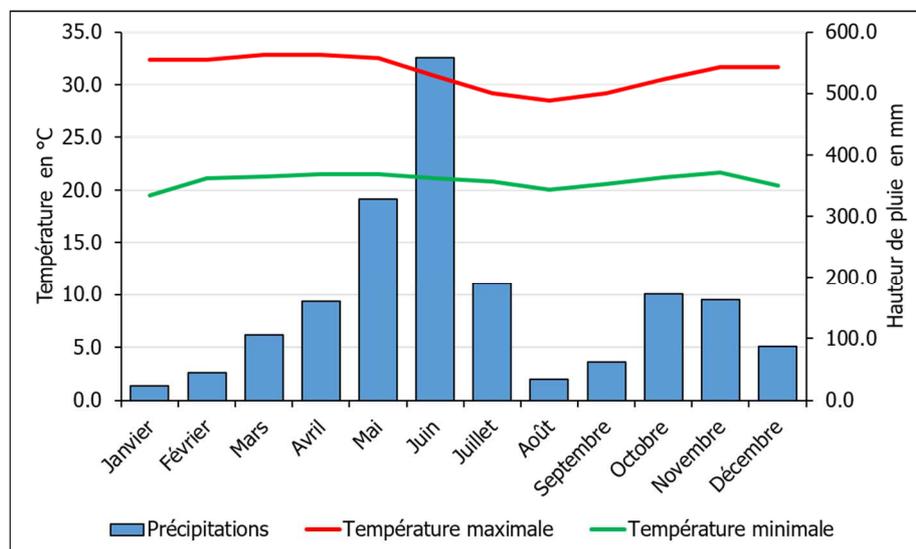
Véritable poumon économique de la Côte d'Ivoire, Abidjan abrite le premier port de marchandises en Afrique de l'ouest avec plus de 20 millions de tonnes et le deuxième en Afrique après celui de Durban. Ce port situé dans la commune de Treichville est la principale porte sur l'océan des pays de l'hinterland qui sont le Mali, le Burkina Faso, le Niger. Le port assure plus de 70 % des échanges extérieurs de ces pays. Cette position stratégique du port entraîne une forte circulation automobile et ferroviaire entre Abidjan et les autres capitales. 65 % des unités industrielles du pays exercent sur la zone portuaire d'Abidjan. L'activité économique sans cesse croissante de la ville et les nombreuses demandes d'installation d'entreprises ont obligé les autorités en 2014 à entamer des travaux d'aménagement, de modernisation et d'agrandissement de la zone industrielle de Yopougon et la création de nouvelles zones industrielles telle que la zone industrielle PK24. Abidjan compte maintenant quatre principales zones industrielles couvrant une superficie totale de 1825 ha. La plus importante est celle du PK24 (940 ha), suivi des zones industrielles de Yopougon (645 ha), de Vridi dans la commune de Port-Bouët (120 ha) et de Koumassi (120 ha) (ICI, 2014). La plupart des industries installées dans ces zones sont spécialisées dans les secteurs secondaires et tertiaires. Cette forte industrialisation au sud comme au nord de la ville entraîne une forte circulation des populations. Les besoins en transport se sont accrus ces dernières années avec le développement des moyens de transport en commun et l'autorisation d'importation de véhicules usagés dits France-au revoir depuis 1996. En 2016, 77975 nouvelles immatriculations de véhicules ont été enregistrées par le guichet de l'automobile représentant une croissance de 29 % par rapport à l'année 2015. Selon la Société Ivoirienne de Contrôle Techniques Automobiles et Industriels (SICTA), ce sont 482 870 véhicules qui ont été contrôlés et jugés aptes à circuler en 2014. Les ménages Abidjanais utilisent le charbon de bois (47 %), le bois (35 %) et le gaz naturel comme source d'énergie pour la cuisson (UNDP, 2015).

#### **II.1.1.2. Situation climatique et météorologique de la ville d'Abidjan**

Le profil climatique saisonnier dans le Golfe de Guinée est lié aux migrations du front intertropical FIT dont le passage le long des côtes Ouest Africaines provoque l'alternance des saisons sèches et humides (Longhurst, 1962; Morlière et Rebert, 1972). Le climat à Abidjan est de type équatorial marqué par 4 saisons subdivisées dans le cycle annuel comme suit :

- la grande saison sèche de Décembre à Mars ;
- la grande saison de pluies d'Avril à Juillet ;
- la petite saison sèche d'Août à Septembre ;
- la petite saison des pluies d'Octobre à Novembre (Ernest et al., 2005; Konate et al., 2016).

La pluviométrie moyenne annuelle à la station météorologique de l'aéroport d'Abidjan définie sur la période 1937-2000 est de 1920 mm (Soro et al., 2006). Les moyennes mensuelles présentées à la figure 2.1 montrent la présence de maxima et de minima d'amplitude inégale. En moyenne l'année type présente une structure bimodale. Le maximum principal est obtenu au mois de Juin avec 600 mm de pluies alors que le maximum secondaire centré sur les mois d'Octobre à Novembre n'excède pas 200 mm. Les minima sont obtenus en Janvier et en Août avec une pluviométrie n'atteignant pas 40 mm (Colin et al., 1993).



**Figure 2.1:** Diagramme ombrothermique de la ville d'Abidjan sur la période de 1937 à 2000 (Colin et al., 1993).

### II.1.1.3. Localisation et caractéristiques des sites de mesures DACCIWA d'Abidjan

Lors de cette étude, plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées à Abidjan dans le cadre du programme DACCIWA. Il s'agit, d'une part, d'une campagne de mesures à moyen-terme d'une durée de 28 mois (Décembre 2014-Avril 2017) sur 3 sites représentatifs des principales sources de pollution en Afrique de l'Ouest que sont les feux domestiques, les feux de décharge et le trafic routier et, d'autre part, de campagnes intensives menées sur 27 sites au total à Abidjan pendant la grande saison sèche. Dans ce qui suit, les caractéristiques des sites de mesure à moyen-terme identifiés dans le cadre du programme DACCIWA seront données.

- *Site feux domestiques d'Abidjan*

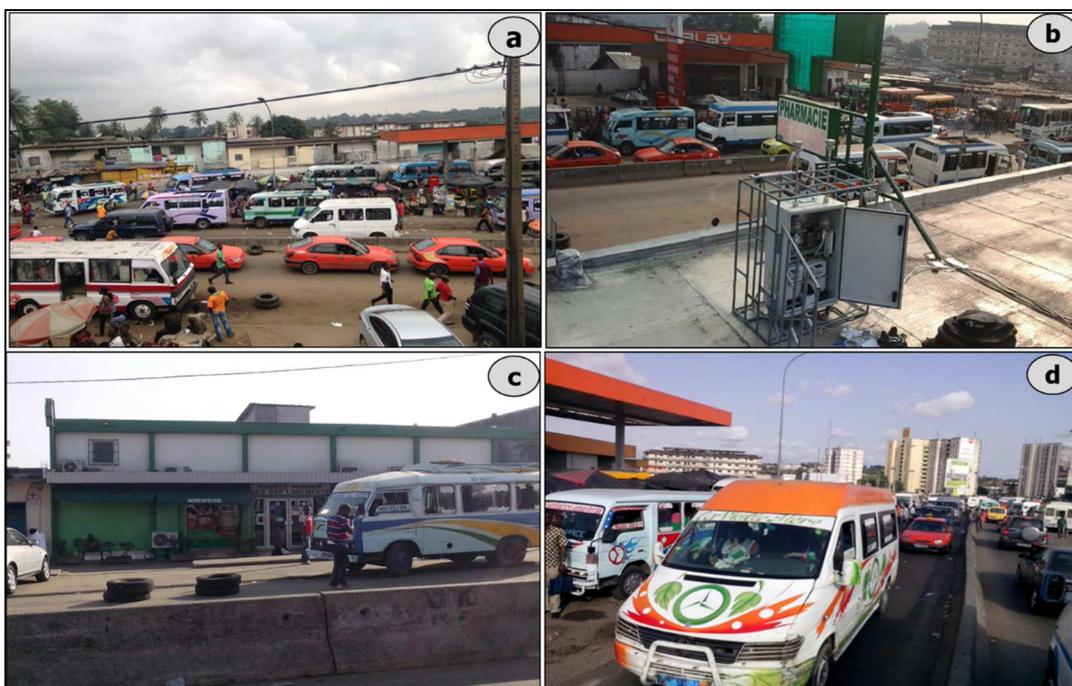
Le site feux domestique d'Abidjan est situé dans la commune de Yopougon à la latitude 5°19'44''N et à la longitude 4°06'21''W. Il est localisé dans le marché de Bracodi à Niangon à droite à l'intersection de 2 grandes voies de circulation du carrefour Lubafrique. Ce site est caractérisé par différentes activités de fumage de denrées alimentaires (poissons, viandes) et de grillage d'arachides. La figure 2.2 présente des photos du site en pleine activité et en fin d'activité. Ces activités sont principalement organisées et réalisées par des femmes. Le combustible utilisé est essentiellement le bois de chauffe. Ce bois est issu des vieilles plantations d'hévéa. L'activité de fumage est pratiquée en continue tous les jours de la semaine et atteint des pics aux premières heures de la journée car les produits fumés sont aussitôt revendus sur le marché. Cependant, les foyers restent allumés pour répondre à d'autres commandes éventuelles dans la journée ou pour alimenter de plus petits marchés. Le marché de Bracodi est représentatif des principaux marchés de la commune de Yopougon qui en compte 46 selon l'Union Nationale des Marchés de Côte d'Ivoire (UNAMACI). Outre les polluants issus des feux domestiques, ce site est aussi impacté par les polluants issus du trafic routier compte tenu de sa proximité avec les voies de circulation du grand carrefour Lubafrique.



**Figure 2.2:** Activités utilisant le bois de chauffe sur le site feux domestiques de Yopougon : a) fumage de poissons, b) grillage d'arachides, c) une vue des équipements installés, d) une vue des foyers de fumage.

- *Site trafic d'Abidjan*

Le site trafic d'Abidjan, choisi pour cette étude, est situé dans la commune d'Adjamé non loin du carrefour Liberté à la latitude 5°21'14''N et à la longitude 4°01'04''W. Les appareils de mesures ont été placés sur le toit de la pharmacie des 220 logements et en face de la gare des véhicules de transport appelés communément « Gbakas ». Ce site se caractérise par le trafic routier qui y est particulièrement intense à tout moment de la journée avec de nombreux embouteillages. Les véhicules qui empruntent ce tronçon de voie sont principalement des gbakas, des cars, des taxis et des camions. Ces véhicules sont généralement vétustes. La figure 2.3 présente quelques photos pour illustrer le trafic à Adjamé liberté.



**Figure 2.3:** Site trafic d'Adjamé Liberté (Abidjan) a) une vue du trafic constitué de taxis compteurs, gbaka et de véhicules personnels, b) coffret de mesures d'aérosols sur le toit de la pharmacie des 220 logements, c) vue de face de la pharmacie des 220 logements, d) gbaka dans un embouteillage.

- *Site feux de décharge d'Abidjan*

Le site feux de décharge d'Abidjan est situé dans la commune de Cocody à proximité du village d'Akouédo. Il est situé à une latitude de 5°21'12''N et une longitude de 3°56'16''W. Créée en 1965 sur une superficie de 153 ha, la décharge d'Akouédo est l'unique décharge de la ville d'Abidjan. Elle reçoit aujourd'hui environ 1 000 000 tonnes d'ordures par an (Adjiri et al., 2015). C'est une décharge « sauvage » car il n'y existe pratiquement aucune réglementation

pour le traitement des ordures. Cette décharge à ciel ouvert reçoit des déchets aussi bien industriels, ménagers, hospitaliers que des déchets dangereux et toxiques. L'accumulation des ordures et leur décomposition est la source de production de biogaz, tel que le méthane, qui peut s'enflammer. Le méthane produit est très souvent à l'origine de la combustion des déchets sur le site de la décharge. Le feu est également mis par les gestionnaires de la décharge pour détruire certains déchets végétaux et industriels bien que la législation l'interdise. La figure 2.4 présente quelques photos pour illustrer l'amoncellement des ordures à la décharge d'Akouedo, la combustion à ciel ouvert des déchets et les travailleurs sur la décharge.



**Figure 2.4:** Site feux de décharge (décharge d'Akouédo) : a) amoncellement d'immondices, b) fouilleurs d'ordures, c) combustion de biomasse d) déchets plastiques.

## II.1.2. Ville de Cotonou (Bénin)

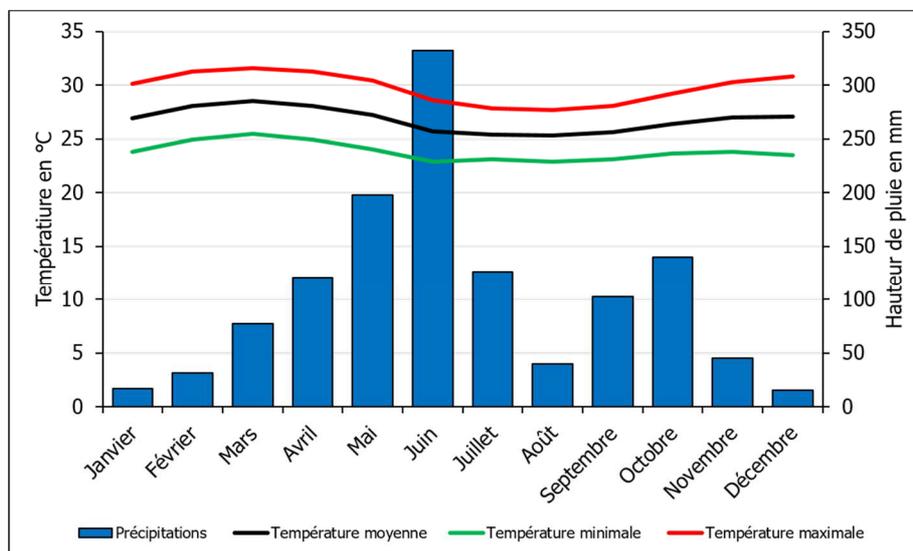
### II.1.2.1. Situation géographique et socio-économique de Cotonou

Cotonou est la capitale économique du Bénin. Avec une superficie de 79 km<sup>2</sup> c'est la plus grande ville du pays. Elle est située au bord de l'océan atlantique dans le département du Littoral à 6°21'45" de latitude Nord, 2°25'32" de longitude Est et à une altitude de 10 m. La ville est divisée en 2 parties par la lagune de Cotonou qui est enjambée par 3 ponts. La ville de Cotonou est subdivisée en 13 arrondissements. Selon le quatrième recensement général de la population et de l'habitat (RGPH-4) sa population en 2013 est estimée à 679 012 habitants avec une projection de 783 901 en 2018. Le taux de croissance en 2013 est de 2,09 %. Il est en léger

recul par rapport au taux d'accroissement moyen obtenu sur la décennie 1992-2002 (2,17 %). Cette situation s'explique par la saturation démographique de la ville avec une densité de 8595 habitants au km<sup>2</sup>, les problèmes environnementaux tels que les pollutions atmosphérique, sonore et des sols, la cherté du coût de la vie contraignant ainsi les populations à se retirer vers les communes avoisinantes telles que Abomey-Calavi, Ouidah et Sèmè-Kpodji (INSAE, 2015).

### II.1.2.2. Situation climatique et météorologique

La figure 2.5 présente les valeurs moyennes mensuelles de la pluviométrie et de la température à Cotonou sur la période 1987-2016. Cotonou a un climat de type tropical humide à 4 saisons avec une alternance de 2 saisons pluvieuses (Avril à Juin et Septembre à Novembre) et de deux saisons sèches (Décembre à Mars et Juillet à Août) (Djossou, 2017; Fousséni, 2017). La pluviométrie annuelle moyenne est plus faible à Cotonou par rapport à celle d'Abidjan avec 1244 mm de pluie. Les précipitations varient de 317 mm entre le mois de Juin où le maximum de précipitation est enregistré et le mois de Décembre qui est le mois le plus sec (<https://fr.climate-data.org/location/714874/>). La température moyenne annuelle est 26,8 °C. L'écart de température entre le mois le plus chaud (Mars) avec une température de 28,5 °C et le mois le moins chaud (Août) avec une température moyenne de 25,3 °C est faible (3,2 °C).

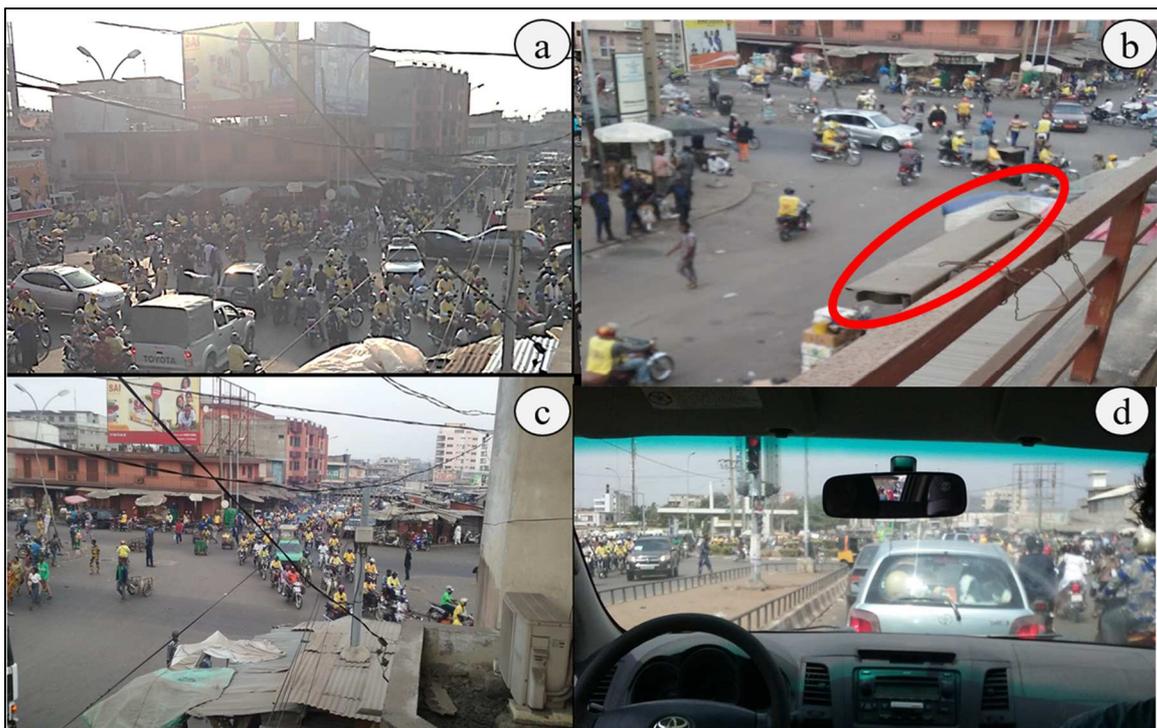


**Figure 2.5:** Diagramme ombrothermique à Cotonou sur la période 1987-2016.

### II.1.2.3. Localisation et caractéristiques du site de mesures DACCIWA de Cotonou

Le site DACCIWA du Bénin est un site urbain de Cotonou situé dans le centre-ville au cœur du plus grand marché à ciel ouvert d'Afrique de l'Ouest (Dantokpa). On observe un trafic

dense de véhicules, surtout de véhicules à deux roues comme le montre la figure 2.6 qui présente la circulation des véhicules dans les environs du site. Cette zone est donc représentative de la pollution urbaine au Bénin. Le site de mesures des gaz de pollution est situé sur un balcon (d'une hauteur de 5m) du bâtiment principal de la SOGEMA (Société de Gestion des Marchés Autonomes). Sur ce site, nous étudions la source trafic constituée principalement des engins à deux roues tels que les taxis-motos communément appelés « Zémidjan » ou « Zem ». Notons qu'en 2005 le trafic était dominé par des motocyclettes à deux temps qui rejettent de grandes quantités de gaz à effet de serre et de polluants. En 2007, l'Agence Française de Développement (AFD) a encouragé la mise en œuvre d'un programme novateur, permettant de remplacer les motocyclettes à deux temps, extrêmement polluantes, par des motocyclettes à quatre temps qui rejettent moins de gaz à effet de serre et sont beaucoup moins polluantes. On a donc observé un trafic dominé par les deux roues à quatre temps sur la période d'étude. La figure 2.6 présente des photos du site du carrefour du marché Dantokpa à différentes heures de la journée.



**Figure 2.6:** Site trafic du Carrefour du Marché Dantokpa (Cotonou) à différentes heures de la journée. a) Embouteillage de « zémidjan » à midi b) Capteurs passifs montés sur un rail au balcon de la SOGEMA c) Vue du carrefour à 10 heures d) Voie principale menant au carrefour du marché Dantokpa.

### II.1.3. Ville de Bamako (Mali)

Bamako (12°39' N, 8°04' W), capitale du Mali, est situé à une altitude de 380 m au Sud-Ouest du pays. Sa superficie est de 267 km<sup>2</sup>. Sa population est estimée à 1,3 millions d'habitants

en 2018. Le climat de Bamako est sahélien, avec deux saisons bien marquées. La saison des pluies commence en Mai, atteint son maximum en Août et se termine en Octobre. La saison sèche dure de Novembre à Avril. Le climat de Bamako est parfois sous l'influence des épisodes de poussière saharienne. La pluviométrie annuelle moyenne est de 1067 mm pour la période 2008-2009. Le site de mesures des concentrations des polluants gazeux a été installé au centre-ville sur un balcon de l'immeuble Nimaga. Ce site est situé à un carrefour et près d'un grand marché. Il est largement influencé par les feux domestiques et par le trafic routier constitué en majorité d'engins à deux roues et de véhicules poids lourds (Adon et al., 2016; Doumbia et al., 2012). Nous utiliserons dans le cadre de cette étude les données collectées de Septembre 2013 à Mars 2017.

#### **II.1.4. Ville de Yaoundé (Cameroun)**

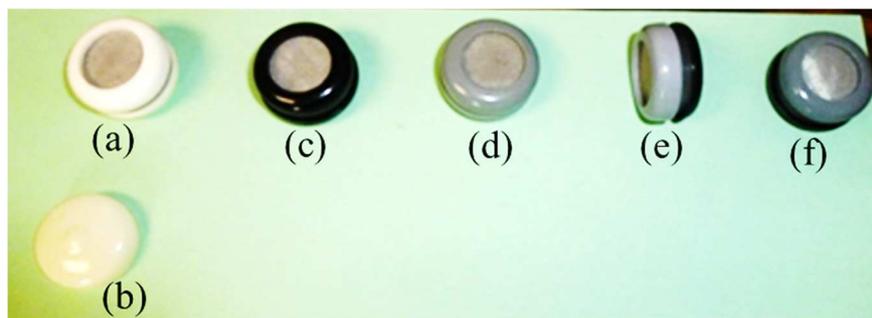
La ville de Yaoundé (3,52° N, 11,31° E, altitude 750 m) est la capitale politique du Cameroun. Elle couvre une superficie de 180 km<sup>2</sup> pour une population qui est passée de 1,8 millions d'habitants en 2006 (DSU, 2006) à 2,8 millions d'habitants en 2015 (<https://www.populationdata.net/pays/cameroun/>). Cet accroissement de la population s'est fait simultanément avec celui du parc automobile qui serait passé de 152 000 véhicules en 2006 à 216 000 en 2015 selon une estimation faite par Matcheubou et al. (2009). Ce parc automobile est constitué de véhicules de tourisme (véhicules de particuliers et taxis), de bus, de cars et autocars, de camions et camionnettes, de remorques et semi-remorques et de motocyclettes. Si les motocyclettes sont en général achetées neuves, il n'en n'est pas de même des véhicules 4 roues qui sont pour la plupart de « seconde main ». En effet, d'après le ministère camerounais chargé du transport, en 2015, 92 % du parc automobile camerounais était constitué de véhicules acquis en seconde main avec un âge supérieur à 15 ans (<http://www.investiraucameroun.com/transport/1706-6454-92-du-parc-automobile-camerounais-est-constitue-de-vehicules-acquis-en-seconde-main>). Le trafic automobile est dense dans la ville de Yaoundé, surtout aux heures de pointe, créant des embouteillages. Ces derniers allongent le temps de déplacement, favorisant ainsi une consommation accrue d'énergie et conduisant à des rejets importants des gaz d'échappement. Il est à noter que les véhicules à Yaoundé utilisent les combustibles fossiles à savoir l'essence et le gasoil comme source d'énergie. Les instruments de mesures des concentrations des gaz ont été installés sur un site au centre-ville. Ce site est situé à proximité d'un carrefour et est fortement influencé par le trafic sur voies de circulations avoisinantes. Nous utiliserons dans le cadre de cette étude les données collectées à Yaoundé d'Octobre 2013 à Janvier 2017.

## II.2. Protocole d'échantillonnage et d'analyse des échantillons de gaz

Dans ce travail de thèse, nous avons effectué 4 séjours au laboratoire d'Aérologie de Toulouse et cela nous a permis de contribuer directement à tout le processus de mise en œuvre des mesures de gaz par capteurs passifs : de la préparation et du montage des capteurs à leur expédition vers les sites de mesures, à la collecte des échantillons de gaz sur le terrain et à leur analyse au Laboratoire d'Aérologie de Toulouse (LA). Cette section décrit les étapes techniques essentielles qui permettent de mettre en œuvre la mesure de gaz par les capteurs passifs.

### II.2.1. Présentation des capteurs passifs INDAAF

Les capteurs passifs utilisés dans le cadre de cette étude ont été élaborés par le Laboratoire d'Aérologie de Toulouse dans le cadre du projet INDAAF (International Network of Deposition and Atmospheric chemistry in Africa <http://indaaf.obs-mip.fr>) en suivant les procédures du réseau IGAC/DEBITS (International Global Atmospheric Chemistry/ DEposition of BIogeochemically Trace Species). Ces capteurs ont été largement décrits par les études réalisées dans le cadre du projet INDAAF (Adon et al., 2010). Ils sont utilisés depuis 1995 sur les sites ruraux du réseau INDAAF en Afrique pour mesurer les niveaux de concentration de certains polluants gazeux tels que le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ), l'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ). Ainsi quatre couleurs de capteurs sont utilisés en fonction du gaz étudié. Les capteurs blancs pour  $\text{NH}_3$ , noirs pour  $\text{HNO}_3$  et  $\text{SO}_2$ , gris pour  $\text{NO}_2$  et les capteurs gris-noirs pour  $\text{O}_3$ . La figure 2.7 présente une photo des différents capteurs passifs utilisés.



**Figure 2.7:** Différents capteurs passifs de gaz INDAAF : (a) et (b)  $\text{NH}_3$ , (c)  $\text{HNO}_3$  et  $\text{SO}_2$ , (d)  $\text{NO}_2$ , (e) et (f)  $\text{O}_3$ .

Les capteurs INDAAF ont été développés à partir des travaux de Ferm (1991 ; 1994) et ont été validés par les travaux de Adon et al. (2010 ; 2013). Les résultats de la validation sont

contenus dans le rapport WMO GAW n°829. Les capteurs passifs fonctionnent sur la base des deux principes suivants:

- le principe physique de la diffusion moléculaire des gaz ;
- le principe des réactions chimiques entre les molécules du gaz étudié et celles de la substance dont le filtre en cellulose est imprégné.

En effet, le gaz étudié dont la concentration moyenne est supposée plus élevée dans l'air environnant pénètre passivement à l'intérieur du capteur par diffusion moléculaire. Le gaz y est piégé sur un filtre en cellulose imprégné d'une solution spécifique à chaque gaz.

Les réactions chimiques entre les molécules du gaz étudié et les solutions pièges sont résumées dans le tableau II.1.

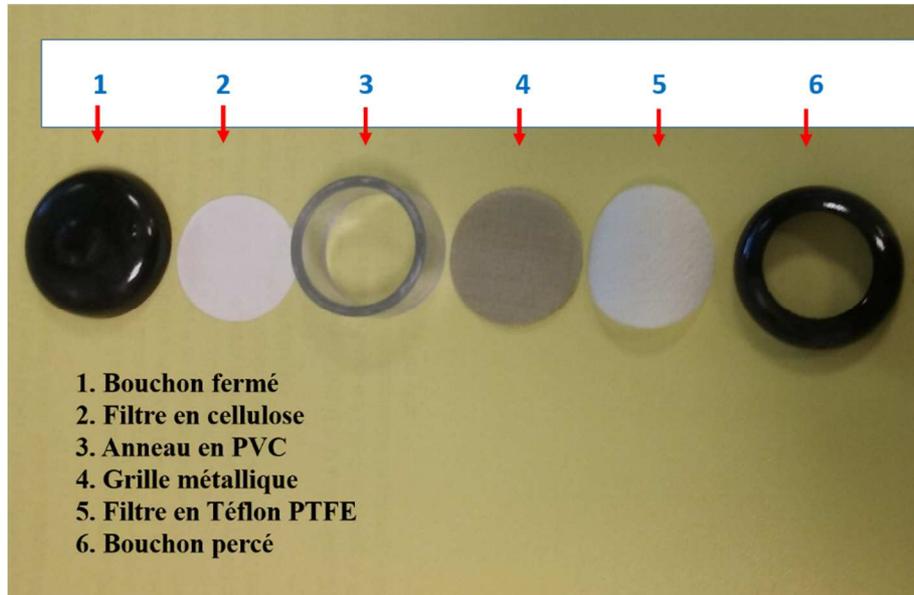
**Tableau II.1:** Réactions chimiques entre les gaz étudiés et les solutions imprégnées sur les filtres. Adapté d'Al-Ourabi (2002).

<b>Gaz étudié (couleur du capteur)</b>	<b>Réactions chimiques sur le filtre</b>
HNO <sub>3</sub> et SO <sub>2</sub> ( <i>Noir</i> )	$\text{HNO}_3(\text{g}) + \text{OH}^- \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$ $2\text{SO}_2(\text{g}) + 4\text{OH}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_4^{2-}$
NO <sub>2</sub> ( <i>Gris</i> )	$2\text{NO}_2(\text{g}) + 3\text{I}^- \rightarrow 2\text{NO}_2^- + \text{I}_3^-$
NH <sub>3</sub> ( <i>Blanc</i> )	$\text{NH}_3(\text{g}) + \text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+$
O <sub>3</sub> ( <i>Gris-Noir</i> )	$\text{O}_3(\text{g}) + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{O}_2$

Le capteur passif INDAAF est constitué de 6 parties : un bouchon fermé et un bouchon percé, un filtre en cellulose de 21 mm de diamètre imprégné de la solution piège, un anneau en Polychlorure de vinyle (PVC), un filtre Téflon PTFE de 25 mm de diamètre et 1µm de diamètre de pores et une grille en acier inoxydable. Le filtre PTFE est placé à l'entrée du capteur pour minimiser la diffusion turbulente interne et l'entrée des particules. Cette membrane est protégée contre les dommages mécaniques par une grille en acier inox. La figure 2.8 présente les 6 éléments du capteur passif INDAAF.

Les travaux de Adon et al. (2010) ont permis de déterminer la limite de détection de chaque type de capteur passifs INDAAF sur la base de blancs de terrain envoyés sur les sites de l'Afrique de l'Ouest et Centrale pour l'ensemble de la période de mesure (1998-2007). Les résultats ont montré que les capteurs passifs INDAAF ont une limite de détection de 0,07 ± 0,03 ppb pour HNO<sub>3</sub>, 0,2 ± 0,1 ppb pour NO<sub>2</sub>, 0,7 ± 0,2 ppb pour NH<sub>3</sub>, 0,05 ± 0,03 ppb pour SO<sub>2</sub> et

0,1 ± 0,1 ppb pour l'O<sub>3</sub>. La reproductibilité de la mesure déterminée par le calcul de la covariance des duplicatas a permis d'estimer la précision de chaque capteur à : 20 %, 9,8 %, 14,3 %, 16,6 % et 10 % respectivement pour HNO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>.



**Figure 2.8:** Différentes parties d'un capteur passif de gaz INDAAF.

## II.2.2. Préparation, montage et expédition des capteurs passifs INDAAF

Certains de ces éléments des capteurs passifs sont réutilisables. Il s'agit des bouchons fermés et percés, de l'anneau en PVC et des grilles métalliques. Pour les utiliser à nouveau, ces éléments doivent être lavés en suivant la même procédure pour tous lors de l'étape de préparation. Ils sont ensuite montés et expédiés. Dans ce qui suit, sont décrites les principales étapes qui interviennent lors de la fabrication et le montage des capteurs.

### II.2.2.1. Préparation des capteurs

- *Lavage des parties réutilisables.*

Les bouchons plastiques percés et non percés, les grilles et les anneaux en PVC sont lavés séparément en suivant la même procédure. Tous ces éléments sont lavés avec de l'eau ultra pure de résistivité  $\rho = 18,2 \Omega \cdot \text{cm}$  obtenue à l'aide du système de génération d'eau ELGA (figure 2.9).

Les éléments à laver sont d'abord placés dans un cristalliseur ou un grand b cher. On y ajoute ensuite de l'eau pure de sorte à ce que les éléments à laver soient totalement immergés. On rince à deux reprises les éléments pour éliminer les grains de poussiere et les traces visibles. L'eau de rinçage est renversée et chang e par de l'eau ultra pure à nouveau. Le cristalliseur ainsi rempli est placé dans un bain à ultrasons chauffant muni d'un programmeur pendant 10 min (figure 2.10). L'opération est répétée deux fois.



**Figure 2.9:** Système de purification d'eau ELGA utilisé au Laboratoire de chimie du Labotroire d'Aérologie



**Figure 2.10:** Bain à ultrasons thermostaté Fisher Scientific.

- ***Séchage des éléments lavés***

Le séchage des éléments se fait sous la sorbonne (hotte à flux laminaire) (figure 2.11). Les éléments lavés séparément sont laissés à sécher sous la hotte pendant environ 2 heures sous une vitesse d'aspiration de  $1,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tous les éléments propres et secs sont ensuite conservés dans des boîtes en plastique.



**Figure 2.11:** Hotte à flux laminaire IBERIS utilisée pour le séchage des éléments lavés.

- ***Préparation des filtres cellulose : découpe, lavage et séchage***

Les filtres en cellulose WHATMAN « ashless » ont un diamètre de 90 mm à l'origine. On découpe à l'emporte-pièce des filtres de 21 mm de diamètre. On peut en général découper 6 à 7 filtres de 21mm de diamètre pour un filtre de 90 mm. Après la découpe, ces filtres sont lavés en suivant une procédure identique à celle des éléments réutilisables des capteurs passifs cités plus haut. Après les deux lavages de 10 min à l'eau ultra pure, les filtres vont subir un troisième bain aux ultrasons de 10 min avec du méthanol. Le port du gant est obligatoire pour cette dernière opération.

Une fois lavés, les filtres propres sont placés sur des plateaux inox et séchés sous la hotte pendant 2 heures en moyenne pour laisser le méthanol s'évaporer. Après ce premier séchage, les plateaux sont mis à sécher pendant 24 heures dans une étuve préalablement chauffée à  $30^{\circ}\text{C}$ .

L'étuve utilisée est présentée à la figure 2.12. Tous les filtres propres et secs sont mis dans des boîtes sur lesquelles la date de préparation est marquée (figure 2.13).



**Figure 2.12:** Etuve de marque Memmert utilisée pour le séchage des filtres



**Figure 2.13:** Boîtes de filtres propres référencés par date.

- ***Préparation des solutions d'imprégnation***

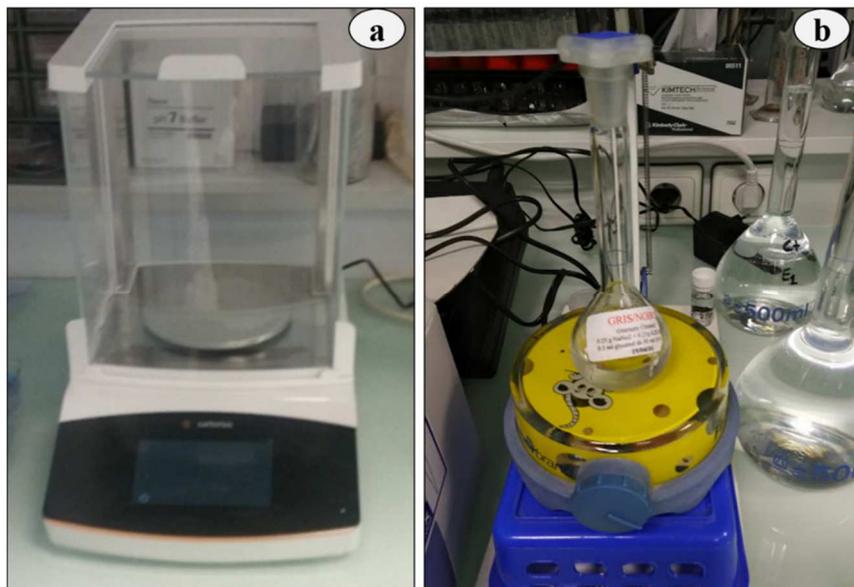
Pour chacune des espèces chimiques mesurées une solution piège est préparée. Les solutions sont préparées juste avant les expéditions et conservées au réfrigérateur jusqu'au prochain envoi. De préférence, on utilise toujours la même fiole pour une solution donnée. Un volume de solution est mis sur chacun des filtres. Ce volume est prélevé à l'aide de micropipettes présentées à la figure 2.14.



**Figure 2.14:** Micropipettes Eppendorf (5000  $\mu\text{L}$  et 10 mL) utilisées pour le prélèvement des volumes de solution.

- Les capteurs blancs d'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ )

Le filtre contenu dans le capteur de  $\text{NH}_3$  est imprégné de 50  $\mu\text{L}$  d'une solution d'acide citrique. La solution d'acide citrique est préparée en pesant 1 g d'acide citrique à l'aide de la balance électronique (figure 2.15.a). On verse ensuite cette quantité dans une fiole de 50 mL contenant préalablement une petite quantité de méthanol. On ajoute ensuite du méthanol jusqu'au trait de jauge. On homogénéise la solution obtenue à l'aide d'un agitateur magnétique (figure 2.15.b).



**Figure 2.15:** Matériel utilisé pour la préparation des solutions : a) balance électronique et b) agitateur magnétique.

- Les capteurs gris de dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ )

Le filtre est imprégné de 50  $\mu\text{L}$  d'une solution constituée de la manière suivante. On pèse 0,44 g de pastilles de ( $\text{NaOH}$ ) et 3,95 g d'iodure de sodium ( $\text{NaI}$ ) que l'on dissout dans 50 mL de méthanol en utilisant une fiole jaugée de 50 mL. La solution obtenue est homogénéisée à l'aide d'un agitateur magnétique. On s'assure à l'aide d'un pH-mètre que le pH de la solution est supérieur à 12.

- Les capteurs noirs de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ )

Le filtre est imprégné de 50  $\mu\text{L}$  d'une solution constituée en pesant 0,5 g de pastilles de soude ( $\text{NaOH}$ ) que l'on dissout dans quelques millilitres d'eau déionisée. On utilise une fiole jaugée de 50 mL pour dissoudre l'ensemble dans le méthanol. La solution obtenue est homogénéisée à l'aide d'un agitateur magnétique. On s'assure à l'aide d'un pH-mètre que le pH de la solution est supérieur à 12.

- Les capteurs gris et noirs d'Ozone ( $\text{O}_3$ )

Le filtre est imprégné de 50  $\mu\text{L}$  d'une solution constituée en pesant 0,25 g de nitrite de sodium ( $\text{NaNO}_2$ ) et de 0,25 g de carbonate de potassium ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). On prélève ensuite à l'aide d'une seringue jetable 0,5 mL de glycérol bidistillé. L'ensemble est dissout dans 50 mL d'eau en utilisant une fiole jaugée de 50 mL. La solution obtenue est homogénéisée à l'aide d'un agitateur magnétique.

#### **II.2.2.2. Montage des capteurs passifs, conditionnement et expédition**

Le montage des capteurs se fait en utilisant des pinces et en portant des gants. Il consiste à assembler les 6 différents éléments de la figure 2.8. Les capteurs ainsi réalisés sont mis dans des sachets individuels minigrip prévus à cet effet et sont ensuite conditionnés dans des boîtes plastiques hermétiques et propres pour les expéditions. Pour le capteur de  $\text{NH}_3$ , on ajoute un bouchon fermé dans chaque sachet. Chacune des boîtes peut contenir 8 capteurs. On place 2 sachets de chaque type de capteur dans une boîte (2 noirs, 2 blancs, 2 gris et 2 gris-noirs). On prépare aussi des boîtes de blancs contenant 4 capteurs (un capteur de chaque type). Ces boîtes seront conservées au laboratoire ou envoyées sur les différents sites de mesures sans être exposées. La figure 2.16 montre des sachets de capteurs passifs mis dans les boîtes plastiques. Sur chacune des boîtes, on colle des étiquettes indiquant les noms de la station de mesures, de la ville et du pays ainsi que les périodes (quinzaines, mois) d'exposition des capteurs. On ajoute ensuite une fiche de collecte dans chacune des boîtes. Cette fiche permet de noter les dates

d'exposition et de retrait des capteurs ainsi que la température moyenne qui rentrent dans le calcul de la concentration ambiante des gaz. Un exemplaire de la fiche de collecte est présenté au document 1 en annexe I. Enfin, on utilise un transporteur rapide pour l'acheminement des colis vers les différents sites de mesures.



**Figure 2.16:** Conditionnement des capteurs passifs dans des boîtes plastiques avant expédition. Retour après échantillonnage dans les mêmes conditions.

### **II.2.3. Protocole de collecte des gaz**

Une fois les capteurs passifs réceptionnés, ils sont mis au réfrigérateur en attendant les dates d'exposition. Les capteurs sont ensuite montés en duplicate sur un rail en acier inoxydable et placés à une hauteur comprise entre 1,5 et 2,5 m au-dessus du sol. La figure 2.17 présente les capteurs passifs montés sur le rail. Chaque mois est divisé en 2 périodes de deux semaines pendant lesquelles les capteurs passifs de gaz sont exposés. La première quinzaine part du 1<sup>er</sup> jour au 16<sup>e</sup> jour du mois au matin. Les capteurs sont retirés avant d'être remplacés par d'autres capteurs pendant la deuxième quinzaine qui part du 16<sup>e</sup> jour du mois en cours au 1<sup>er</sup> jour du mois suivant. Les capteurs retirés sont conservés au réfrigérateur avant d'être renvoyés au laboratoire de chimie du LA pour analyse.



**Figure 2.17:** Capteurs passifs montés en duplicate sur un rail en inox sur différents sites de mesures : a) à la décharge d'Akouédo, b) au marché de Yopougon Niangon et c) à l'Aéroport FHB.

## II.2.4. Protocole d'analyse des échantillons de gaz

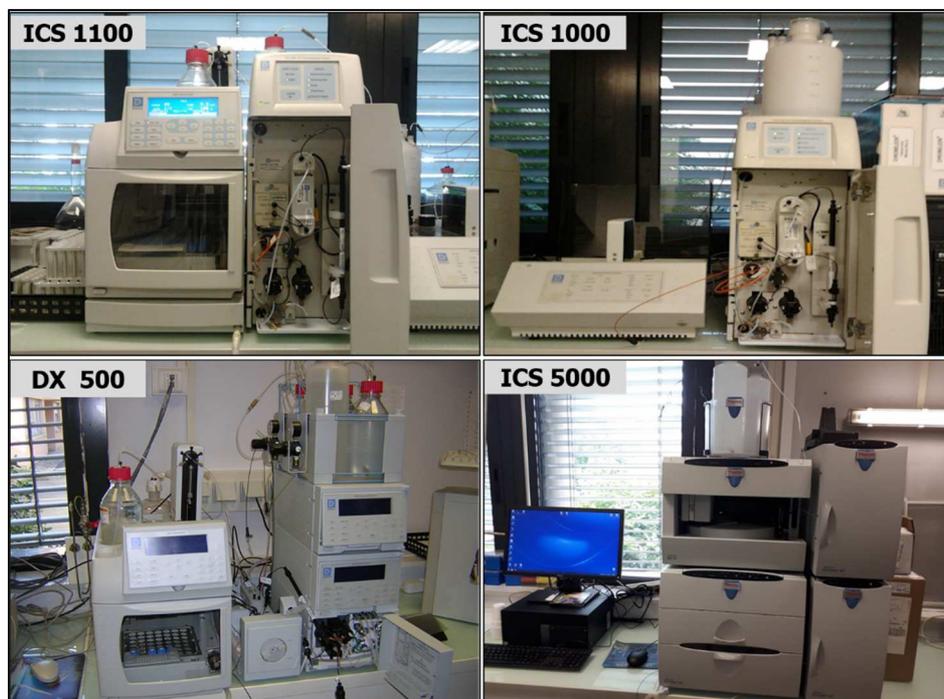
### II.2.4.1. Désorption des filtres

Les échantillons de gaz collectés sur les filtres hydrophobes sont placés dans des pots COULTER. Le filtre est désorbé dans un volume ultra pure de 10 mL d'eau pour les capteurs gris, noirs et gris-noirs et de 5 mL pour les capteurs blancs. L'ensemble est agité aux ultrasons pendant 15 minutes et les solutions ainsi obtenues sont conditionnés dans les vials DIONEX adaptés aux passeurs automatiques d'échantillons eux-mêmes connectés aux chromatographes ioniques.

### II.2.4.2. Analyse par chromatographie ionique

Pour déterminer la concentration des polluants gazeux étudiés, les concentrations des ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pour  $\text{NH}_3$ , nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) pour  $\text{HNO}_3$  et  $\text{O}_3$ , sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pour  $\text{SO}_2$  et de nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) pour  $\text{NO}_2$  sont déterminées par chromatographie ionique (voir tableau II.2). Le laboratoire d'analyse chimique du LA possède un pôle de chromatographie ionique constitué de 4 chromatographes Thermo Dionex (ICS 1000, ICS 1100, ICS 5000 et DX 500). La figure 2.19 présente les différents chromatographes ioniques du LA. Chacun des chromatographes est muni d'un passeur automatique d'échantillons. Les résultats sont traités grâce au logiciel

DIONEX Chroméléon d'acquisition et de retraitement des spectres. Le tableau II.2 présente un récapitulatif des instruments, les espèces analysées ainsi que le mode d'analyse des échantillons.

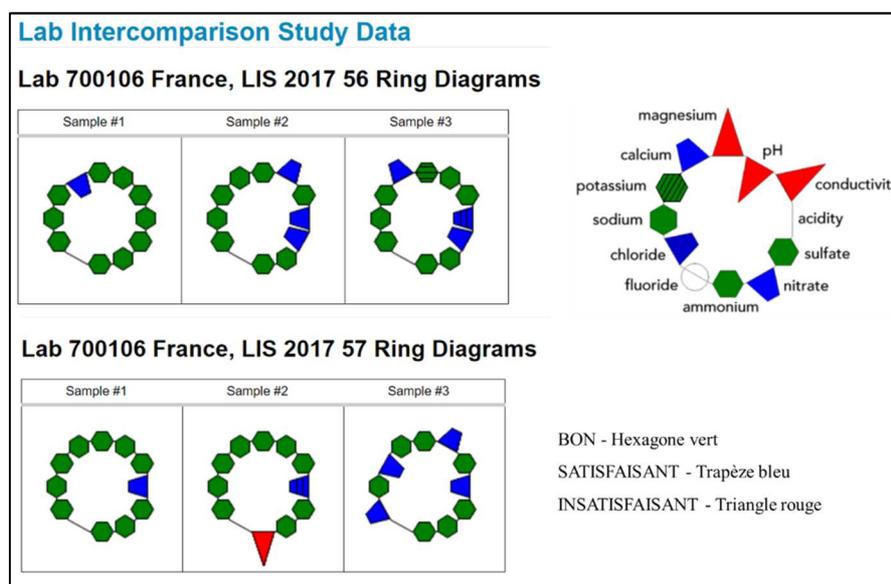


**Figure 2.18:** Différents chromatographes ioniques Thermo Dionex utilisés au LA.

**Tableau II.2:** Récapitulatif des chromatographes du LA et leurs paramètres analytiques

Appareils (logiciel d'exploitation)	Espèces analysées	Colonnes (4 mm) (Durée d'analyse)	Suppression	Composition de l'éluant (débit)
DIONEX ICS 1100 + passeur d'échantillons AS50 (Chromeleon 6.6)	Cations : Na <sup>+</sup> , NH <sup>4+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Li <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	Echange Ionique CG12A + CS12A (14 min)	Autosuppression DIONEX CERS 500	Mode isocratique 20mM CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> H (MSA) (1 mL/min)
DIONEX ICS 1000 + Passeur d'échantillons AS 40 (Chromeleon 6.6)	Anions inorganiques : Cl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> et SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Echange Ionique AG4A-SC+ AS4A-SC (14 mn)	Autosuppression DIONEX AERS 500	Mode isocratique 1,8 mM CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /1,7 mM HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (2 mL/min)
DIONEX ICS 5000+ (Chromeleon 7.2)	Anions : Acétate, Propionate, Formate, Oxalate, Cl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> et SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Echange Ionique AG11 + AS11 (19 min)	Autosuppression DIONEX AERS 500	Mode gradient 90 % H <sub>2</sub> O + 10 % NaOH (15 min) 89 % H <sub>2</sub> O + 11 % NaOH 100 mM (4 min) (1mL/min)
DIONEX ICS 5000+ (Chromeleon 7.2)	Carbonates	Exclusion Ionique ICE-ASI (15 min)	Sans suppression	Mode isocratique 100% H <sub>2</sub> O (1mL/min)

Le système d'analyse par chromatographie ionique utilisé pour cette étude a été largement décrit dans des études antérieures (Adon et al., 2010; Galy-Lacaux and Modi, 1998; Hodgkins et al., 2011). La fiabilité des résultats d'analyse produits par le laboratoire de chimie du LA est évaluée deux fois par an. Le LA participe en effet aux programmes d'inter-comparaison de contrôle de qualité organisé par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM) (Laouali et al., 2012). Les résultats des deux programmes d'assurance qualité WMO/ GAW (World Meteorological Organisation/ Global Atmosphere Watch) pour l'année 2017 sont présentés sur la figure 2.19. Les résultats indiquent que la précision analytique est estimée à  $\pm 5\%$  pour tous les paramètres. Tous les résultats du LA sont disponibles à l'adresse <http://www.qasac-america.org/> sous la référence 700106.



**Figure 2.19:** Diagrammes en anneaux présentant les résultats du laboratoire analytique du LA au deux dernières inter comparaisons WMO/GAW de 2017 sur 3 échantillons tests.

### II.2.4.3. Bilan des analyses

Les différentes analyses réalisées dans le cadre de cette thèse ont porté sur des échantillons collectés à Abidjan et Cotonou lors des campagnes du programme DACCIWA. Des échantillons collectés sur la même période à Bamako et Yaoundé ont également été analysés. Au total, ce sont 5620 échantillons de gaz qui ont été analysés. Le détail du nombre d'échantillons par site et par campagne de mesures est donné dans le tableau II.3.

**Tableau II.3:** Nombre d'échantillons analysés par site

Campagne de mesure	Site de mesures	Période d'échantillonnage	Nombre d'analyses
Mesures à moyen terme	Abidjan feux domestiques	Janvier 2015 - Mars 2017	540
	Abidjan trafic	Décembre 2014 - Avril 2017	550
	Abidjan feux de décharge	Décembre 2014 - Mars 2017	540
	Cotonou trafic	Décembre 2014 - Mars 2017	580
	Bamako trafic	Septembre 2013 - Mars 2017	850
	Yaoundé trafic	Septembre 2013 - Janvier 2017	680
campagnes intensives	Abidjan suivi spatial 1	Décembre 2015 - Février 2016	760
	Abidjan suivi spatial 2	Décembre 2016 - Février 2017	800
	Cotonou suivi spatial	Décembre 2016 - Février 2017	320
<b>Total</b>			<b>5620</b>

#### II.2.4.4. Calcul des concentrations

Pour chacun des échantillons analysés par chromatographie ionique, la concentration en  $\mu\text{g/L}$  est mesurée. Pour déterminer la concentration de chaque polluant gazeux dans l'air ambiant en ppb, la formule suivante (2.1) issue de l'application de la loi des gaz parfaits et donnée pour les capteurs INDAAF a été utilisée (Adon et al., 2010 ; Al-Ourabi, 2002).

$$C_{amb} = \frac{\left[\left(\frac{L}{A}\right) \cdot X \cdot R \cdot T\right]}{[t \cdot D \cdot P]} \quad (2.1)$$

Avec :

$C_{amb}$  : concentration du gaz considéré dans l'air (ppb).

$X$  : la quantité de molécules collectées sur le filtre de cellulose ( $\mu$  mol) (corrigée du blanc).

$R$  : la constante des gaz parfaits ( $R = 0,08206 \text{ L}\cdot\text{atm}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

$T$  : la température ambiante moyenne pendant la période d'exposition en Kelvin (K).

$P$  : la pression atmosphérique moyenne pendant la période d'exposition du capteur (atm).

$D$  : le coefficient de diffusion moléculaire du gaz dans l'air ( $\text{m}^2\cdot\text{S}^{-1}$ ).

$t$  : la durée d'exposition du capteur en seconde (S).

$L/A = 47,5 \text{ m}^{-1}$ , coefficient de résistance de l'air.

Le rapport  $L/A$  dépend de la géométrie du capteur et a été déterminé expérimentalement pour le capteur INDAAF. Un résumé de la détermination du paramètre  $L/A$  a été présenté lors de la synthèse de la validation des capteurs passifs INDAAF (Adon et al., 2010).

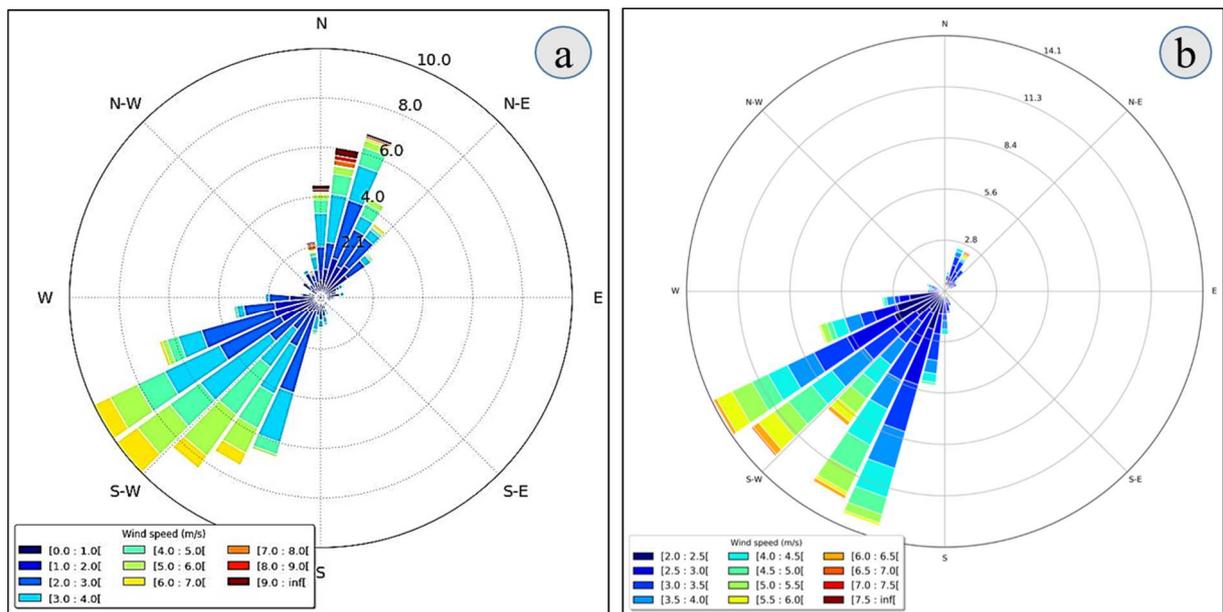
### II.3. Données météorologiques

Les données de températures et d'humidité relative ont été collectées en utilisant le collecteur Volcraft DL-141 TH. La précision de l'appareil est  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  pour la température et de  $\pm 5\%$  pour l'humidité relative. Les données ont été collectées avec un pas de temps de 10 minutes. Ce type d'équipement a déjà été utilisé dans plusieurs études scientifiques pour collecter les données météorologiques et s'avère être d'une grande fiabilité (Nkebiwe et al., 2017; Sandmann et al., 2013). Les capteurs de température et d'humidité ont été installés sur les 3 sites de mesures à Abidjan. En plus des données collectées avec le Voltcraft DL-141 TH, nous avons bénéficié des données METAR collectées à la station météorologique de l'aéroport international Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan et gérées par l'ASECNA (Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar). Pour la ville de Cotonou, les données de températures et d'humidité utilisées proviennent également des données METAR. Le pas de temps pour toutes les données METAR est de 30 minutes soit 48 paires de données (température et humidité) par jour.

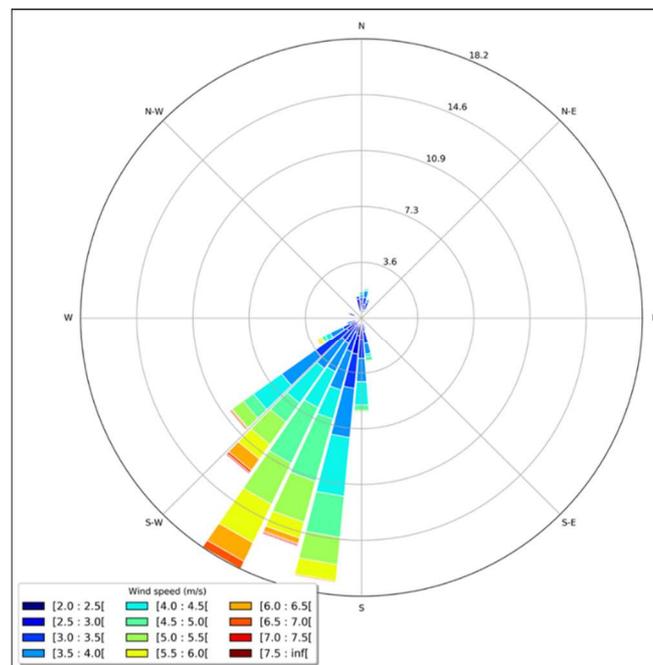
Les données ainsi recueillies ont été traitées à l'aide d'un script écrit en langage Python pour produire les roses de vent à Abidjan (figure 2.20) et Cotonou (figure 2.21) pendant les différentes saisons sèches. Un exemple de script pour le tracé des roses de vent d'Abidjan est proposé dans le document 2 en annexe I. Les roses des vents indiquent que les vents dominants à Abidjan pendant la saison sèche sont en provenance de la direction Sud-Ouest avec une légère contribution Nord-Est (figure 2.20). Ceci indique que la ville d'Abidjan était sous l'influence de la mousson et de l'harmattan pendant la saison sèche du 15 décembre 2015 au 15 février 2016. Pendant la seconde saison sèche du 15 décembre 2016 au 15 février 2017, la contribution Nord-Est était presque inexistante. Il en est de même à Cotonou où les vents en saison sèche sont en provenance de la direction Sud-Sud-Ouest avec une très faible contribution Nord-Est (figure 2.21).

Les données de pluies collectées ont permis de tracer les diagrammes des précipitations et des températures moyennes mensuelles à Abidjan et Cotonou sur toute la période de décembre 2014 à Avril 2017 (figure 2.22). On remarque à Abidjan que le cumul total des précipitations a considérablement baissé en passant de 1769,2 mm en 2015 à 1159,1 mm de pluie en 2016. Ces cumulés annuels sont tous deux inférieurs à la moyenne des précipitations à Abidjan sur la période 1937-2000 qui est de 1920 mm de pluie par an (cf. section II.1.1.2.). Les 2 maximums de pluviométrie ont été observés aussi en Juin et entre Octobre et Novembre

pendant les années de l'étude. La température moyenne annuelle est restée presque constante en passant de 27,4 °C à 27,8°C.

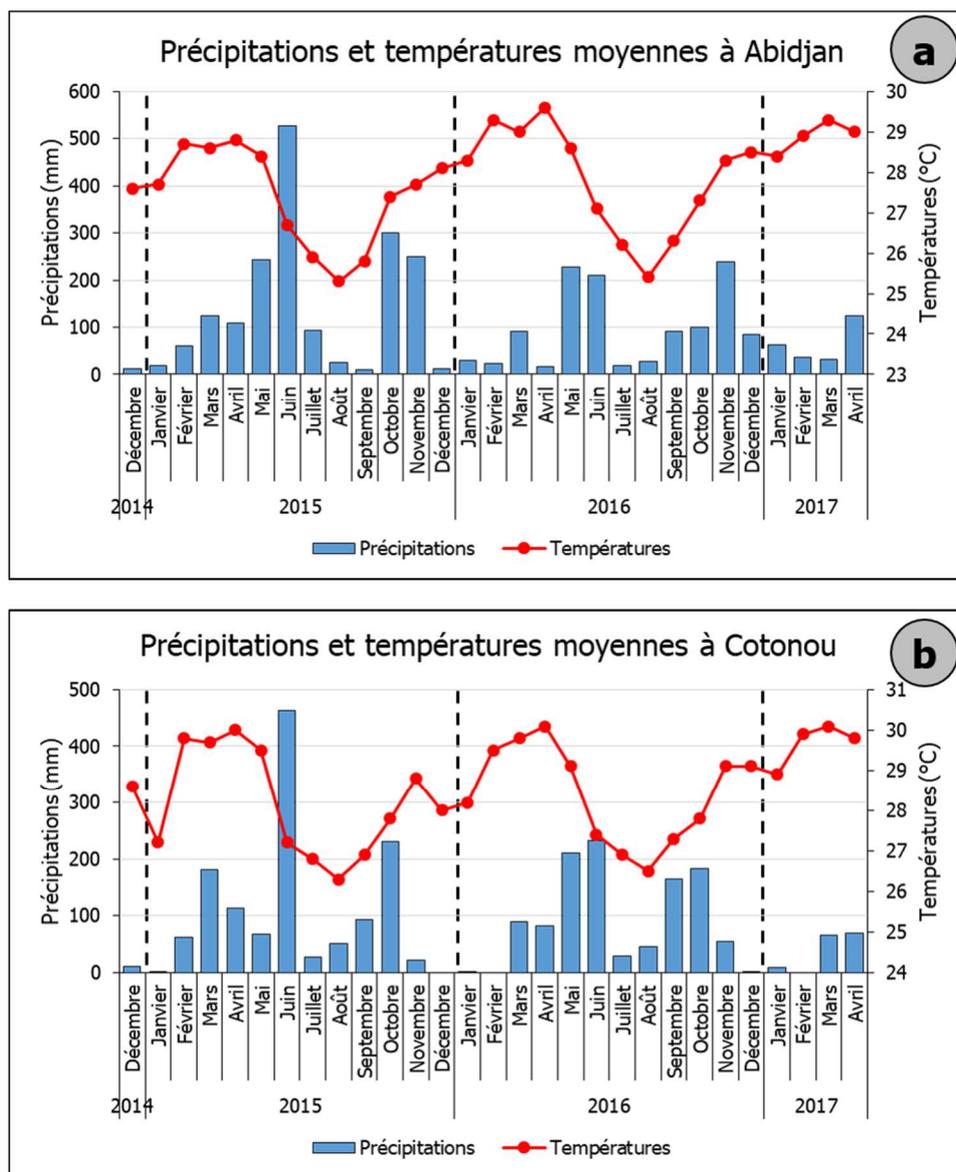


**Figure 2.20:** Rose des vents des d'Abidjan en saison sèche, a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.



**Figure 2.21:** Rose des vents à Cotonou en saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

A Cotonou, le cumul annuel de précipitation a aussi baissé en passant de 1308,3 mm à 1090,1 mm de pluie entre 2015 et 2016. Ces cumuls annuels de pluie sont proches de la moyenne qui est de 1244 mm. Les températures moyennes annuelles ont également très peu varié en passant de 28,2 °C à 28,4 °C. A Abidjan et Cotonou, on observe un même cycle saisonnier de variation des températures. Les températures moyennes mensuelles maximales ont été obtenues en Avril durant cette période dans les deux villes.



**Figure 2.22:** Précipitations et Températures moyennes mensuelles de Décembre 2014 à Avril 2017 à : a) Abidjan et b) Cotonou.

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'ensemble de la stratégie expérimentale mise en œuvre dans le cadre ce travail. Nous avons dans un premier temps présenté les zones d'étude puis donné une description des sites de mesure retenus dans le cadre du programme DACCIWA. Dans la seconde partie, nous avons décrit les protocoles expérimentaux mis en œuvre dans les mesures de gaz par capteurs passifs en décrivant l'ensemble des processus : la préparation des capteurs, leur exposition sur les sites, le retrait et l'analyse des échantillons de gaz. Ce chapitre traduit un investissement personnel qui a conduit à effectuer 4 séjours au laboratoire d'Aérodologie de Toulouse. Lors de ces différents séjours, nous avons été intégrés dans toutes les activités du laboratoire de chimie analytique. Ainsi, nous avons pu bénéficier de formations sur les techniques de collecte et d'analyse des échantillons de gaz et particules. Ces formations ont permis d'être rapidement formé aux techniques de préparation des capteurs passifs et à la pesée des filtres téflon et quartz pour la collecte des aérosols. Des compétences dans la gestion logistique ont aussi été acquises auprès du personnel du laboratoire à travers la commande de matériel ou consommable de laboratoire et l'expédition des colis.

Dans ce contexte, ce travail en alternance entre Abidjan et Toulouse a conduit à acquérir différentes compétences dans l'élaboration et la mise en œuvre de mesures de terrain dans le domaine de la physico-chimie atmosphérique. En particulier, nous avons eu une responsabilité dans la prospection et le choix définitif des sites de mesure où nous avons installé en toute autonomie différents équipements (collecteurs d'aérosols, capteurs météorologiques, capteurs passifs de gaz). D'autre part, l'ensemble de ces formations au service de chimie du LA ont permis d'acquérir des compétences pour la préparation et à l'envoi des capteurs, l'échantillonnage des gaz et des aérosols sur les différents sites jusqu'à la phase d'analyse chimique. Enfin, les résultats bruts d'analyse ont été traités et les concentrations des polluants gazeux ont été calculées pour aboutir à la validation finale de la base de données qui sert de support à ce travail.

Ce travail a donc permis de constituer une base de données originale des concentrations de plusieurs gaz ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  et  $\text{O}_3$ ) pour les villes d'Abidjan et de Cotonou. Ces données seront disponibles dans la base de données régionale BAOBAB (Base Afrique de l'Ouest Beyond AMMA Base) via le lien suivant (<http://baobab.sedoo.fr/DACCIWA/>). La base ainsi réalisée a permis de faire les études décrites dans les chapitres 3 et 4 suivants.

**Chapitre III :**  
**Caractérisation moyenne de la pollution  
gazeuse à Abidjan et Cotonou**

### **III.1. Introduction**

Les lignes directrices de l’OMS relatives à la qualité de l’air ambiant mis à jour en 2005 recommandent le contrôle et le suivi d’un certain nombre de polluants gazeux à différentes échelles de temps. Dans cette étude réalisée dans le cadre du programme Européen DACCIWA, les concentrations atmosphériques de dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>), de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), d’ammoniac (NH<sub>3</sub>), d’acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) et d’ozone (O<sub>3</sub>) ont fait l’objet d’un suivi à moyen terme sur la période de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et à Cotonou.

Dans ce chapitre, nous présentons l’ensemble des résultats des concentrations gazeuses mesurées sur les différents sites DACCIWA sur la période d’étude. Ces résultats nous ont permis de constituer une base de données originale en zones urbaines pour deux capitales d’Afrique de l’Ouest. L’analyse des résultats nous permet de faire une caractérisation moyenne de la pollution sur chacun des sites des deux villes avec deux axes d’étude privilégiés :

- l’évaluation de la contribution des sources potentielles aux concentrations des polluants gazeux
- l’étude des variations temporelles des concentrations des polluants gazeux.

Pour terminer, les concentrations moyennes de chaque polluant sur chaque site seront déterminées et comparées aux concentrations moyennes mesurées sur les sites trafic de Bamako et Yaoundé sur la même période d’une part et d’autre part à celles mesurées à Dakar et Bamako sur une autre période dans le cadre du programme POLCA.

### **III.2. Présentation de la base de données**

Dans ce paragraphe, nous présentons une base de données originale constituée à partir des concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux obtenues sur les sites d’Abidjan et de Cotonou. La méthodologie de collecte et d’analyse des capteurs passifs utilisée dans cette étude, la validité des mesures incluant reproductibilité et limite de détection ont été présentées dans le chapitre II section II.2.1.

La base de données finale réalisée pour les sites d’Abidjan et de Cotonou est constituée de 2170 données représentant 98,2 % du nombre total d’échantillons analysés avec respectivement 1600 données pour les 3 sites d’Abidjan et 570 données pour le site trafic de Cotonou. En effet, la concentration moyenne bimensuelle de chaque polluant (intégrée sur quinze jours) est le résultat de la moyenne des concentrations obtenues à partir par 2 capteurs identiques exposés dans les mêmes conditions sur la même période. Lorsque les concentrations sont inférieures à la limite

de détection du capteur ou que la reproductibilité des capteurs est inférieure aux valeurs de référence, les valeurs obtenues sont retirées de la base de données finale. Ainsi 40 échantillons (1,8 %) ont été retirés de cette base de données. Le tableau III.1 présente la base de données finale pour chaque site DACCIWA d'Abidjan et de Cotonou.

**Tableau III.1:** Bilan des échantillons analysés

Villes	Sites de mesures	Capteurs analysés	Résultats retenus	Base de données finale (%)
Abidjan	feux domestiques	540	530	98,1 %
	trafic	550	540	98,2 %
	feux de décharge	540	530	98,1 %
Cotonou	trafic	580	570	98,3 %
<b>Total</b>		<b>2210</b>	<b>2170</b>	<b>98,2 %</b>

Les résultats du calcul des concentrations moyennes bimensuelles de chaque polluant gazeux sur chaque site sont présentés dans les tableaux III.2, III.3, III.4 et III.5 respectivement pour les sites feux domestiques, trafic, feux de décharge à Abidjan et trafic à Cotonou. Dans chacun des tableaux, les quinzaines d'échantillonnage sont identifiées par le code suivant : **Mois-Année-d/f**. Le mois est identifié par les trois premières lettres du nom du mois. L'année est identifiée par les deux derniers chiffres de l'année. Les lettres d et f indiquent respectivement la première quinzaine du mois allant du 1er au 15e jour du mois et la deuxième quinzaine du mois allant du 16e jour au dernier jour du mois.

**Tableau III.2:** Concentrations moyennes bimensuelles en ppb intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site feux domestiques d'Abidjan de Janvier 2015 à Mars 2017.

N°	Quinzaines	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
1	Jan-15d	20,5	59,4	2,2	1,0	18,8
2	Jan-15f	19,3	84,1	2,2	0,7	13,9
3	Fev-15d	19,2	84,4	1,0	1,1	8,4
4	Fev-15f	16,1	65,7	1,8	0,9	11,0
5	Mar-15d	18,3	59,3	0,6	0,4	10,5
6	Mar-15f	13,7	57,3	1,1	0,4	11,3
7	Avr-15d	18,2	62,8	0,3	0,4	6,1
8	Avr-15f	17,7	71,5	0,6	0,2	8,8
9	Mai-15d	15,5	75,7	0,3	0,4	8,4
10	Mai-15f	16,4	72,6	0,5	0,5	8,3
11	Jun-15d	18,7	68,7	1,6	0,6	10,7
12	Jun-15f	19,3	53,7	1,8	0,8	7,8
13	Jul-15d	25,9	57,4	2,0	1,0	7,8
14	Jul-15f	26,2	63,4	1,8	1,0	10,4
15	Aou-15d	25,4	82,7	1,2	1,4	10,5
16	Aou-15f	21,7	100,7	1,7	2,5	10,2
17	Sept-15d	27,5	95,9	1,0	1,8	7,9
18	Sept-15f	22,3	103,1	1,1	1,4	7,5
19	Oct-15d	32,3	76,7	1,0	1,1	7,6
20	Oct-15f	23,6	109,1	0,8	1,7	6,8
21	Nov-15d	15,9	85,0	0,7	0,7	6,4
22	Nov-15f	20,5	70,2	0,8	0,9	6,2
23	Dec-15d	17,2	73,9	1,3	1,1	10,1
24	Dec-15f	18,8	83,9	1,1	1,0	9,9
25	Jan-16d	17,8	107,5	1,0	1,3	12,8
26	Jan-16f	17,6	107,6	1,6	1,4	7,7
27	Fev-16d	18,9	109,4	1,0	0,8	10,3
28	Fev-16f	24,0	103,6	1,0	0,9	8,9
29	Mar-16d	22,6	93,2	1,2	0,9	9,0
30	Mar-16f	20,4	82,6	0,9	0,8	7,8
31	Avr-16d	20,1	76,4	1,0	1,2	7,0
32	Avr-16f	19,3	112,6	1,3	1,1	7,4
33	Mai-16d	20,8	139,3	0,9	0,9	7,0
34	Mai-16f	19,0	104,7	1,8	1,2	5,7
35	Jun-16d	*	*	*	*	*
36	Jun-16f	21,8	131,2	1,9	0,8	9,2
37	Jul-16d	19,9	49,5	1,0	0,7	9,1
38	Jul-16f	27,4	66,7	1,5	0,9	8,6
39	Aou-16d	25,0	106,7	0,5	1,0	5,4
40	Aou-16f	25,9	109,7	0,8	1,5	5,6
41	Sep-16d	24,2	67,9	3,0	1,5	5,1
42	Sep-16f	23,2	50,5	0,1	1,2	4,0
43	Oct-16d	22,8	69,3	0,5	1,0	3,8
44	Oct-16f	17,7	132,7	1,3	0,7	6,2
45	Nov-16d	19,7	142,8	2,1	0,8	7,2
46	Nov-16f	19,7	167,4	1,4	1,4	6,7
47	Dec-16d	20,3	141,5	1,1	0,8	8,9
48	Dec-16f	19,2	129,8	1,3	0,8	8,2
49	Jan-17d	23,1	123,0	1,9	1,1	11,4
50	Jan-17f	21,2	115,9	1,1	0,8	9,0
51	Fev-17d	20,9	112,6	1,5	0,9	11,5
52	Fev-17f	23,7	106,2	2,0	0,6	10,5
53	Mar-17d	23,7	105,4	1,8	0,9	9,3
54	Mar-17f	25,9	118,3	2,0	1,4	10,5

\*Les capteurs ont été exposés pendant un mois du 15 Mai 2016 au 15 juin 2016.

**Tableau III.3:** Concentrations moyennes bimensuelles en ppb intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic d'Abidjan de Janvier 2015 à Avril 2017.

N°	Quinzaines	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
1	Jan-15d	29,2	43,8	1,3	4,9	12,3
2	Jan-15f	12,4	28,7	0,7	0,7	13,2
3	Fev-15d	8,9	20,0	0,3	0,7	18,4
4	Fev-15f	10,4	19,6	1,5	0,8	13,1
5	Mar-15d	12,1	17,2	1,4	0,9	16,1
6	Mar-15f	14,3	21,3	1,7	1,0	11,4
7	Avr-15d	14,3	25,1	0,5	0,8	11,8
8	Avr-15f	13,2	27,4	0,8	0,3	11,0
9	Mai-15d	9,0	15,3	0,2	0,5	8,3
10	Mai-15f	8,3	3,0	1,3	1,5	10,8
11	Jun-15d	16,7	39,3	1,3	2,0	10,6
12	Jun-15f	12,9	14,1	2,4	1,3	12,1
13	Jul-15d	10,2	15,7	1,4	0,3	10,2
14	Jul-15f	10,7	12,3	1,2	1,2	14,0
15	Aou-15d	11,5	6,5	1,3	1,6	11,8
16	Aou-15f	9,2	11,1	0,9	1,2	12,9
17	Sept-15d	14,2	14,2	0,8	1,7	13,0
18	Sept-15f	9,5	11,1	0,7	0,6	10,6
19	Oct-15d	9,1	11,4	0,7	0,9	13,4
20	Oct-15f	12,3	14,1	1,0	1,1	8,9
21	Nov-15d	13,1	18,6	0,9	1,0	7,7
22	Nov-15f	14,1	23,8	1,2	1,2	10,2
23	Dec-15d	25,1	31,3	1,4	2,1	10,7
24	Dec-15f	30,8	43,3	1,0	5,5	10,1
25	Jan-16d	18,9	26,7	1,3	2,1	12,0
26	Jan-16f	19,7	31,0	1,1	2,1	10,6
27	Fev-16d	13,9	23,3	1,2	0,9	12,6
28	Fev-16f	13,7	27,9	1,4	0,8	21,5

N°	Quinzaines	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
29	Mar-16d	7,5	15,8	0,3	0,6	8,2
30	Mar-16f	10,6	18,0	0,7	0,7	11,1
31	Avr-16d	8,5	7,2	0,8	1,9	8,6
32	Avr-16f	11,6	13,4	1,1	2,2	12,9
33	Mai-16d	10,2	14,8	1,0	2,8	11,4
34	Mai-16f	12,0	11,3	1,9	1,3	9,4
35	Jun-16d	*	*	*	*	*
36	Jun-16f	9,9	6,8	1,3	1,1	16,7
37	Jul-16d	8,6	19,0	0,9	0,6	14,0
38	Jul-16f	8,8	22,2	1,1	0,6	13,4
39	Aou-16d	9,8	30,0	0,7	0,7	8,3
40	Aou-16f	9,5	19,0	1,7	1,0	10,1
41	Sep-16d	8,5	20,7	1,0	1,0	9,6
42	Sep-16f	10,1	20,2	0,7	1,2	8,7
43	Oct-16d	5,7	16,9	0,3	0,4	5,8
44	Oct-16f	10,2	20,9	0,8	1,3	6,5
45	Nov-16d	11,3	23,6	1,3	1,6	11,2
46	Nov-16f	11,8	27,4	0,8	1,6	11,2
47	Dec-16d	14,5	22,3	1,9	2,2	11,8
48	Dec-16f	17,5	33,9	1,3	2,3	10,0
49	Jan-17d	14,1	27,9	1,5	1,7	13,6
50	Jan-17f	12,2	20,5	1,7	1,2	14,8
51	Fev-17d	15,8	23,9	1,1	1,4	12,6
52	Fev-17f	10,2	22,4	1,8	1,0	15,3
53	Mar-17d	8,3	19,2	1,2	0,9	13,5
54	Mar-17f	8,1	18,8	1,3	1,2	12,7
55	Avr-17 d	10,3	20,6	1,1	1,0	13,0

\*Les capteurs ont été exposés durant un mois du 15 Mai 2016 au 15 Juin 2016.

**Tableau III.4:** Concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site feux de décharge d'Abidjan de Janvier 2015 à Mars 2017.

N°	Quinzaines	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
1	Jan-15d	9,9	48,3	1,7	0,6	24,9
2	Jan-15f	11,8	42,2	1,3	1,6	15,7
3	Fev-15d	7,4	27,6	0,3	0,6	11,0
4	Fev-15f	9,6	26,7	1,4	1,0	15,0
5	Mar-15d	9,3	35,6	1,6	1,2	11,0
6	Mar-15f	11,4	27,8	0,9	1,1	13,8
7	Avr-15d	6,9	36,1	0,8	0,4	12,2
8	Avr-15f	7,2	43,6	0,3	0,3	11,2
9	Mai-15d	7,1	26,2	0,6	0,5	10,8
10	Mai-15f	8,0	27,8	0,5	0,6	11,8
11	Jun-15d	9,5	59,0	1,4	1,7	15,0
12	Jun-15f	12,9	14,5	1,8	1,3	11,7
13	Jul-15d	9,1	12,9	1,5	1,5	12,0
14	Jul-15f	10,2	12,8	1,4	2,1	13,4
15	Aou-15d	8,7	16,6	1,1	1,8	12,8
16	Aou-15f	10,3	16,7	1,1	1,5	10,8
17	Sept-15d	10,5	23,2	0,8	2,9	10,5
18	Sept-15f	9,4	22,2	0,7	2,0	7,0
19	Oct-15d	6,9	27,8	0,7	1,2	9,4
20	Oct-15f	8,8	16,8	0,7	1,0	8,8
21	Nov-15d	8,0	24,3	1,0	0,9	11,2
22	Nov-15f	11,8	32,5	1,4	1,0	10,5
23	Dec-15d	9,6	32,6	1,0	0,6	13,4
24	Dec-15f	13,3	37,5	0,9	0,4	16,1
25	Jan-16d	11,4	36,9	1,3	0,6	15,2
26	Jan-16f	9,9	43,3	1,2	1,2	19,2
27	Fev-16d	13,6	38,6	1,8	2,5	19,6
28	Fev-16f	*	*	*	*	*
29	Mar-16d	11,2	24,5	1,6	1,4	19,1
30	Mar-16f	11,2	24,5	1,6	1,4	19,1
31	Avr-16d	6,9	8,0	0,5	1,2	11,5
32	Avr-16f	7,4	19,9	1,0	1,6	15,1
33	Mai-16d	8,8	15,1	1,1	2,1	14,6
34	Mai-16f	4,6	2,3	0,6	0,6	5,5
35	Jun-16d	8,4	8,4	1,3	1,0	15,0
36	Jun-16f	5,9	5,9	1,9	1,5	13,7
37	Jul-16d	13,4	30,6	2,6	2,1	27,4
38	Jul-16f	7,2	22,3	1,0	1,2	12,3
39	Aou-16d	9,1	17,4	1,7	2,3	13,7
40	Aou-16f	7,9	15,6	2,0	1,7	11,1
41	Sep-16d	6,2	13,4	2,2	1,7	9,8
42	Sep-16f	6,6	19,3	0,9	1,2	10,1
43	Oct-16d	6,8	13,0	1,1	1,3	7,2
44	Oct-16f	9,1	23,8	0,7	0,7	8,9
45	Nov-16d	7,8	39,7	1,2	0,4	14,6
46	Nov-16f	7,6	34,7	1,2	0,6	10,1
47	Dec-16d	10,9	31,7	1,3	0,8	17,8
48	Dec-16f	12,6	30,1	1,3	0,8	14,7
49	Jan-17d	12,1	41,7	1,3	0,7	27,1
50	Jan-17f	12,6	28,5	1,6	1,0	14,4
51	Fev-17d	11,8	58,2	2,0	1,3	14,9
52	Fev-17f	6,6	26,3	2,3	1,2	15,9
53	Mar-17d	7,9	25,5	1,8	1,2	17,0
54	Mar-17f	9,0	21,7	1,5	0,9	16,1

\*Capteurs endommagés et non analysés

**Tableau III.5:** Concentrations moyennes bimensuelles en ppb intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic de Cotonou.

N°	Quinzaines	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
1	Dec-14d	26,9	34,5	1,3	1,7	11,6
2	Dec-14f	30,4	45,0	0,7	2,5	12,8
3	Jan-15d	21,2	38,4	2,4	1,3	14,0
4	Jan-15f	12,8	24,3	1,6	0,4	12,3
5	Fev-15d	15,4	14,1	1,6	0,4	13,8
6	Fev-15f	16,4	19,8	2,3	0,7	13,7
7	Mar-15d	15,7	25,5	0,7	0,7	13,5
8	Mar-15f	*	*	*	*	*
9	Avr-15d	13,2	35,4	0,4	0,6	9,6
10	Avr-15f	13,0	21,1	0,3	0,2	14,2
11	Mai-15d	16,1	38,2	0,2	0,3	9,8
12	Mai-15f	18,3	29,8	1,1	0,7	15,5
13	Jun-15d	21,8	37,9	0,4	0,2	9,1
14	Jun-15f	17,2	15,4	1,6	1,5	11,5
15	Jul-15d	14,4	17,6	1,6	1,1	8,6
16	Jul-15f	13,1	14,1	1,4	0,8	14,1
17	Aou-15d	12,8	9,1	1,5	1,1	9,5
18	Aou-15f	14,6	16,3	1,7	0,9	15,6
19	Sept-15d	12,4	12,5	0,9	0,6	11,1
20	Sept-15f	16,0	14,0	1,0	0,6	12,5
21	Oct-15d	9,8	13,7	1,0	0,8	7,8
22	Oct-15f	15,1	17,3	1,2	1,3	11,0
23	Nov-15d	16,8	19,0	1,8	1,8	14,7
24	Nov-15f	18,1	21,4	1,4	1,1	10,4
25	Dec-15d	26,9	20,9	2,1	1,9	12,9
26	Dec-15f	36,2	28,3	1,4	1,7	11,5
27	Jan-16d	24,8	25,5	3,5	1,6	16,6
28	Jan-16f	27,6	27,6	1,6	2,1	15,0
29	Fev-16d	21,5	12,9	1,5	1,4	17,7
30	Fev-16f	17,9	9,5	1,0	0,8	12,9
31	Mar-16d	16,4	8,9	0,8	0,7	14,3
32	Mar-16f	15,3	8,1	1,1	0,6	16,5
33	Avr-16d	14,7	17,6	1,7	1,5	17,0
34	Avr-16f	13,8	20,5	1,3	1,2	18,0
35	Mai-16d	18,3	23,1	1,5	1,0	15,3
36	Mai-16f	19,3	21,3	2,1	1,8	14,7
37	Jun-16d	28,0	22,5	2,0	1,5	13,4
38	Jun-16f	16,9	13,8	2,0	1,0	13,9
39	Jul-16d	12,6	4,3	1,3	0,5	16,2
40	Jul-16f	13,7	7,4	1,7	0,5	16,6
41	Aou-16d	11,3	3,5	1,8	0,4	12,3
42	Aou-16f	11,9	7,6	1,7	1,0	12,9
43	Sep-16d	11,1	11,8	1,0	0,8	11,0
44	Sep-16f	10,9	11,8	1,3	0,9	11,1
45	Oct-16d	14,9	8,0	0,9	0,6	8,8
46	Oct-16f	15,4	8,6	1,4	1,3	13,1
47	Nov-16d	15,9	15,7	1,8	1,4	12,5
48	Nov-16f	14,4	15,6	1,7	1,2	14,0
49	Dec-16d	17,4	17,5	1,7	1,3	19,5
50	Dec-16f	20,9	22,2	1,7	2,1	17,8
51	Jan-17d	20,7	18,7	2,7	3,0	21,7
52	Jan-17f	19,0	18,4	2,5	1,3	24,0
53	Fev-17d	17,8	18,7	1,6	1,5	15,3
54	Fev-17f	15,7	21,3	3,3	1,8	25,4
55	Mar-17d	13,4	17,6	2,8	1,9	19,1
56	Mar-17f	14,3	22,5	2,2	1,5	18,5
57	Avr-17d	17,1	17,2	3,8	1,2	19,4
58	Avr-17f	14,8	11,9	0,5	0,3	13,9

\*Capteurs exposés pendant un mois du 1<sup>er</sup> Mars 2015 au 30 Mars 2015

### **III.3. Etude des données de pollution à partir de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)**

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique exploratoire descriptive multidimensionnelle. Elle vise à regrouper un nombre important de variables en un nombre limité de facteurs afin de faciliter l'analyse de ces facteurs et de détecter les relations de dépendance entre les différentes variables. L'ACP est souvent utilisée dans les analyses de la qualité de l'air pour identifier les sources majeures des polluants émis dans l'atmosphère (Baek et al., 1997; Bruno et al., 2001; Lanz et al., 2007). Elle permet aussi d'étudier les cycles temporels entre les différents prélèvements au travers de leurs similitudes vis-à-vis de l'ensemble des variables (Guo et al., 2004; Gupta et al., 2008; Kchih and Cherif, 2015).

L'ACP se déroule en plusieurs étapes qui sont indispensables à la compréhension de l'information contenue dans le jeu de données (Emery, 2012; BEI ERE, 2018 ; Saly-Giocanty, 2007). Ces étapes sont :

#### **La détermination du plan factoriel ou plan principal :**

Le plan principal est constitué de deux axes factoriels ou axes principaux qui sont orthogonaux entre eux. Chaque axe factoriel est construit comme la combinaison linéaire des  $p$  variables entrse-elles. Dans ces conditions les axes factoriels sont indépendants entre eux et chacun d'eux explique une partie de l'information contenue dans le jeu de données. Les axes principaux retenus sont ceux ayant une variance supérieure à 1 (kaiser, 1960). Le pourcentage d'inertie du plan factoriel représentant la quantité totale d'information contenue dans ce plan est la somme des pourcentages de variance de chacun des axes.

#### **La projection des $p$ variables et des $n$ individus :**

Cette étape permet de projeter les informations dans le nouveau système formé par les axes principaux choisis précédemment. Les projections des variables et des individus se font sur deux graphes séparés :

- Le graphe des  $p$  variables ou cercle de corrélation:

Les variables sont projetées dans un cercle de rayon 1 contenant les axes principaux. Les coordonnées de chaque variable sont comprises entre -1 et +1 et représentent les coefficients de corrélation ( $r$ ) entre les variables initiales et les axes principaux. Dans ces conditions, plus la coordonnée d'une variable est forte sur un axe, plus cette variable est corrélée

avec l'axe principal, et donc elle contribue plus à structurer cet axe. A l'inverse, plus les coordonnées des variables sont proches du centre de gravité O (0,0) moins elles y contribuent. Pour interpréter un axe, on recense donc les variables corrélées très positivement et négativement sur l'axe en question. Il est aussi possible d'interpréter la proximité entre deux variables à condition qu'elles soient toutes les deux proches du cercle de corrélation.

- Le graphe des  $n$  individus ou dispersion de la série de données:

Contrairement, aux variables, les coordonnées des individus n'ont pas d'interprétation en termes de corrélations mais plutôt en termes de ressemblance vis-à-vis de l'ensemble des variables. L'important ici est de tenir compte de la valeur relative des individus les uns par rapport aux autres. Dans ces conditions, on regarde la position des individus par rapport aux axes, mais aussi par rapport à l'individu moyen. On observe aussi les individus qui présentent une forte coordonnée (x, y) car ce sont ceux qui pèsent le plus fortement dans la détermination des axes.

#### **La vérification de qualité de la représentation et la contribution :**

Afin d'éviter une mauvaise interprétation de la projection, on mesure généralement la qualité de représentation des variables en fonction des axes factoriels considérés. Ceci permet de dire si le choix des axes que l'on a fait permet de décrire convenablement telle ou telle variable. La qualité de la représentation est égale au cosinus carré de la coordonnée de la variable. Elle varie entre 0 et 1. Ainsi plus la qualité de la représentation est grande ( $\cos^2 > 0,5$ ) plus sa représentation est bonne.

Il est aussi possible de calculer pour chaque axe la contribution de chacune des variables, ou des individus à l'élaboration des axes factoriels. La contribution est obtenue en fonction de la coordonnée du point sur l'axe factoriel considéré divisée par sa valeur propre. Il s'agit donc d'une approche à la fois statistique, par la recherche d'axes factoriels indépendants expliquant au mieux la variance totale des données calculées ; mais aussi géométrique, par la représentation des variables et des individus dans un nouvel espace géométrique selon les axes factoriels choisis (Cibois, 2000).

Dans le cas de cette étude, les  $p$  variables analysées sont les 5 polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{O}_3$ ) et les  $n$  individus sont les prélèvements réalisés chaque quinzaine. Un prélèvement est représenté par l'ensemble des concentrations moyennes des échantillons de polluants collectés pendant une période de 2 semaines (quinzaine) sur un site. Dans cette

première approche nous étudierons la qualité de la représentation des prélèvements et des polluants par un système d'axe principaux (plan factoriel) pour chacun des sites. Nous verrons par la suite les premières relations entre les polluants et nous essayerons d'identifier les sources probables des polluants sur chaque site à travers l'étude du cercle de corrélation. Nous terminerons cette première approche par une détermination des coefficients de corrélation entre les différents polluants à travers la réalisation de matrices de corrélation.

### **III.3.1. Représentation des prélèvements dans un système d'axes principaux**

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à partir des données disponibles dans les tableaux III.2, III.3, III.4 et III.5 représentant les concentrations moyennes bimensuelles obtenues sur chaque site (feux domestiques, trafic et feux de décharge à Abidjan et trafic à Cotonou). Les lignes présentant des valeurs manquantes ont été retirées des tableaux pour la réalisation de l'ACP. Ainsi les prélèvements N° 35 (jun-16d) sur le site feux domestiques, N° 35 (jun-16d) sur le site trafic d'Abidjan, N° 28 (fev-16f) sur le site feux de décharge d'Abidjan et N° 8 (mar-15d) sur le site trafic de Cotonou n'ont pas été utilisés. La réalisation de l'ACP s'est faite à l'aide l'outil de traitement statistique R dans sa version 3.3.1.

Les résultats de l'ACP sur valeurs propres, sur les prélèvements et sur les polluants sont donnés pour chaque site dans les documents 1, 2, 3 et 4 en annexe II respectivement pour les sites feux domestiques, trafic, feux de décharge d'Abidjan et trafic de Cotonou. Les polluants gazeux ont été projetés dans un cercle de corrélation et la répartition des prélèvements a été faite dans le plan principal.

En considérant le nombre de variables (5) représentant les 5 polluants gazeux, la représentation de l'ensemble des données de chaque site dans le plan factoriel est bonne si le quantile à 95 % du pourcentage d'inertie représentant la somme des pourcentages de variance de chacun des axes principaux est supérieur à 56 % pour 54 prélèvements, à 55,7 % pour 55 prélèvements et à 55,1 % pour 58 prélèvements. Le tableau III.6 donne la variance et le pourcentage d'inertie calculés pour chacun des axes suivi du pourcentage total cumulé pour le plan principal. Les axes principaux dont la variance est supérieure à 1 vont être appelés Dim 1 et Dim 2 dans la suite de ce travail. On se rend compte que la variance cumulée est supérieure à 56 % pour les sites feux domestiques et trafic qui ont 54 prélèvements. Cette variance cumulée est aussi supérieure à 55,7 % et 55,1 % pour les sites trafic d'Abidjan et de Cotonou qui ont respectivement 55 et 58 prélèvements. Cela montre que les variables (polluants) ne sont

pas indépendantes et qu'il existe des liaisons fortes entre elles. La projection de l'ensemble des données dans le plan factoriel est donc une bonne approximation de l'état de la qualité de l'air sur chacun des sites car elle contient l'information essentielle contenue dans le jeu de données.

**Tableau III.6:** Pourcentages cumulés de la variance de chacun des axes principaux (Dim1 et Dim 2) sur chacun des sites de mesures à Abidjan et Cotonou.

Sites de mesure	Dim 1		Dim 2		Pourcentage cumulé de la variance (%)
	Valeur propre	Pourcentage de variance	Valeur propre	Pourcentage de variance	
<b>Feux domestiques Abidjan</b>	1,69	33,83	1,38	27,51	61,35
<b>Trafic Abidjan</b>	2,41	48,19	1,26	25,22	73,41
<b>Feux de décharge Abidjan</b>	2,24	44,70	1,40	28,09	72,79
<b>Trafic Cotonou</b>	2,28	45,64	1,58	31,65	77,29

Les répartitions des différents prélèvements effectués sur chacun des sites dans le plan principal et leur classification sont représentées par les graphes des figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 respectivement pour les sites feux domestiques, trafic, feux de décharge d'Abidjan et trafic de Cotonou.

Une bonne représentation des prélèvements dans le plan principal est faite si la somme des cosinus carré des angles formés par rapport à chacun des axes principaux est supérieure à  $0,5(\sum(\cos \alpha)^2 > 0,5)$ . Ce critère n'est pas rempli pour un certain nombre de prélèvements qui varie en fonction des sites (voir les documents 1, 2, 3 et 4 en annexe II). Ces prélèvements sont identifiés par un numéro qui représente la quinzaine d'échantillonnage:

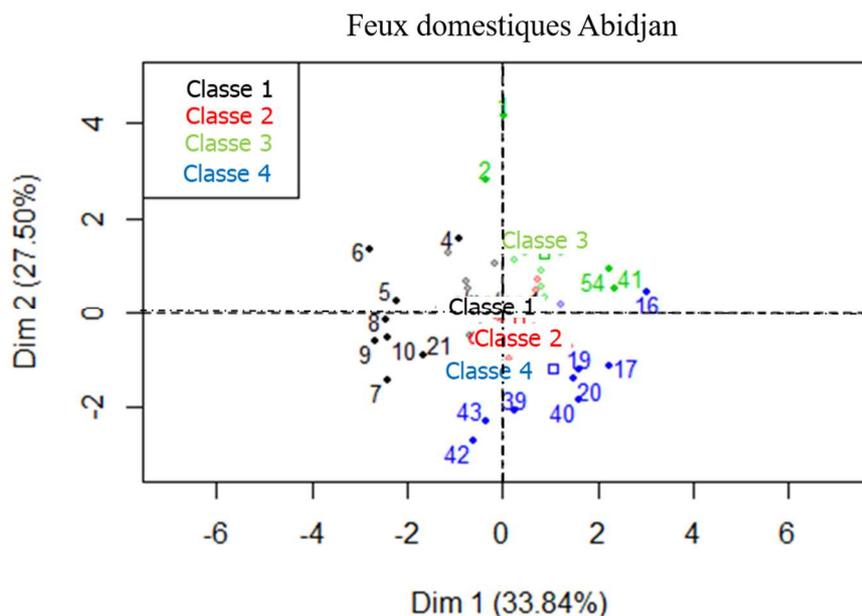
- Feux domestiques Abidjan : N° 3, 12, 13, 14, 15, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 36, 44, 45, 46, 47 et 48.
- Trafic Abidjan : N° 2, 3, 6, 7, 8, 10, 15, 17, 22, 27, 32, 33, 40, 45.
- Feux de décharge Abidjan : N° 4, 5, 6, 11, 12, 16, 17, 22, 32, 35, 48, 52, 53, 54.
- Trafic Cotonou : N° 6, 8, 12, 14, 15, 17, 22, 23, 29, 34, 35, 47

Dans les figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4, les individus libellés sont ceux ayant la plus grande contribution à la construction du plan.

### III.3.1.1. Représentation des prélèvements du site feux domestiques d'Abidjan dans le plan principal

Le tableau III.6 indique que les 2 premiers axes de l'ACP (Dim1 et Dim 2) expriment 61,35 % de l'inertie totale du jeu de données ; cela signifie que 61,35 % de la variabilité totale du nuage des prélèvements réalisés sur le site feux domestiques est représentée dans ce plan. Cette valeur est supérieure à la valeur référence au quantile à 95 % qui est de 55,83 %. Cependant, l'ébouilissement de valeurs propres fait apparaître qu'il faudrait tenir compte du troisième axe pour l'interprétation des certains polluants.

La classification réalisée sur l'ensemble des prélèvements fait apparaître 4 classes ou cluster représentées sur la figure 3.1 par des couleurs différentes.



**Figure 3.1:** Répartition et classification des prélèvements de polluants du site feux domestiques d'Abidjan dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.

- la classe 1 est composée des prélèvements tels que 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 21. Ce groupe est caractérisé par de faibles valeurs pour les polluants NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> et HNO<sub>3</sub> (de la plus extrême à la moins extrême). Les individus de ce groupe sont représentés en noir sur la figure 3.1.
- la classe 2 est constituée des prélèvements représentés en rouge et partageant de fortes

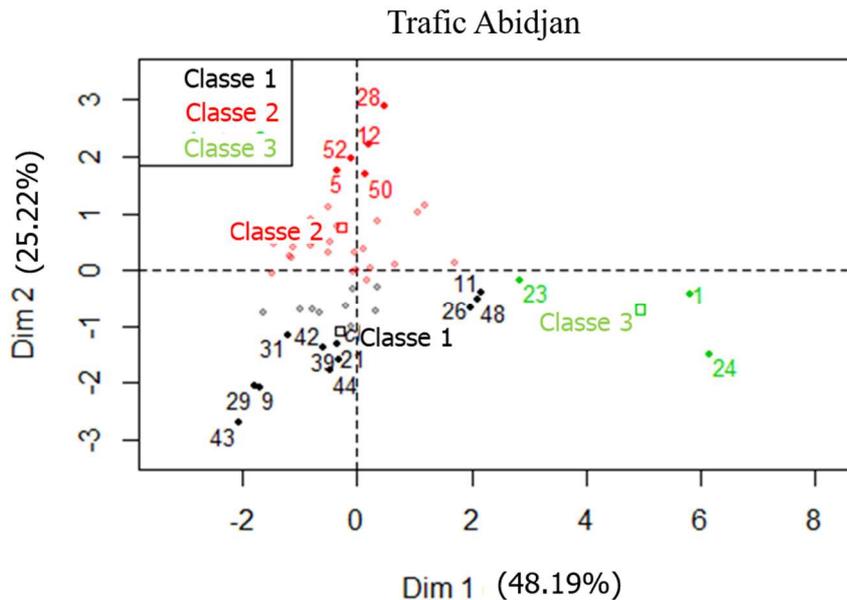
valeurs de  $\text{NH}_3$ .

- la classe 3 est composée des prélèvements tels que 1, 2, 41 et 54. Ce groupe est représenté en vert et est caractérisé par de fortes valeurs pour les polluants  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_2$  (de la plus extrême à la moins extrême).
- la classe 4 est composée des prélèvements tels que 16, 17, 19, 20, 39, 40, 42 et 43. Ce groupe, représenté en bleu est caractérisé par :
  - de fortes valeurs de  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_2$  (de la plus extrême à la moins extrême).
  - de faibles valeurs de  $\text{HNO}_3$  et  $\text{O}_3$  (de la plus extrême à la moins extrême).

### **III.3.1.2. Représentation des prélèvements du site trafic d'Abidjan dans le plan principal**

Les 2 premiers axes de l'ACP expriment 73,41 % de l'inertie totale du jeu de données (tableau III.6). Cela signifie que 73,41 % de la variabilité totale du nuage des prélèvements est représentée dans ce plan. Cette valeur supérieure à la valeur référence qui est de 55,3 % au quantile 0,95 montre que le plan principal (Dim 1, Dim 2) représente bien la variabilité contenue dans une très large part du jeu de données actif. La classification réalisée sur les prélèvements de polluants sur le trafic d'Abidjan fait apparaître 3 classes d'individus représentées sur la figure 3.2 par les couleurs noire, rouge et verte respectivement pour les classes 1, 2 et 3. Les caractéristiques des différentes classes sont présentées ci-dessous :

- la classe 1 est composée de prélèvements ayant de faibles concentrations de  $\text{O}_3$  et  $\text{HNO}_3$ . On y retrouve les prélèvements tels que 9, 11, 21, 26, 29, 31, 39, 42, 43 et 44.
- la classe 2 est constituée des prélèvements tels que 5, 12, 36, 50 et 52 est caractérisée par :
  - de fortes concentrations de  $\text{O}_3$  et  $\text{HNO}_3$  (de la plus extrême à la moins extrême).
  - de faibles concentrations de  $\text{NH}_3$ .
- la classe 3 est caractérisée par de fortes concentrations de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$  (de la plus extrême à la moins extrême).



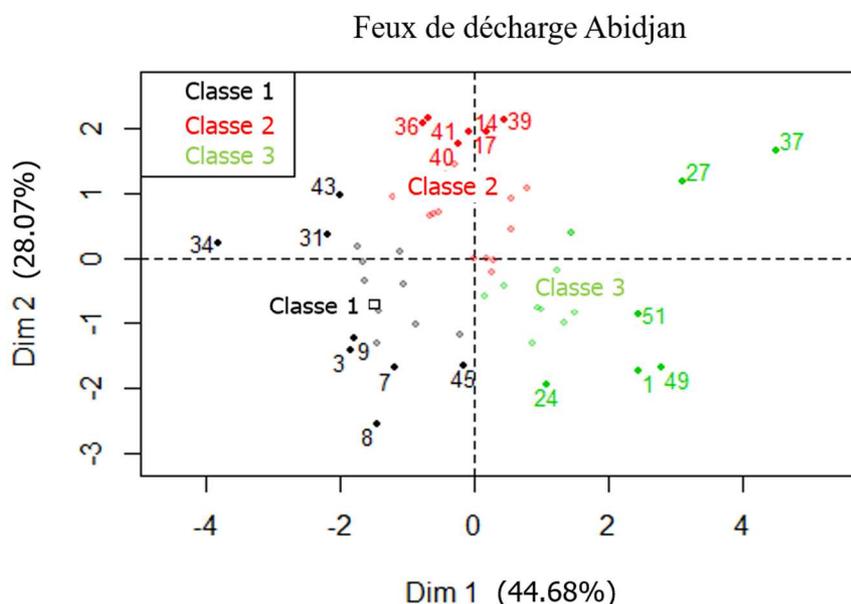
**Figure 3.2:** Répartition et classification des prélèvements des polluants du site trafic d'Abidjan dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.

### III.3.1.3. Représentation des prélèvements du site feux de décharge d'Abidjan dans le plan principal

L'ACP réalisée sur le jeu de données collectées sur le site feux de décharge d'Abidjan ne révèle aucun évènement singulier. Les composantes du plan principal révèlent un taux d'inertie de 72,79 % qui est supérieur à celui du quantile 0,95 de distributions aléatoires (55,7 %). Cette observation suggère que seuls ces axes sont porteurs d'une véritable information. En conséquence, la description de l'analyse sera restreinte à ces seuls axes. La classification réalisée sur les prélèvements de polluants du site feux de décharge fait apparaître 3 classes représentées à la figure 3.3 par les couleurs noire, rouge et verte respectivement pour les classes 1, 2 et 3.

- la classe 1 est composée des prélèvements ayant de faibles concentrations de  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{O}_3$ . C'est le cas pour les prélèvements tels que 3, 7, 8, 9, 31, 34, 43 et 45.
- la classe 2 est caractérisée par :
  - de fortes concentrations de  $\text{SO}_2$  et  $\text{HNO}_3$  (de la plus extrême à la moins extrême).
  - de faibles concentrations de  $\text{NH}_3$ .

- la classe 3 est composée d'individus tels que 1, 24, 27, 37, 49 et 51 et est caractérisée par de fortes concentrations  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NH}_3$  et  $\text{HNO}_3$  (de la plus extrême à la moins extrême).



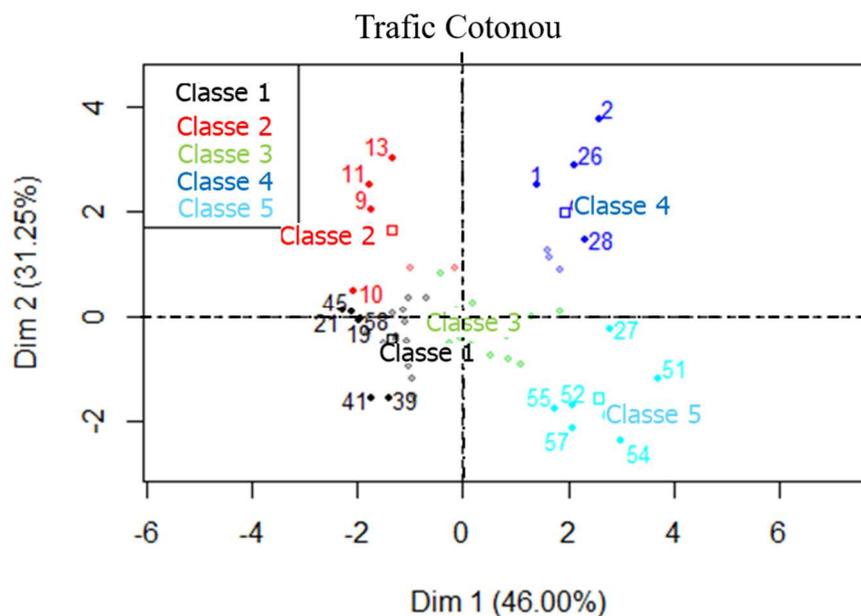
**Figure 3.3:** Répartition et classification des prélèvements du site feux de décharge d'Abidjan dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.

#### III.3.1.4. Représentation des prélèvements du site trafic de Cotonou dans le plan principal

L'estimation du nombre pertinent d'axes à interpréter suggère de restreindre l'analyse à la description des 2 premiers axes (Dim 1 et Dim 2). Ces composantes révèlent un taux d'inertie supérieur (77,29 %) à celle du quantile à 95 % de distributions aléatoires qui est de 55,1 %. Cette observation suggère que seuls ces axes sont porteurs d'une véritable information. En conséquence, la description de l'analyse sera restreinte à ces seuls axes. La représentation et la classification des prélèvements des polluants sur le site trafic de Cotonou sont représentées à la figure 3.4. La classification réalisée fait apparaître 5 classes :

- la classe 1 est représentée en noir et constituée des prélèvements tels que 19, 21, 39, 41, 45 et 58. Elle est caractérisée par de faibles concentrations de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  et  $\text{HNO}_3$  (de la plus extrême à la moins extrême).
- la classe 2 est composée des prélèvements tels que 9, 10, 11 et 13. Elle est représentée en rouge est caractérisé par :
  - de fortes concentrations de  $\text{NH}_3$ .
  - de faibles concentrations de  $\text{HNO}_3$  et  $\text{SO}_2$  (de la plus extrême à la moins extrême).

- la classe 3 est composé de prélèvements partageant des polluants dont les concentrations ne diffèrent pas significativement de la moyenne. Elle est représentée en vert
- la classe 4 est composée d'individus tels que 1, 2, 26 et 28 qui ont de fortes concentrations de NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> et SO<sub>2</sub> (de la plus extrême à la moins extrême).
- la classe 5 est représentée en bleu ciel. Elle est constituée des prélèvements tels que 27, 51, 52, 54, 55 et 57. Ces prélèvements sont caractérisés par de fortes concentrations de HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub> et SO<sub>2</sub>.



**Figure 3.4:** Répartition et classification des prélèvements du site trafic de Cotonou dans le plan factoriel formé des axes principaux Dim 1 et Dim 2.

### III.3.2. Caractérisation des sources de pollution et études des corrélations entre les différents polluants.

A ce stade de notre travail, nous explorerons les relations entre les polluants et essayerons d'identifier les sources potentielles des polluants à travers l'étude des cercles de corrélations. Les axes principaux définis permettront d'identifier les sources majeures de pollution sur chacun des sites. Dans ce qui suit, nous identifierons la source d'émission d'un polluant à partir de sa contribution à la construction de l'axe et de la qualité de sa représentation sur l'axe. On rappelle que la qualité de la représentation d'un polluant sur un axe principal est le cosinus carré de l'angle formé par le polluant et son projeté sur l'axe. Nous utiliserons aussi les coefficients de corrélation de Pearson pour estimer les relations linéaires entre tous les

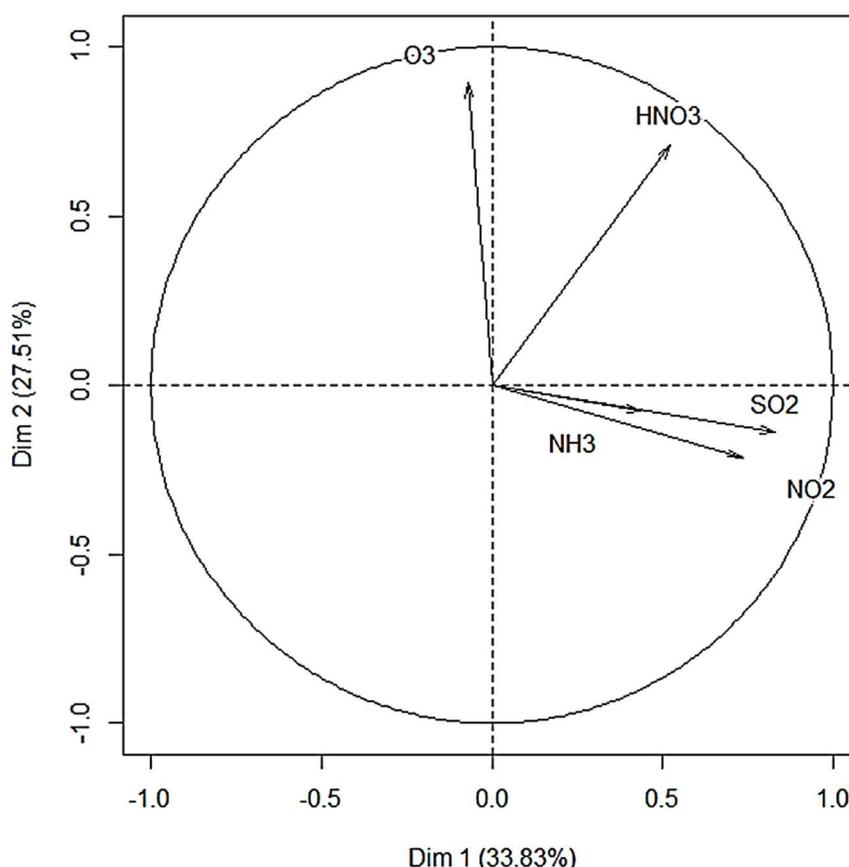
polluants. Les coefficients de corrélation ont été calculés à l'aide du logiciel R et seront présentés dans des matrices de corrélation pour chacun des sites. L'application du test de Pearson au seuil de significativité de 5 % nous permettra de dégager les corrélations les plus significatives. Les analyses se feront site par site.

### III.3.2.1. Caractérisation des sources sur le site feux domestiques d'Abidjan

Les résultats détaillés de l'ACP sur les valeurs propres, les variables et les individus pour le site feux domestiques d'Abidjan, sont présentés dans le document 1 en annexe II. La figure 3.5 présente le cercle de corrélation projetant les polluants mesurés sur le site feux domestiques dans le plan principal. Les coefficients de corrélations entre les polluants ont aussi été calculés et sont représentés par la matrice de corrélation du tableau III.7.

Pour le site feux domestiques, on remarque sur la figure 3.5 la présence de deux groupes de polluants. D'une part, on a  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$  et d'autre part,  $\text{O}_3$  et  $\text{HNO}_3$ . Ce résultat laisse penser à la présence de deux sources majeures de pollution sur ce site qui pourraient être le trafic routier et la pollution photochimique par l'ozone. En effet, la forte proximité entre  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_2$  et le premier axe principal semble montrer que ce dernier est caractéristique de la source trafic.  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_2$  étant tous les deux des traceurs de la source trafic et l'angle entre les deux étant suffisamment faible on pourrait supposer une forte corrélation entre eux. Le tableau de corrélation III.7 montre qu'il existe des corrélations entre tous les polluants mais que les plus significatives au seuil de 5 % sont celles dont le coefficient de corrélation est supérieur à 0,27 ( $r > 0,27$ ). On constate que seuls  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_2$  d'une part,  $\text{O}_3$  et  $\text{HNO}_3$  d'autre part sont significativement corrélés avec  $r = 0,46$  et  $r = 0,39$  respectivement. On peut donc conclure que  $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$  sont issus de la même source qui est le trafic routier. Le site feux domestiques est donc sous l'influence de la source trafic à proximité.

### Site feux domestiques Abidjan



**Figure 3.5:** Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site feux domestiques d'Abidjan.

**Tableau III.7:** Matrice des corrélations entre les polluants gazeux collectés sur le site feux domestiques d'Abidjan. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).

	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	1,00				
NH <sub>3</sub>	0,04	1,00			
HNO <sub>3</sub>	0,18	0,14	1,00		
SO <sub>2</sub>	<b>0,46</b>	0,23	0,24	1,00	
O <sub>3</sub>	-0,15	-0,10	<b>0,39</b>	-0,12	1,00

O<sub>3</sub> et HNO<sub>3</sub> proviennent eux aussi d'une source commune qui pourrait être l'oxydation photochimique. En effet, la contribution de O<sub>3</sub> à la construction du deuxième axe principal est de 58,3 % et sa qualité de représentation est égale à 0,8. Cela fait de O<sub>3</sub> le polluant majeur issu de l'oxydation photochimique. L'ozone étant un traceur de la pollution photochimique dans les basses couches de l'atmosphère, on peut considérer que le second axe principal permet de

mettre en évidence cette source de pollution.  $\text{HNO}_3$  contribue à 36,78 % à la construction de cet axe et la qualité de sa projection est 0,5.  $\text{O}_3$  et  $\text{HNO}_3$  contribuent pour 95 % à la formation de cet axe. Ce sont donc pratiquement les seuls polluants issus des processus photochimiques. Le lien entre ces polluants est confirmé par le coefficient de corrélation significatif qui existe entre eux ( $r = 0,39$ ).  $\text{HNO}_3$  et  $\text{O}_3$  étant des polluants secondaires on peut estimer qu'ils sont produits dans un même système chimique.

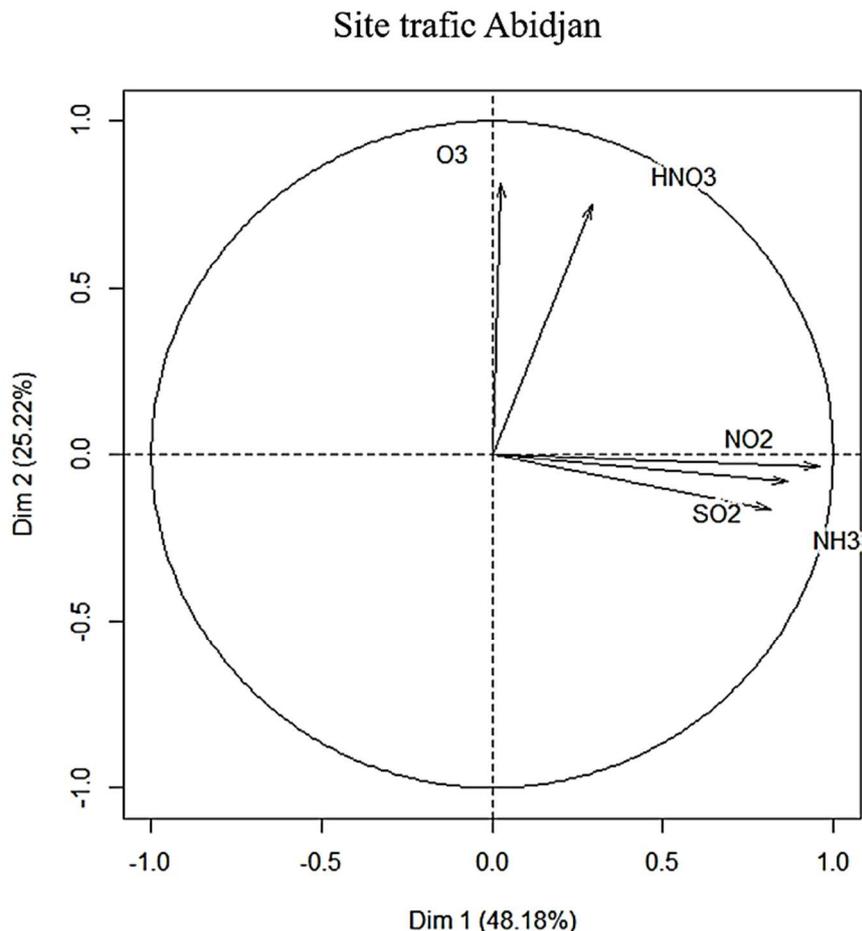
L'étude des matrices de corrélation montre aussi que  $\text{NH}_3$  n'a aucune corrélation significative avec les autres polluants. En effet,  $\text{NH}_3$  étant aussi représenté proche du premier axe, on pourrait aussi penser qu'il est issu du trafic. Cependant en regardant la contribution de  $\text{NH}_3$  à la construction du premier axe principal (11,22 %) et la qualité de sa projection sur cet axe (0,19) qui est loin de 1, on se rend compte que ces 2 paramètres de qualité sont faibles. Ce qui signifie que l'angle entre  $\text{NH}_3$  et l'axe est grand et donc par conséquent  $\text{NH}_3$  ne peut être issu du trafic.  $\text{NH}_3$  est encore plus faiblement lié au deuxième axe principal (Dim 2) avec une contribution de 0,44 % à la construction de cet axe et une qualité de projection de 0,006. Au total, la qualité de la représentation de  $\text{NH}_3$  dans le plan principal est 0,196.  $\text{NH}_3$  est donc très mal projeté dans ce plan et sa source d'émission n'est pas le trafic routier encore moins l'oxydation photochimique. En regardant le troisième axe Dim 3, on se rend compte qu'il a une variance de 0,968 représentant 19,37 % de l'information contenue dans le jeu de donnée disponible sur ce site.  $\text{NH}_3$  contribue à 78 % à sa construction et  $\text{NO}_2$  à 21 %. La qualité de la représentation de  $\text{NH}_3$  sur cet axe est de 0,76. Ceci met en lumière une autre source de pollution autre que celles identifiées précédemment. C'est la source feux domestiques. On se rend compte que sur le site feux domestiques, la source feux domestiques émet principalement  $\text{NH}_3$  et  $\text{NO}_2$ . Le  $\text{NO}_2$  mesuré sur le site feux domestiques a donc une double origine (le trafic routier et les feux domestiques) et on peut estimer à 21 % la contribution de la source feux domestiques aux concentrations moyennes de  $\text{NO}_2$  mesurées sur ce site.

### **III.3.2.2. Caractérisation des sources sur le site trafic d'Abidjan**

Les résultats détaillés de l'ACP sur les valeurs propres, les variables et les individus pour le site trafic d'Abidjan, sont présentés dans le document 2 en annexe II. La figure 3.6 présente la projection des polluants collectés sur le site trafic d'Abidjan dans le plan principal. La matrice de corrélation entre les polluants est présentée dans le tableau III.8. L'analyse du cercle de corrélation de la figure 3.6 permet d'identifier deux groupes de polluants aux caractéristiques similaires sur le site trafic d'Abidjan. D'une part, on a  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$  et

d'autre part, on a  $O_3$  et  $HNO_3$ . La qualité de la représentation de  $NO_2$  sur le premier axe est 0,92 et sa contribution est de 38%.  $NO_2$  est donc très bien représenté et se confond presque avec le premier axe. En projetant  $NO_2$  sur le deuxième axe principal on constate qu'il ne contribue qu'à 0,1 % à sa construction et la qualité de sa représentation est 0,001.  $NO_2$  n'est donc lié qu'avec le premier axe principal et ne peut donc être émis par deux sources.  $NO_2$  étant un traceur de la source trafic, on peut estimer que le premier axe permet de mettre en évidence cette source de pollution. Pour confirmer cette hypothèse, nous allons regarder la contribution de  $SO_2$  à la construction de cet axe. On rappelle que  $SO_2$  est aussi un autre traceur de cette source. Cet axe nous permet de constater que  $SO_2$  contribue pour 31 % et que la qualité de la projection est 0,75.  $SO_2$  est donc aussi très lié à cet axe et donc émis aussi par la source trafic sur ce site.  $NO_2$  et  $SO_2$  participent pour 69 % à la construction du premier axe principal. Ce qui laisse envisager que la source trafic émette encore un autre polluant. Au regard des résultats obtenus pour  $NH_3$ , on constate que sa contribution est de 27,45 % et que la qualité de sa projection est 0,66.  $NH_3$  est donc aussi un polluant émis par la source trafic sur ce site d'Abidjan. Les liens entre les polluants peuvent être confirmés à travers l'étude de la matrice de corrélation du tableau III.8. On remarque que les corrélations les plus significatives au seuil de 5 % sont celles existant entre  $NO_2$  et les deux autres polluants. En effet, le coefficient de corrélation entre  $NO_2$  et  $SO_2$  est  $r = 0,79$  et celui entre  $NO_2$  et  $NH_3$  est  $r = 0,74$ . Cela montre que  $NO_2$  est le polluant majeur émis par la source trafic routier et que  $SO_2$  et  $NH_3$  sont également émis par cette source. Ces trois polluants représentent 97 % des émissions de polluants causées par la source trafic sur ce site.

Le deuxième groupe de polluants est constitué de  $O_3$  et  $HNO_3$ .  $O_3$  est le principal contributeur à la formation du deuxième axe principal. En effet,  $O_3$  contribue pour 52,5 % à la construction de cet axe et la qualité de sa projection est 0,66. Cet axe représente donc l'oxydation photochimique car l'ozone en est un traceur. Cependant, bien que  $O_3$  soit convenablement représenté par cet axe, sa contribution de 52,5 % laisse penser que cette source émet d'autres polluants. En regardant la contribution de  $HNO_3$  (44,74 %) et la qualité de sa projection sur le deuxième axe (0,56), on peut affirmer qu'il est aussi issu du même processus conduisant à la formation de  $O_3$ .  $O_3$  et  $HNO_3$  contribuent ensemble pour 97,25 % à la formation du deuxième axe et donc sont les principaux polluants issus des processus de transformation photochimique. Cela se confirme par le coefficient de corrélation entre  $O_3$  et  $HNO_3$  qui est  $r = 0,28 > 0,27$  et qui montre qu'ils sont significativement corrélés.



**Figure 3.6:** Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site trafic d'Abidjan.

**Tableau III.8:** Matrice des corrélations entre les polluants gazeux collectés sur le site trafic d'Abidjan. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).

	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	1,00				
NH <sub>3</sub>	<b>0,74</b>	1,00			
HNO <sub>3</sub>	0,22	0,03	1,00		
SO <sub>2</sub>	<b>0,79</b>	<b>0,50</b>	0,19	1,00	
O <sub>3</sub>	0,01	0,00	<b>0,28</b>	-0,06	1,00

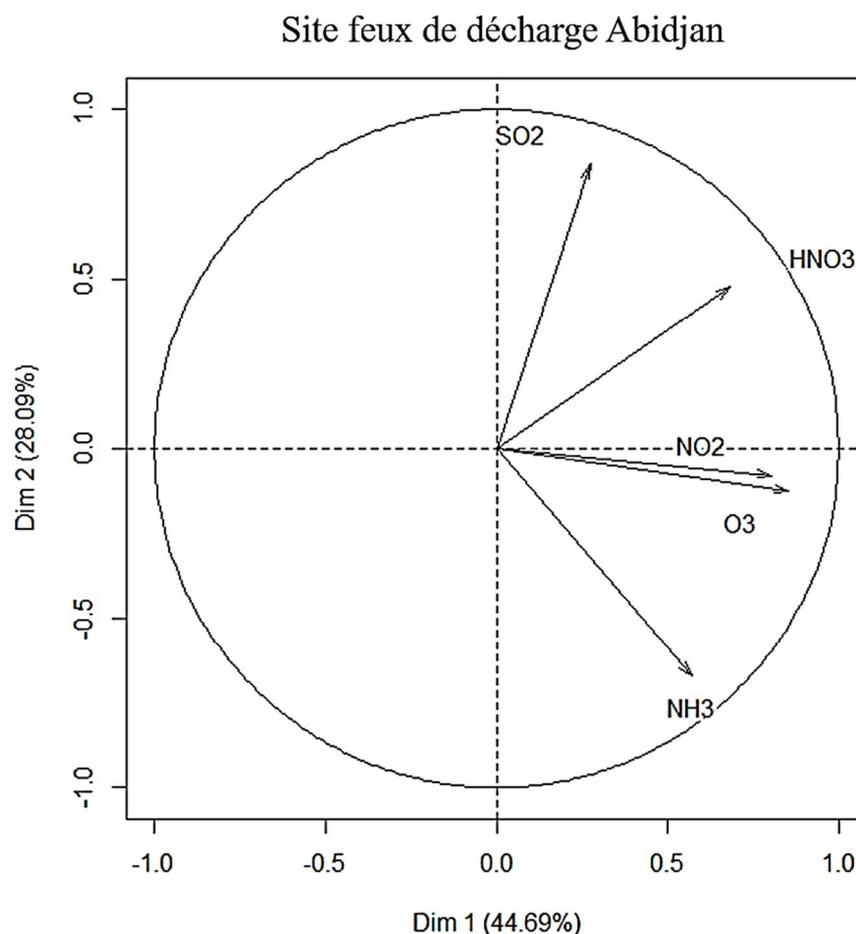
Cependant, en regardant les qualités de représentation de O<sub>3</sub> (0,66) et HNO<sub>3</sub> (0,56) et leur coefficient de corrélation ( $r = 0,28$ ) qui sont tout juste au-dessus des seuils sur l'axe Dim 2, nous avons investigué le troisième axe Dim 3. On s'est rendu compte que ces deux polluants contribuent pour 81 % à la formation de Dim 3 mais qu'ils étaient mal projetés sur cet axe avec

0,31 et 0,3 respectivement pour  $O_3$  et  $HNO_3$ . Ce qui laisse penser qu'il existe une autre source de faible production de ces deux polluants sur le site trafic. Des études ont montré que  $HNO_3$  pouvait être aussi émis directement mais en faible quantité par des moteurs diesel (Deletraz et al., 2002; Harris et al., 1987; Okamoto et al., 1983) ce qui corrobore notre analyse précédente.

### III.3.2.3. Caractérisation des sources sur le site feux de décharge d'Abidjan

Les résultats détaillés de l'ACP sur les valeurs propres, les variables et les individus pour le site feux de décharge d'Abidjan, sont présentés dans le document 3 en annexe II. Le cercle de corrélation de la figure 3.7 présente la projection des polluants gazeux collectés sur le site de la décharge d'Akouédo (Abidjan) dans le plan principal. Il faut noter avant tout que le site de la décharge d'Akouédo est situé à une hauteur d'environ 12 m et à une distance de près de 200 m du site de brûlage des ordures. Le tableau III.9 représente la matrice de corrélations entre les polluants.

L'analyse du premier axe (Dim 1) du cercle de corrélation montre que  $O_3$  et  $NO_2$  sont les polluants majeurs de cet axe. En effet, ils contribuent le plus à la formation du premier axe respectivement à hauteur de 32,52 % et 28,85 %. Ces 2 polluants sont aussi parfaitement projetés sur ce premier axe principal. La qualité de la représentation de  $O_3$  et  $NO_2$  qui est respectivement 0,85 et 0,8, laisse penser que ces deux polluants proviennent d'une source commune et cela se confirme par la forte corrélation ( $r = 0,55$ ) qui existe entre eux. On peut donc dire que la formation de l'ozone sur ce site est étroitement liée à un régime dépendant des concentrations de  $NO_x$  et on pourrait associer ce premier axe à la source de pollution photochimique.  $O_3$  et  $NO_2$  constituent 61,37 % des émissions de cette source. Il existe donc d'autres polluants émis par la source pollution photochimique. Les résultats nous montrent aussi que  $HNO_3$  contribue pour 20,77 % à la construction de Dim 1 et que la qualité de sa projection sur cet axe est 0,46. Le coefficient de corrélation entre  $HNO_3$  et  $O_3$  est  $r = 0,5$  et entre  $HNO_3$  et  $NO_2$  est  $r = 0,33$ .  $HNO_3$  est donc un polluant issu de la pollution photochimique mais la qualité de sa représentation indique qu'il pourrait provenir aussi d'une autre source. En effet, la rose des vents de la ville d'Abidjan indique une prédominance des vents en provenance du Sud-Ouest et se dirigeant vers le Nord-Est de la ville où se trouve la décharge. Les précurseurs de  $HNO_3$  et  $O_3$  sont transportés dans les masses d'air où ils subissent un vieillissement et viennent s'ajouter aux polluants produits localement. En somme  $O_3$ ,  $NO_2$  et  $HNO_3$  représentent 80,14 % des polluants résultant des transformations photochimiques sur le site feux de décharge d'Akouédo.



**Figure 3.7:** Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site feux de décharge d'Abidjan.

**Tableau III.9:** Matrice des corrélations entre les polluants gazeux collectés sur le site feux de décharge d'Abidjan. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).

	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	1,00				
NH <sub>3</sub>	<b>0,43</b>	1,00			
HNO <sub>3</sub>	<b>0,33</b>	0,07	1,00		
SO <sub>2</sub>	0,20	-0,26	0,40	1,00	
O <sub>3</sub>	<b>0,55</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>	0,07	1,00

Le deuxième axe principal Dim 2 permet d'identifier une deuxième source de pollution émettant SO<sub>2</sub> et NH<sub>3</sub>. En effet, SO<sub>2</sub> contribue pour 50 % à la formation de cet axe quand NH<sub>3</sub> y contribue pour 32 %. Le SO<sub>2</sub> et NH<sub>3</sub> sont bien représentés sur cet axe avec une qualité de représentation respective de 0,7 et 0,45. Ces deux polluants étant aussi issus tous deux de

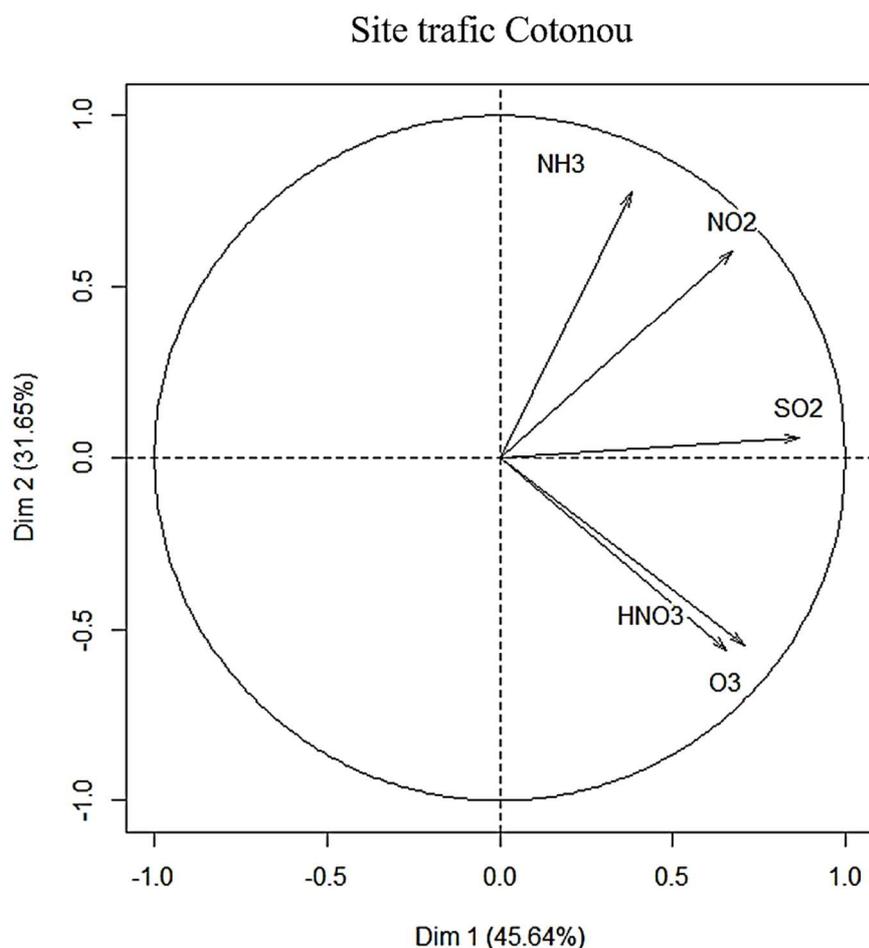
processus de combustion et  $\text{SO}_2$  étant peu corrélé à  $\text{NO}_2$  ( $r = 0,20 < 0,27$ ), on peut supposer que  $\text{SO}_2$  permet de mettre en évidence la source feux de décharge. Le deuxième axe peut donc être identifié comme la source feux de décharge. Cependant la mauvaise qualité de la représentation de  $\text{NH}_3$  sur cet axe ( $0,45 < 0,5$ ) laisse penser que  $\text{NH}_3$  est aussi émis par une autre source.

$\text{NH}_3$  est significativement corrélé à  $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_2$  avec respectivement  $r = 0,45$  et  $r = 0,43$ . Il existe donc un autre processus faisant intervenir  $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_2$  auquel participe  $\text{NH}_3$ .  $\text{HNO}_3$  est orthogonal à  $\text{NH}_3$ . Ce qui indique qu'il n'existe aucune corrélation linéaire entre ces deux polluants. Cependant ils peuvent intervenir dans des processus séparés conduisant à la formation de  $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_2$ .

La caractérisation des sources sur le site de la décharge s'avère très difficile compte tenu de la multiplicité des sources potentielles des polluants. En effet,  $\text{NH}_3$  peut être issu de la combustion des déchets végétaux et animaux mais aussi il peut être le résultat de la décomposition bactérienne de ces déchets. Le  $\text{SO}_2$  peut être émis aussi bien par les déchets que par les camions à moteur diesel qui viennent régulièrement déverser les ordures sur le site de la décharge.  $\text{HNO}_3$  et  $\text{O}_3$  peuvent être aussi bien produits localement ou être le résultat des transformations chimiques de leurs précurseurs qui sont transportés en direction du Nord Est depuis le centre-ville vers le site de la décharge. La présence de COV et particulièrement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) sur le site de la décharge peut également perturber la production d'ozone.

#### **III.3.2.4. Caractérisation des sources sur le site trafic de Cotonou**

Les résultats détaillés de l'ACP sur les valeurs propres, les variables et les individus pour le site trafic de Cotonou d'Abidjan sont présentés dans le document 4 de l'annexe II. Le cercle de corrélation de la figure 3.8 montre la projection des polluants dans le plan factoriel. Les coefficients de corrélation entre tous les polluants sont présentés dans le tableau III.10 et les corrélations les plus significatives au seuil de 5 % sont présentées en gras.



**Figure 3.8:** Cercle de corrélation des polluants gazeux sur le site trafic de Cotonou

**Tableau III.10:** Matrice des corrélations totales entre les polluants gazeux collectés sur le site trafic de Cotonou. Coefficients significatifs au seuil de 5 % en gras ( $r > 0,27$ ).

	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	1,00				
NH <sub>3</sub>	<b>0,57</b>	1,00			
HNO <sub>3</sub>	0,15	-0,10	1,00		
SO <sub>2</sub>	<b>0,57</b>	0,25	<b>0,50</b>	1,00	
O <sub>3</sub>	0,08	-0,07	<b>0,63</b>	<b>0,42</b>	1,00

L'analyse du cercle de corrélation permet de voir que SO<sub>2</sub> se confond pratiquement au premier axe principal. Il est donc pratiquement le principal polluant contribuant à la formation de l'axe sur le site trafic de Cotonou. Par rapport à l'ensemble des autres polluants, SO<sub>2</sub>

contribue pour 33 % à la construction de cet axe et la qualité de sa représentation est de 0,76. SO<sub>2</sub> apparaît donc comme le traceur de la source trafic à Cotonou. Il permet de mettre en évidence la spécificité du trafic à Cotonou. En effet, le trafic sur le site du marché Dantopka est principalement constitué d'engins à 2 roues fonctionnant avec des moteurs à 2 et 4 temps. Ces engins utilisent très souvent du carburant frelaté venu du Nigeria et vendu en dehors des stations-services au bord des routes. La teneur en soufre du carburant utilisé à Cotonou est très élevée. L'arrêté N°002 du 28 janvier 2013 du ministère de l'énergie de l'eau et des mines fixant les normes de qualité des produits pétroliers au Bénin indique que la teneur en soufre du gasoil et de l'essence est de 3500 ppm soit 70 fois la norme AFRI-4 pour le gasoil et 24 fois la norme AFRI-4 pour l'essence (Adjeniya et al., 2017). On rappelle que la norme AFRI-4 fixe à 50 ppm la teneur en soufre pour le gasoil et 150 ppm pour l'essence. On remarque aussi que NO<sub>2</sub> contribue pour 20 % à construction du premier axe et est assez bien corrélé à SO<sub>2</sub> avec un coefficient  $R^2 = 0,57$ . On peut en conclure que le premier axe représente bien la source trafic à Cotonou. SO<sub>2</sub> est aussi bien corrélé à HNO<sub>3</sub> ( $R^2 = 0,5$ ) qui a une contribution de 22 % et une qualité de représentation de 0,5. HNO<sub>3</sub> pourrait donc aussi un polluant issu du trafic. Les travaux de Malbreil en 1997 ont montré que les moteurs diesel pouvaient émettre directement de faibles quantités de HNO<sub>3</sub> (Deletraz, 2002; Harris et al., 1987; Okamoto et al., 1983).

Le deuxième axe (Dim 2) est construit essentiellement à partir de NH<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub> qui ont des contributions respectives de 37,5 % et 22,58 %. Cependant NH<sub>3</sub> est le seul polluant ayant une qualité de projection sur cet axe supérieure à 0,5. NH<sub>3</sub> étant issu de processus de combustion de biomasse, on pourrait penser que ce deuxième axe représente la source feux domestiques et que NH<sub>3</sub> en est le traceur. Le coefficient de corrélation entre NH<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub> ( $r = 0,57 > 0,27$ ) suggère que ces deux polluants proviennent de la même source.

Les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> sur ce site sont donc les résultats des émissions de 2 sources (le trafic routier et les feux domestiques).

On remarque aussi que sur ce deuxième axe, O<sub>3</sub> contribue pour 21,14 % mais que la qualité de sa représentation est faible (0,3). De plus O<sub>3</sub> n'est significativement corrélé à aucun des deux premiers polluants avec  $r = 0,07$  et  $r = 0,08$  respectivement pour NH<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub>. O<sub>3</sub> est donc issu d'un processus différent de celui conduisant à la formation de NH<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub>.

*Cette section a montré que les polluants gazeux de notre étude n'étaient pas indépendants et qu'il existe des relations entre eux. L'étude de ces relations à travers l'ACP et les matrices de corrélation a conduit à caractériser les principales sources de pollution sur chacun des sites DACCIWA ainsi qu'à évaluer leur contribution aux concentrations des polluants. Cette caractérisation des sources a conduit à l'identification des principales sources d'émissions des polluants qui sont le trafic routier, les feux domestiques, les feux de décharge et l'oxydation photochimique. La source industrielle qui est très présente sur certains sites n'a pas été étudiée dans ce travail. Cette étude a permis de confirmer que  $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$  sont les principaux polluants émis par la source trafic.  $\text{NH}_3$  est essentiellement émis par la source feux domestiques mais peut aussi provenir du trafic routier.  $\text{HNO}_3$  et  $\text{O}_3$  sont significativement corrélés sur tous les sites indiquant qu'ils proviennent tous deux des mêmes processus d'oxydation photochimiques. De plus, l'analyse ACP a montré qu'il pourrait exister des variations mensuelles et saisonnières des concentrations des polluants sur chacun des sites. L'objectif de la section qui suit sera d'étudier ces variations temporelles à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle.*

### **III.4. Etude des variations temporelles des concentrations des polluants gazeux**

Cette section est consacrée d'une part à l'étude des variations mensuelles et saisonnières des concentrations des polluants gazeux et d'autre part, elle établit une caractérisation moyenne des concentrations des polluants à Abidjan et Cotonou à travers une étude des concentrations annuelles et interannuelles. Les résultats obtenus dans ces deux villes seront ensuite comparés aux concentrations moyennes obtenues dans d'autres villes d'Afrique sur la même période d'étude.

#### **III.4.1. Variations des concentrations moyennes mensuelles et saisonnières des polluants gazeux**

Chacune des concentrations moyennes mensuelles obtenues pour chaque polluant est le résultat de la moyenne arithmétique des concentrations de 4 échantillons collectés en un mois. Pour chaque polluant, nous présenterons les variations des concentrations moyennes mensuelles sur chacun des sites DACCIWA par un graphe. Sur chaque graphe, les histogrammes bleus et verts représentent les cumuls mensuels des précipitations respectivement à Abidjan et Cotonou. Les courbes noires, violettes, rouges et oranges représentent respectivement les variations des concentrations moyennes mensuelles pour chaque polluant gazeux mesurées sur sites feux

domestiques, trafic, feux de décharge d'Abidjan et trafic de Cotonou. A partir des concentrations moyennes mensuelles et du découpage des saisons dans chaque ville, nous avons calculé pour chaque polluant, les concentrations moyennes saisonnières par site. Les résultats sont présentés aussi sous forme d'histogrammes dont le bleu représente la concentration moyenne en saison humide et l'orange en saison sèche. Pour tous les graphes suivants les sites seront référencés comme suit:

AFd : Abidjan feux domestiques

AT : Abidjan trafic

AD : Abidjan feux de décharge

CT : Cotonou

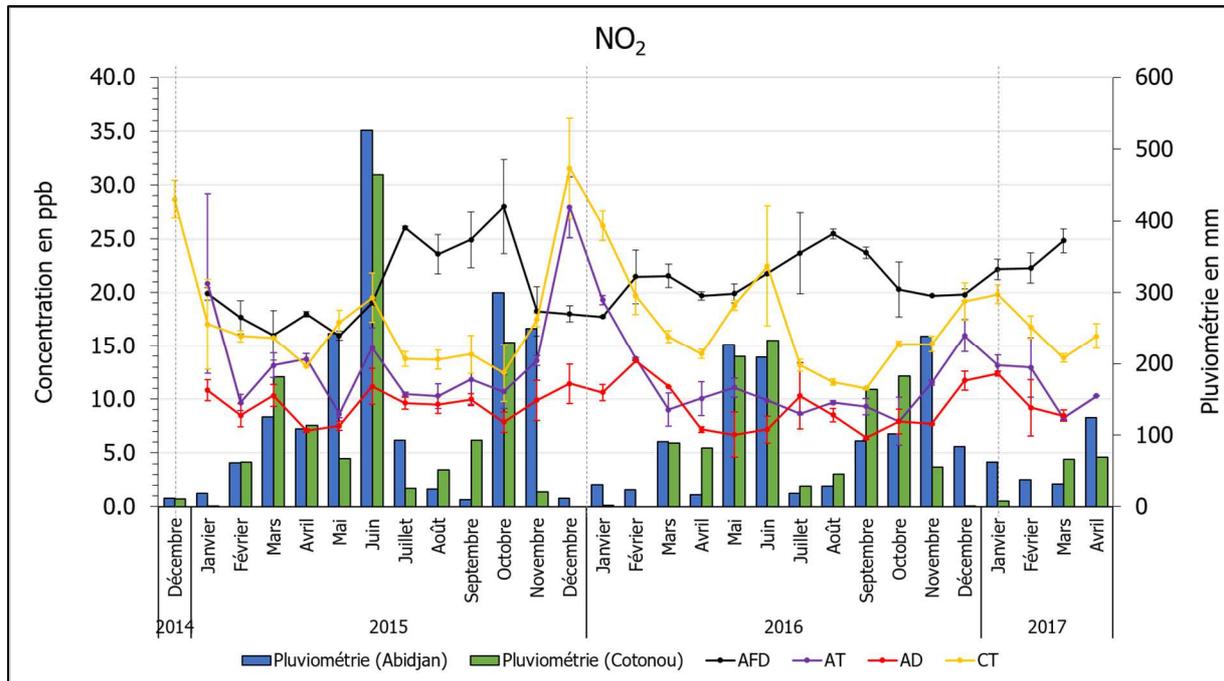
#### **III.4.1.1. Variations mensuelles et saisonnières du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)**

Les variations moyennes mensuelles de NO<sub>2</sub> sur tous les sites et les cumuls mensuels des précipitations sont présentés à la figure 3.9. Les concentrations moyennes saisonnières calculées pour chaque site sont présentées à la figure 3.10.

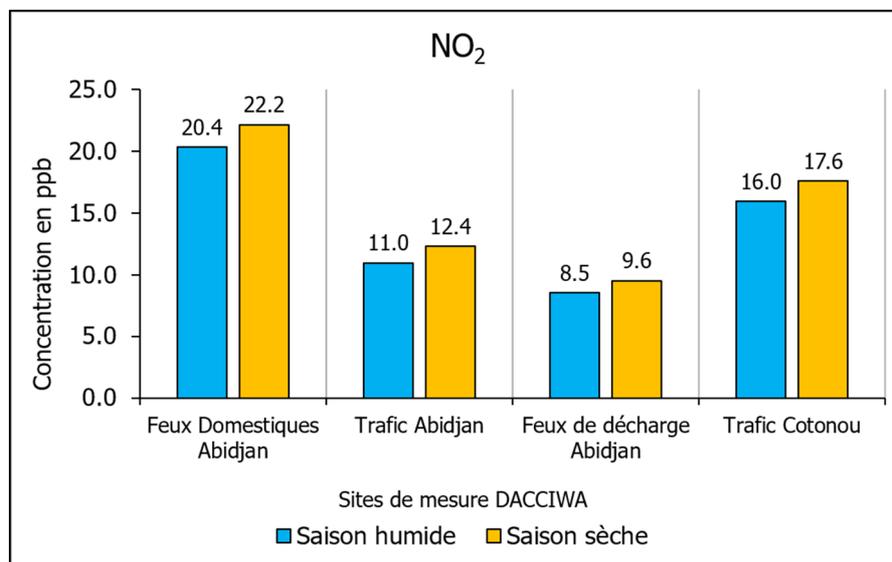
- ***Site feux domestiques d'Abidjan***

Les concentrations moyennes mensuelles de NO<sub>2</sub> fluctuent autour de 20 ppb et varient entre  $15,9 \pm 0,4$  ppb en Mai 2015 et  $28 \pm 4,4$  ppb en Octobre 2015. La principale source de pollution sur ce site est l'activité de fumage de poissons, de viandes et le grillage d'arachides à l'aide de bois de chauffe. Nous avons observé une augmentation de l'intensité de l'activité de fumage sur ce site avec l'installation de nouveaux fours entre 2015 et 2017. Les variations les plus importantes dans cette activité se font entre la matinée où les femmes s'activent pour approvisionner les marchés et l'après-midi où la plupart des foyers de fumage s'éteignent. Les capteurs passifs étant exposés sur deux semaines, il est difficile d'observer des variations notables des concentrations. Cependant, chaque année, on peut noter que les concentrations semblent être un peu plus élevées autour des mois de Juillet, Août, Septembre et autour des mois de Décembre, Janvier et Février où les précipitations sont assez faibles. Ces périodes correspondent aux 2 saisons sèches à Abidjan. Chaque année, pendant la petite saison sèche (Juillet – Septembre), les concentrations sont beaucoup plus élevées et sont supérieures à 20 ppb. L'étude des variations saisonnières montre que la concentration moyenne en saison humide est de 20,4 ppb et est de 22,2 ppb en saison sèche (figure 3.10) représentant une augmentation d'environ 10 %. En saison sèche, l'atmosphère est peu lessivée par les pluies

entraînant ainsi une accumulation des polluants gazeux dans l'air. Cette accumulation pourrait justifier les concentrations un peu plus élevées en saison sèche.



**Figure 3.9:** Evolution mensuelle des concentrations moyennes du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 2015 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.



**Figure 3.10:** Concentrations moyennes saisonnières du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou

- ***Site trafic d'Abidjan***

Les concentrations moyennes mensuelles de NO<sub>2</sub> sur le site Trafic d'Adjamé Liberté varient entre  $7,9 \pm 2,3$  ppb en Octobre 2016 et  $27,9 \pm 2,9$  ppb en Décembre 2015. Les variations des concentrations moyennes semblent montrer une structure bimodale avec un pic au mois de Mai ou Juin (15 ppb) et un deuxième pic plus important au mois de Décembre. Hormis les mois de Décembre où les concentrations mensuelles sont supérieures à 15 ppb, toutes les concentrations de NO<sub>2</sub> obtenues de Janvier à Novembre oscillent autour de 10 ppb et varient de  $7,9 \pm 2,3$  ppb à  $14,8 \pm 1,9$  ppb (figure 3.9). Les concentrations les plus importantes ont été obtenues en saison sèche avec une faible variabilité saisonnière. La concentration moyenne de NO<sub>2</sub> en saison humide est de 11,02 ppb et de 12,35 ppb en saison sèche (figure 3.10) représentant une augmentation de 12 %. Cette faible variabilité pourrait s'expliquer par la faible variation de la source. En effet, le site trafic d'Adjamé se caractérise par un trafic routier incessant tout au long des journées et toute l'année. Il est situé en face d'une gare de véhicules de transport en commun communément appelés « gbakas » qui desservent tous les quartiers de la commune de Yopougon. Des pics d'activité sont observés pendant les périodes de fêtes en Décembre et Janvier où les embouteillages sont plus importants et durent plus longtemps. Cette faible variabilité saisonnière montre une présence plus marquée de la source locale. Le NO<sub>2</sub> qui pourrait être issu du transport atmosphérique des polluants semble être en faible proportion et insuffisant pour que des variations saisonnières puissent être observées sur le site trafic d'Abidjan.

- ***Site feux de décharge d'Abidjan***

Les concentrations moyennes mensuelles se situent globalement autour de 10 ppb. On peut remarquer sur la figure 3.9 que, sur toute la période d'étude (2014-2017), la plus faible concentration mensuelle de NO<sub>2</sub> a été mesurée au mois de Septembre 2016 ( $6,4 \pm 0,2$  ppb) et la plus forte concentration au mois de Février 2016 (13,6 ppb). Les concentrations moyennes saisonnières présentées à la figure 3.10 montrent aussi une faible variabilité saisonnière. La concentration moyenne de NO<sub>2</sub> en saison humide sur le site d'Akouédo est de 8,5 ppb tandis qu'elle est de 9,6 ppb en saison sèche. Cela représente une augmentation de 11,94 % de la concentration moyenne de la saison humide. La source locale constituée principalement des produits de la combustion et de la décomposition des déchets et impactée par les émissions des camions bennes à ordures ménagères semble être la plus importante sur ce site (cf. section

III.3.2.3). Ce site situé à la périphérie d'Abidjan est aussi éloigné du principal axe routier qui relie Abidjan à Bingerville.

- **Site trafic de Cotonou**

Les concentrations moyennes mensuelles de NO<sub>2</sub> sur le site trafic de Cotonou varient globalement entre  $11 \pm 0,1$  ppb en Septembre 2016 et  $31,6 \pm 4,7$  ppb en Décembre 2015. Ces concentrations moyennes mensuelles présentent des variations similaires au site trafic d'Abidjan avec une structure bimodale. Chaque année, un premier pic est observé au mois de Juin et un deuxième un peu plus important au mois de Décembre. Le premier pic intervient en Juin où le cumul mensuel de la pluviométrie est maximal. Ceci pourrait être dû soit aux embouteillages créés par les pluies abondantes, soit à la combustion incomplète du bois en saison humide. En effet, comme indiqué à la section 3.3.2.4, ce site est impacté par la source feux domestiques qui émet aussi du NO<sub>2</sub>. Les combustibles utilisés (bois et charbon de bois) sont généralement plus humides et émettent davantage de polluants gazeux. En Décembre où le cumul mensuel de la pluviométrie est le plus faible et inférieure à 100 mm, les concentrations de NO<sub>2</sub> atteignent un deuxième maximum. Ici, les concentrations élevées sont dues à l'augmentation du trafic routier et aux embouteillages pendant les fêtes de fin d'année. Il faut ajouter aussi que le NO<sub>2</sub> émis a tendance à stagner un peu plus longtemps dans l'atmosphère à cause des températures plus élevées en saison sèche (Hori et al., 2002). L'étude des variations saisonnières de NO<sub>2</sub> montre qu'en saison humide, la concentration moyenne est de  $16 \pm 2,8$  tandis qu'elle est de  $17,6 \pm 3,7$  ppb en saison sèche.

*On remarque que sur les 4 sites DACCIWA d'Abidjan et de Cotonou, les concentrations moyennes mensuelles de NO<sub>2</sub> sont globalement plus importantes sur le site feux domestiques d'Abidjan suivi du site trafic de Cotonou elles varient respectivement de  $15,9 \pm 0,4$  ppb à  $28 \pm 4,4$  ppb et de  $11 \pm 0,1$  ppb à  $31,6 \pm 4,7$  ppb. Les variations des concentrations sur les sites trafic d'Abidjan et de Cotonou et sur le site feux de décharge d'Abidjan présentent des allures similaires contrairement au site feux domestiques. Les concentrations moyennes mensuelles observées sur le site feux domestiques sont près de deux fois supérieures à celles obtenues sur les sites trafic et feux de décharge d'Abidjan. Les concentrations sur le site feux domestiques de Yopougon semblent être le fait de la combinaison de deux sources majeures de pollution par le NO<sub>2</sub> : Le trafic routier et les feux issus des processus de combustion de biomasse (comme montré par l'ACP). Il faut relever aussi que les prélèvements sur le site feux domestiques ont été faits à proximité de la source contrairement aux autres sites. De façon générale, les*

*variations saisonnières des concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> restent peu marquées sur tous les sites. On observe une augmentation des concentrations de la saison humide à la saison sèche allant de 10 % à 12%. Cette faible variation marque une influence plus importante des sources locales sur le niveau de concentration observé. Les NO<sub>x</sub> ont tendance à stagner dans l'atmosphère lorsque les températures sont plus élevées. C'est le cas en saison sèche où les températures avoisinent 30 °C. Le NO<sub>2</sub> qui pourrait être issu du transport atmosphérique des polluants provenant de sources lointaines reste donc limité.*

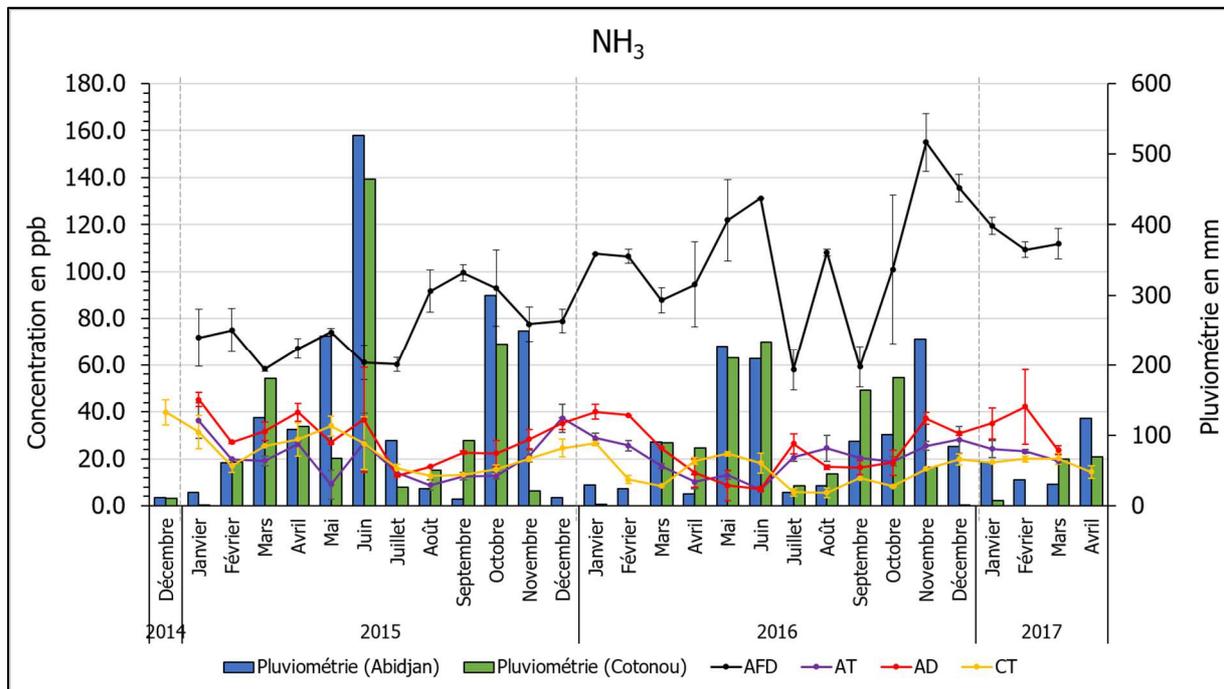
#### **III.4.1.2. Variations mensuelles et saisonnières de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>)**

Les variations moyennes mensuelles de NH<sub>3</sub> et de la pluviométrie pendant la période de l'étude sur tous les sites moyen-terme DACCIWA sont présentées à la figure 3.11. La figure 3.12 présente les concentrations moyennes saisonnières de NH<sub>3</sub> sur chaque site.

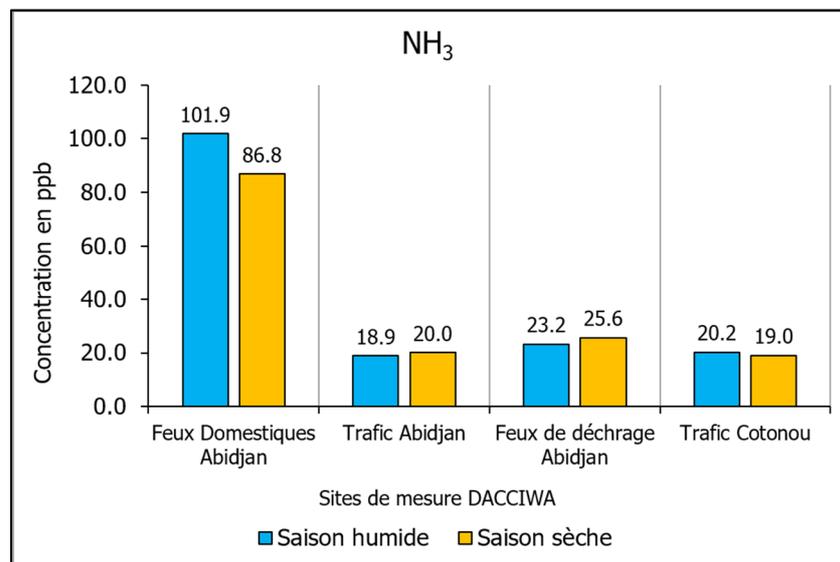
- **Site feux domestiques d'Abidjan**

Les concentrations moyennes mensuelles calculées sur le site feux domestiques de Yopougon sont particulièrement élevées tous les mois de la période étudiée. Elles varient entre  $58,1 \pm 8,6$  ppb en Juillet 2016 et  $155,1 \pm 12,3$  ppb en Novembre 2016. En moyenne sur la période de l'étude, les concentrations sont supérieures à 80 ppb et ont tendance à augmenter sans cesse à l'exception de deux faibles concentrations mesurées en Juillet et Septembre 2016. Cela pourrait être le fait de l'intensification de l'activité de fumage déjà évoquée précédemment (cf. section III.4.1.1). L'allure de la courbe des variations mensuelles ne semble pas indiquer de saisonnalité. Cependant la figure 3.12 présentant les variations saisonnières de NH<sub>3</sub> montre que la concentration moyenne en saison humide est plus importante et de l'ordre de 101,9 ppb. En saison sèche, on observe une diminution de 14,8 % avec une concentration moyenne de 86,8 ppb. L'importance de la concentration moyenne en saison humide pourrait s'expliquer par la combustion incomplète du bois de chauffe utilisé. En effet, le principal combustible utilisé par les fumeuses de denrées alimentaires est le bois d'hévéa. Celui-ci est conservé à l'air libre et pendant la saison pluvieuse, il est exposé aux intempéries (figure 3.13). Le bois ainsi exposé a une humidité qui augmente pendant cette saison pluvieuse. Lors du processus de combustion, l'augmentation du taux d'humidité du bois entraîne une émission importante de fumées et l'apparition de flammes est rare. Il y a donc peu de destruction des gaz combustibles et la combustion reste longtemps à l'étape de gazéification avec une température d'environ 250 °C. La combustion des gaz combustibles n'intervient que sous des températures supérieures à 300 °C (Vienne et Eyer, 2007). La combustion de l'azote (N) contenu dans le bois n'intervenant

que vers 650°C, on constate donc une libération importante de polluants et un accroissement des concentrations de NH<sub>3</sub> dans l'air.



**Figure 3.11:** Evolution mensuelle des concentrations moyennes de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.



**Figure 3.12:** Concentrations moyennes saisonnières de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.



**Figure 3.13:** Bois de chauffe exposés aux intempéries et stockés à proximité du site feux domestiques de Yopougon.

- ***Site trafic d'Abidjan***

Les concentrations moyennes mensuelles de  $\text{NH}_3$  mesurées sur le site trafic d'Adjamé varient autour de 20 ppb. Durant les 28 mois de l'étude, la plus forte concentration ( $37,3 \pm 6,0$  ppb) a été mesurée en Décembre 2015 et la plus faible ( $6,8 \pm 0,0$  ppb) en Juin 2016. La courbe de l'évolution mensuelle ne présente pas d'allure particulière (figure 3.11). On peut cependant noter que les concentrations les plus élevées sont obtenues chaque année au mois de Décembre, pendant les mois de la grande saison sèche avec une concentration moyenne de 20,0 ppb contre 18,9 ppb en saison humide, soit une décroissance de 6,15 % par rapport à la saison sèche. On retient de cette étude que la variation saisonnière de  $\text{NH}_3$  sur le site trafic est peu marquée.

- ***Site feux de décharge d'Abidjan***

Sur le site feux de décharge d'Akouédo, les concentrations moyennes mensuelles de  $\text{NH}_3$  sont comprises entre  $7,1 \pm 1,2$  ppb en Juin 2016 et  $45,3 \pm 3,1$  ppb en Janvier 2015. Nous avons aussi les concentrations les plus élevées en Décembre. L'étude saisonnière montre une concentration moyenne légèrement plus élevée de 10 % en saison sèche (25,6 ppb) qu'en saison humide (23,2 ppb).

- **Site trafic de Cotonou**

La courbe des variations mensuelles de  $\text{NH}_3$  à Cotonou montre chaque année deux pics. Le premier pic est obtenu en Mai et le deuxième pic en Décembre. Les concentrations moyennes varient globalement entre  $5,6 \pm 2,0$  ppb en Août 2016 et  $39,8 \pm 5,3$  ppb en Décembre 2014. L'étude des variations saisonnières n'a pas permis d'établir une réelle différence entre les concentrations moyennes saisonnières. Les concentrations moyennes sont de 20,2 ppb en saison humide et 19,0 ppb en saison sèche. On peut dire que les concentrations saisonnières sont sensiblement égales.

*En comparant les concentrations moyennes mensuelles de  $\text{NH}_3$  obtenues sur les quatre sites DACCIWA on constate que celles observées sur le site feux domestiques d'Abidjan sont quatre à cinq fois plus importantes que celles obtenues sur les autres sites. Ces fortes concentrations obtenues sur le site feux domestiques de Yopougon pourraient être le fait de la trop grande proximité qui existe entre le site de mesures et la source de pollution qui est la combustion du bois d'hévéa. On rappelle ici que le site de mesures est situé à moins de 5 m de la source et à une altitude d'environ 2,5 m. Sur le site feux de décharge d'Akouédo, les concentrations moyennes mensuelles sont relativement plus importantes que sur les sites trafic d'Abidjan et de Cotonou. Bien qu'étant continuellement le siège de combustion des résidus végétaux et de déchets de tout genre, le site de la décharge d'Akouédo présente des concentrations moins importantes que le site feux domestiques de Yopougon. Cela pourrait être le fait de l'éloignement du site de mesures de la source de pollution qui est la décharge et de la position en altitude du site estimée à environ 12 m. Les concentrations mesurées peuvent être aussi impactées par la dilution des masses d'air qui balayent le site de mesures. Les variations saisonnières des concentrations de  $\text{NH}_3$  sont moins marquées sur les sites DACCIWA. Une légère augmentation en saison sèche de l'ordre de 6 % et 10 % a été observée respectivement sur les sites trafic et feux de décharge d'Abidjan. Sur le site trafic de Cotonou et sur le site feux domestiques d'Abidjan, par contre, on a une diminution des concentrations en saison sèche de l'ordre de 5,9 % et de 15 %.*

#### **III.4.1.3. Variations mensuelles et saisonnières de l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ )**

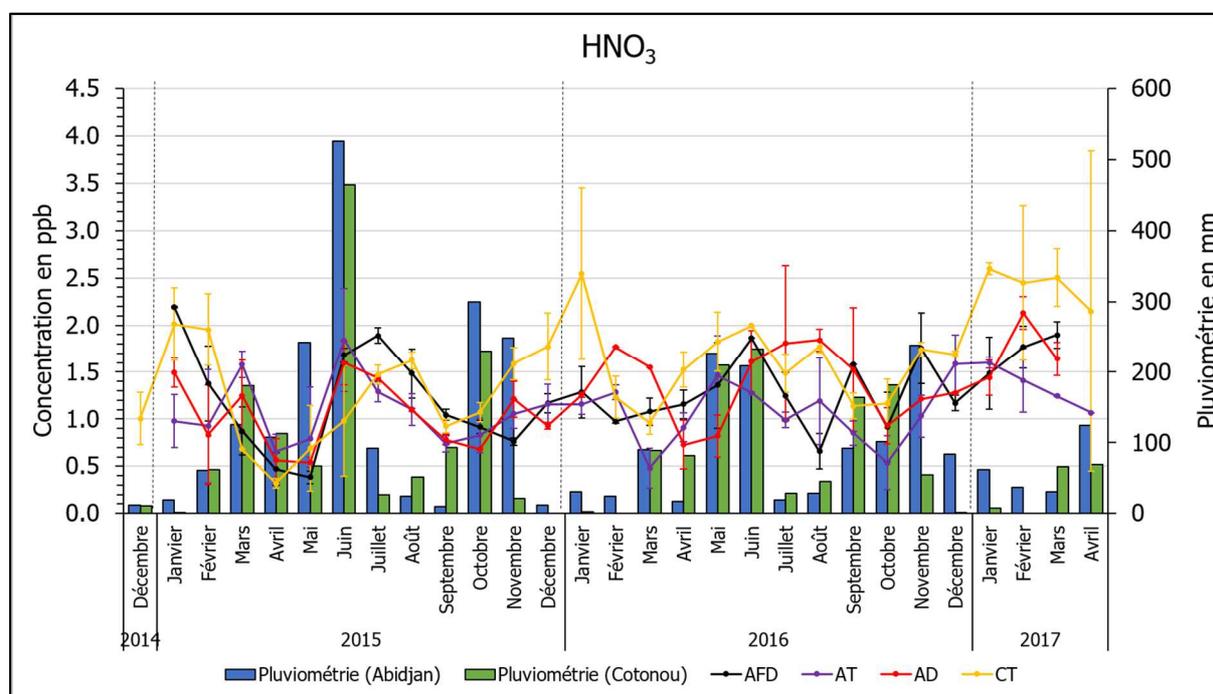
Les variations moyennes mensuelles des concentrations de  $\text{HNO}_3$  et de la pluviométrie mesurées sur les sites d'Abidjan et de Cotonou sont présentées sur la figure 3.14. Les variations saisonnières des concentrations moyennes de  $\text{HNO}_3$  sont représentées à la figure 3.15.

- **Site feux domestiques d'Abidjan**

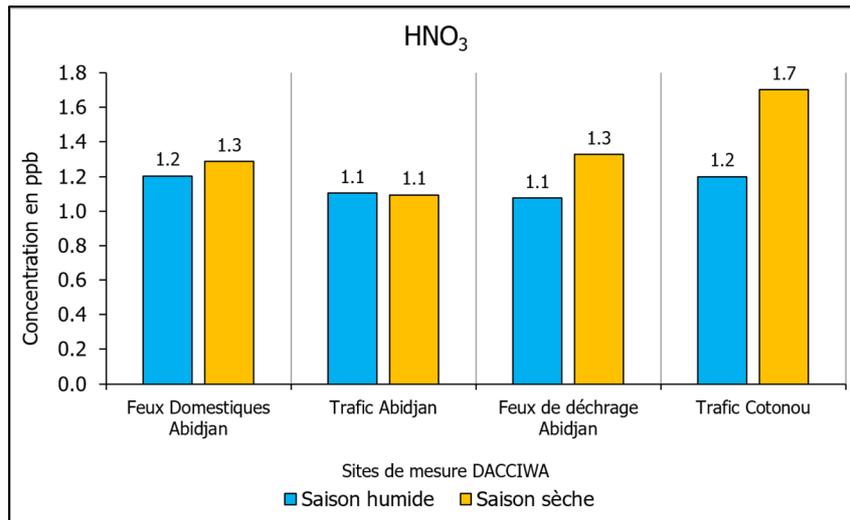
Les concentrations moyennes mensuelles de  $\text{HNO}_3$  mesurées sur le site feux domestiques se situent autour de 1 ppb. Elles varient entre  $0,4 \pm 0,1$  ppb en Mai 2015 et  $2,2 \pm 0,0$  ppb en Janvier 2015. Les concentrations moyennes saisonnières varient très peu. La concentration moyenne calculée en saison humide est de 1,2 ppb tandis qu'elle est de 1,3 ppb en saison sèche. Cela représente une faible augmentation de la concentration moyenne en saison sèche de 7,5 %. Les variations saisonnières de la pluviométrie ont donc très peu d'influence sur l'évolution des concentrations de  $\text{HNO}_3$  sur le site feux domestiques.

- **Site trafic d'Abidjan**

Tout comme sur le site feux domestiques, les concentrations moyennes mensuelles de  $\text{HNO}_3$  sur le site trafic d'Adjamé se situent globalement autour de 1 ppb. Elles varient entre  $0,5 \pm 0,3$  ppb en Octobre 2016 et  $1,8 \pm 0,5$  ppb en Juin 2015. L'étude des concentrations moyennes saisonnières ne montre pratiquement pas de variations. En effet, la concentration moyenne en saison sèche est identique à celle obtenue en saison humide avec 1,1 ppb. La production de  $\text{HNO}_3$  sur le site trafic d'Adjamé ne dépend donc pas des variations de la pluviométrie.



**Figure 3.14:** Evolution mensuelle des concentrations moyennes de l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.



**Figure 3.15:** Concentrations moyennes saisonnières de l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) sur les sites DACCWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.

- **Site feux de décharge d'Abidjan**

Les concentrations moyennes mensuelles de HNO<sub>3</sub> sur le site feux de décharge d'Akouédo, varient globalement entre  $0,5 \pm 0,1$  ppb en Mai 2015 et  $2,1 \pm 0,12$  ppb en Février 2017. On peut remarquer chaque année que les plus faibles concentrations sont obtenues aux mois d'Avril et Mai au début de la saison des pluies. Pendant les mois de Juillet et Août correspondant à la petite saison sèche les concentrations moyennes mensuelles de HNO<sub>3</sub> sont beaucoup plus élevées. On a aussi des concentrations importantes en Février et Mars à la fin de la grande saison sèche. L'étude des variations des concentrations moyennes saisonnières montre un accroissement des concentrations de la saison humide (1,1 ppb) à la saison sèche (1,3 ppb). L'évolution de HNO<sub>3</sub> sur le site feux de décharge présente une légère saisonnalité.

- **Site trafic de Cotonou**

A Cotonou, les concentrations moyennes mensuelles (figure 3.14) varient entre  $0,3 \pm 0,0$  ppb en Avril 2015 et  $2,6 \pm 0,1$  ppb en Janvier 2017. La figure 3.14 permet de distinguer 2 principaux pics par an. En 2015, ces deux valeurs extrêmes sont observées au mois de Janvier et d'Août tandis qu'en 2016 elles interviennent en Janvier et Juin. Les concentrations les plus élevées semblent donc être mesurées lorsque la pluviométrie est assez faible. On remarque en effet que les cumuls mensuels de pluie sont inférieurs à 100 mm pendant les mois précités. L'étude saisonnière confirme cette remarque par des concentrations en saison sèche (1,7 ppb) plus élevées qu'en saison humide (1,2 ppb).

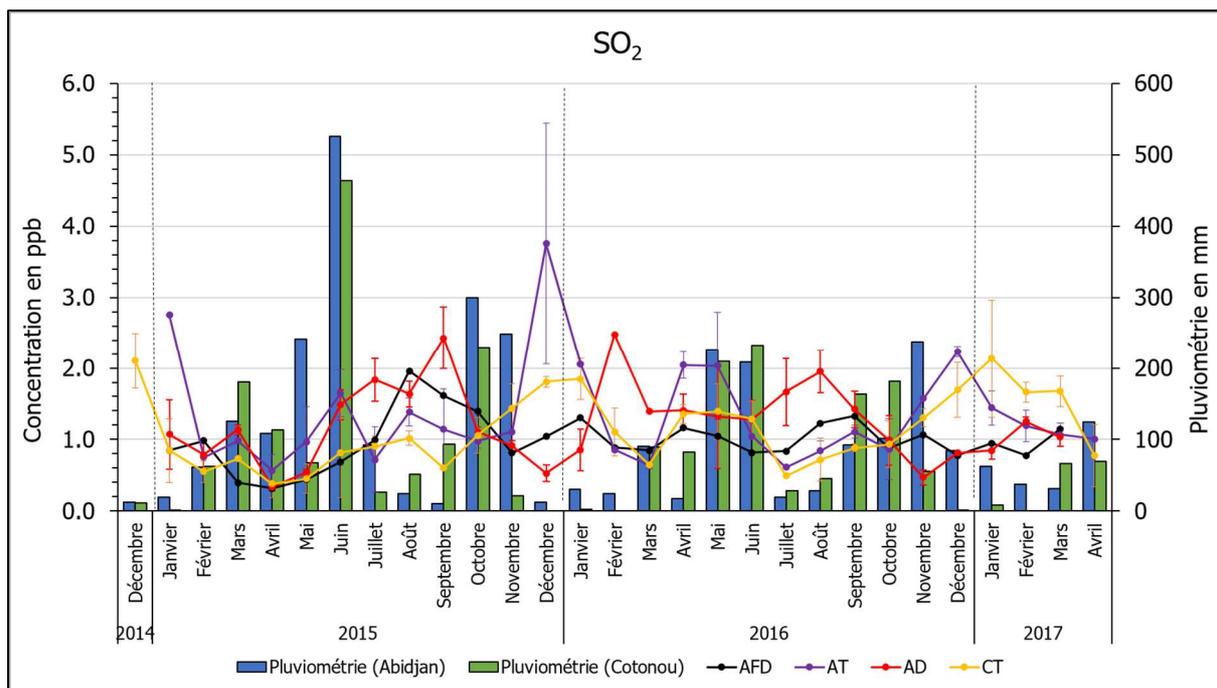
*On remarque en comparant les concentrations moyennes mensuelles de HNO<sub>3</sub> qu'elles varient peu sur les 3 sites moyen-terme d'Abidjan avec des allures similaires. A Cotonou on observe une allure semblable avec un léger décalage dans le temps par rapport aux sites d'Abidjan dû certainement au décalage d'environ un mois observé entre le début de la saison sèche à Cotonou (Novembre) par rapport à Abidjan (Décembre). On peut remarquer aussi que sur les 4 sites, des concentrations assez importantes sont mesurées pendant la saison sèche. Cependant les variations saisonnières ne sont pas très importantes hormis sur le site de Cotonou. On observe un enrichissement de HNO<sub>3</sub> en saison sèche sur les sites feux domestiques, feux de décharge et trafic de Cotonou. Sur le site trafic d'Abidjan, aucune variation saisonnière n'a été observée.*

#### **III.4.1.4. Variations mensuelles et saisonnières du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)**

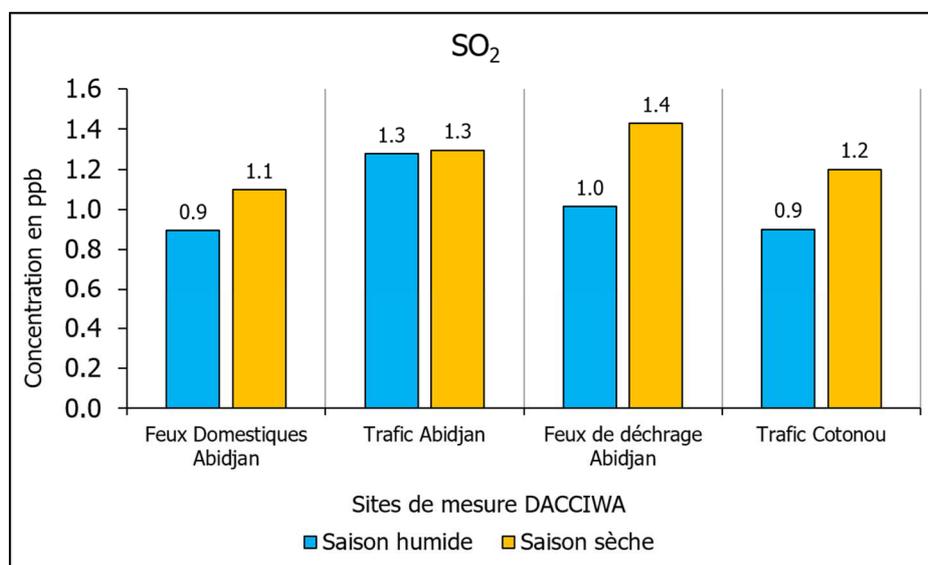
La figure 3.16 présente les variations moyennes mensuelles des concentrations de SO<sub>2</sub> et de la pluviométrie mesurées sur les sites DACCIWA pendant la période de Décembre 2014 à Avril 2017. Les variations saisonnières des concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> sont représentées à la figure 3.17.

- **Site feux domestiques d'Abidjan**

Les concentrations moyennes mensuelles de SO<sub>2</sub> à Abidjan varient entre  $0,3 \pm 0,1$  ppb en Août 2015 et  $2,0 \pm 0,5$  ppb en Avril 2015. Les variations mensuelles les plus significatives sont observées en 2015. A partir de Janvier 2016, les variations sont moins importantes et se situent autour de 1 ppb dans l'intervalle de 0,8 ppb à 1,3 ppb. Les concentrations sont plus importantes en saison sèche surtout pendant l'année 2015. Les concentrations moyennes saisonnières calculées sur toute la période de l'étude montrent qu'en saison sèche les concentrations de SO<sub>2</sub> sont légèrement plus importantes. En effet, en saison humide la concentration moyenne de SO<sub>2</sub> est de 0,9 ppb tandis qu'elle est de 1,1 ppb en saison sèche.



**Figure 3.16:** Evolution mensuelle des concentrations moyennes du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.



**Figure 3.17:** Concentrations moyennes saisonnières du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.

- **Site trafic d'Abidjan**

Sur ce site les concentrations moyennes mensuelles ont atteint 3,8 ppb en Décembre 2015 et  $3,0 \pm 0,8$  ppb en Janvier 2015. Hormis ces valeurs élevées, les concentrations moyennes mensuelles de SO<sub>2</sub> varient entre  $0,6 \pm 0,2$  ppb en Avril 2015 et  $2,2 \pm 0,1$  ppb en Décembre 2016. L'étude de la variabilité saisonnière sur toute la période d'étude montre qu'il n'existe pas de variation des concentrations moyennes saisonnières. La concentration moyenne calculée en saison sèche (1,3 ppb) est en effet égale à celle obtenue en saison humide. Le SO<sub>2</sub> issu du trafic varie donc très peu. Cela pourrait s'expliquer par l'intensité du trafic sur ce site et qui ne varie presque pas au cours de l'année. Tout comme pour le NO<sub>2</sub>, la variation la plus significative du trafic est enregistrée au mois de Décembre et Janvier où les préparatifs des fêtes de fin d'année entraînent une circulation plus importante et des embouteillages tout au long des journées.

- **Site feux de décharge d'Abidjan**

Les concentrations moyennes mensuelles de SO<sub>2</sub> sur le site de la décharge d'Akouédo fluctuent entre  $0,3 \pm 0,1$  ppb en Avril 2015 et  $2,5 \pm 0,0$  ppb en Février 2016. Les plus fortes concentrations sont mesurées pendant les saisons sèches. L'étude des variations saisonnières montre une plus grande variabilité entre les concentrations moyennes en saison humide (1,0 ppb) par rapport à la saison sèche (1,4 ppb).

- **Le site trafic de Cotonou**

Les concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> sur le site trafic de Cotonou présentent des valeurs élevées en Décembre avec  $2,1 \pm 0,4$  ppb,  $1,8 \pm 0,1$  ppb,  $1,7 \pm 0,4$  ppb respectivement en 2014, 2015 et 2016. La gamme des concentrations sur toute la période de l'étude est comprise entre  $0,4 \pm 0,2$  ppb et  $2,1 \pm 0,4$  ppb. En saison humide la concentration moyenne est de 0,9 ppb tandis qu'elle de 1,2 ppb en saison sèche.

*En comparant les résultats obtenus sur les 4 sites, on peut remarquer que les concentrations moyennes mensuelles ont des allures similaires avec des valeurs élevées particulièrement autour des mois de Décembre et Janvier où le trafic est généralement plus dense. L'étude des concentrations moyennes saisonnières montre un enrichissement de SO<sub>2</sub> en saison sèche sur le site feux de décharge d'Abidjan, trafic de Cotonou et feux domestiques d'Abidjan. Sur le site trafic d'Abidjan, il n'y a pas de variation saisonnière des concentrations de SO<sub>2</sub>. La source d'émission du SO<sub>2</sub> semble donc plus constante sur ce site trafic par rapport aux autres sites où les concentrations de SO<sub>2</sub> sont sensibles aux variations saisonnières.*

### III.4.1.5. Variations mensuelles et saisonnières de l’ozone (O<sub>3</sub>)

Les figures 3.18 et 3.19 représentent respectivement les variations des concentrations moyennes mensuelles et saisonnières de l’ozone (O<sub>3</sub>) calculées pour chacun des sites DACCIWA d’Abidjan et de Cotonou durant la période de Décembre 2014 à Avril 2017.

- ***Site feux domestiques d’Abidjan***

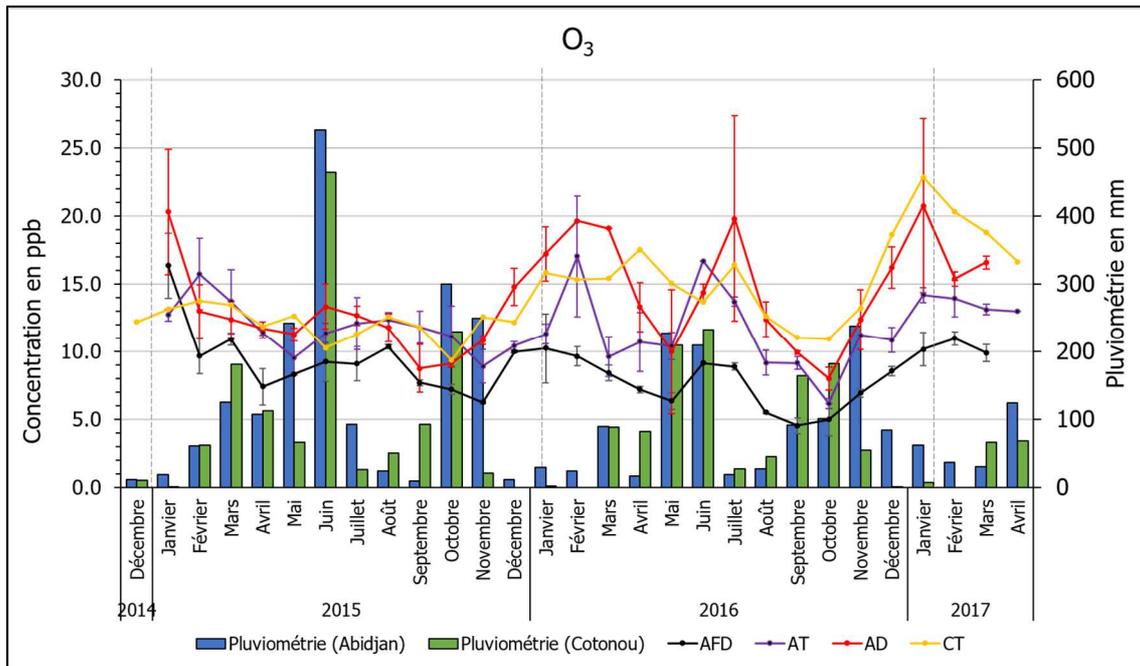
Les concentrations moyennes mensuelles de O<sub>3</sub> sur le site feux domestiques sont globalement inférieures à 10 ppb. A l’exception de celle de Janvier qui est de  $16,3 \pm 2,4$  ppb, seules celles de Mars 2015, Août 2015, Janvier 2016 et Février 2017 avoisinent 10 ppb. Les concentrations moyennes mensuelles varient entre  $4,5 \pm 0,6$  ppb en Septembre 2016 et  $11 \pm 0,5$  ppb en Février 2017. Les variations mensuelles montrent clairement chaque année des concentrations plus importantes lorsque la pluviométrie est assez faible et les températures plus élevées. La concentration moyenne en saison humide est de 7,3 ppb tandis qu’elle est de 8,7 ppb en saison sèche, soit une augmentation de la concentration moyenne saisonnière de l’ordre de 19,2 %.

- ***Site trafic d’Abidjan***

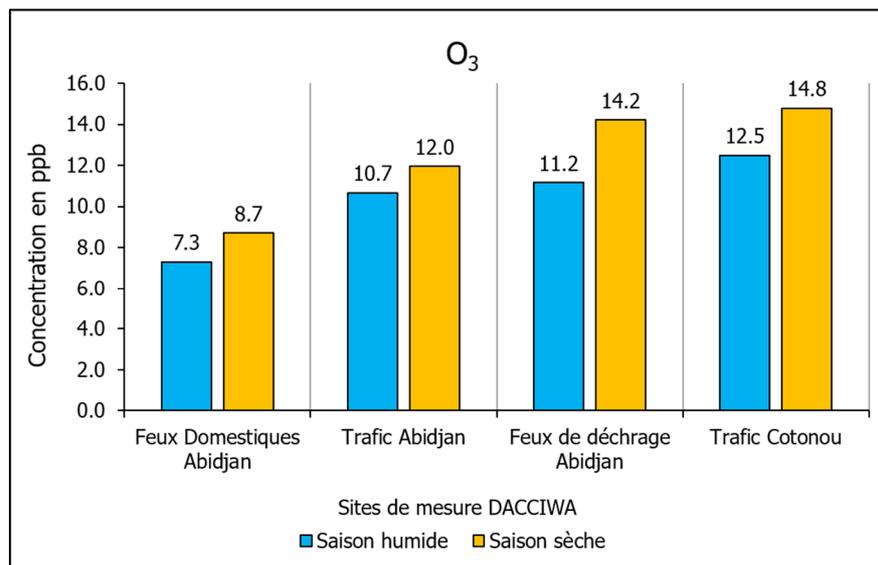
Les concentrations moyennes mensuelles sont pratiquement toutes supérieures à 10 ppb. Quelques concentrations inférieures à 10 ppb ont été mesurées notamment en Mai et Novembre 2015 et Mars, Aout, Septembre et Octobre 2016. La gamme des concentrations moyennes mensuelles mesurées est comprise entre  $6,2 \pm 0,4$  ppb et  $17,2 \pm 4,4$  ppb. Les plus fortes concentrations ont été mesurées en 2016. Globalement la concentration moyenne calculée en saison sèche (12,0 ppb) est légèrement plus importante par rapport à celle en saison humide (10,7 ppb).

- ***Site feux de décharge d’Abidjan***

De fortes concentrations mensuelles de O<sub>3</sub> avoisinant et dépassant quelques fois 20 ppb ont été mesurées sur le site de la décharge d’Akouédo. C’est le cas en Janvier 2015 et 2017 avec respectivement  $20,3 \pm 4,6$  ppb et  $20,7 \pm 6,4$  ppb. En Février, Mars et Juillet 2016 les concentrations mensuelles sont toutes supérieures à 19 ppb avec respectivement  $19,6 \pm 0,0$  ppb,  $19,1 \pm 0,0$  ppb et  $19,8 \pm 7,8$  ppb. On constate que ces concentrations élevées ont été mesurées lorsque la pluviométrie est la plus basse. La concentration moyenne calculée en saison sèche (14,2 ppb) est plus importante que celle obtenue en saison humide (11,2 ppb) avec un taux d’enrichissement de 27,3 %.



**Figure 3.18:** Evolution mensuelle des concentrations moyennes de l'ozone ( $O_3$ ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.



**Figure 3.19:** Concentrations moyennes saisonnières de l'ozone ( $O_3$ ) sur les sites DACCIWA de Décembre 2014 à Avril 2017 à Abidjan et Cotonou.

### *Site trafic de Cotonou*

Les concentrations moyennes mesurées sur le site trafic de Cotonou ont tendance à croître entre 2015 et 2017. En effet, en 2015, toutes les concentrations moyennes mensuelles sont inférieures à 15 ppb tandis qu'en 2016 elles sont supérieures à 15 ppb pendant au moins 7

mois. C'est aussi le cas des 4 premiers mois de l'année 2017. Les concentrations varient entre  $9,4 \pm 1,6$  ppb en Octobre 2015 et  $22,8 \pm 1,1$  ppb en Janvier 2017. La concentration moyenne en saison humide est de 12,5 ppb et de 14,8 ppb en saison sèche.

*En comparant les concentrations moyennes mensuelles de  $O_3$  obtenues sur tous les sites, on peut remarquer que pour la majorité des sites, les plus faibles valeurs ont été observées entre Octobre et Novembre. Les plus fortes concentrations ont été mesurées entre Janvier et Février sur tous les sites. Les plus fortes concentrations ont été mesurées sur le site trafic de Cotonou et sur les feux de décharge d'Abidjan. Ce site situé à la périphérie de la ville d'Abidjan et à proximité de la ville Bingerville semble réunir des conditions favorables à la production d'ozone avec la présence de source des principaux précurseurs d'ozone. En effet, ce site paraît peu pollué par les  $NO_x$  du fait de son éloignement des principaux axes routiers. De plus sa proximité avec la ville suburbaine de Bingerville laisse envisager une concentration plus importante de COV d'origine biogénique. L'augmentation du rapport COV /  $NO_x$  combinée à une insolation moyenne mensuelle comprise entre 117 et 220 heures (Messou et al., 2013) et à une humidité relative de 79,38 % pourraient expliquer les niveaux de concentration important observés sur ce site. L'étude des variations saisonnières montre une plus grande variabilité des concentrations sur le site de la décharge d'Akouédo (27,3 %) par rapport au site feux domestique (19,15 %), au site trafic de Cotonou (15,5 %) et au site trafic d'Adjamé (12 %). Sur tous les sites d'Abidjan les concentrations moyennes saisonnières de  $O_3$  calculées en saison sèche sont plus importantes que celles obtenues en saison humide. L'évolution mensuelle est aussi marquée par les saisons.*

#### **III.4.2. Caractérisation moyenne de la pollution et variations annuelles des concentrations des polluants gazeux à Abidjan et Cotonou.**

Les concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur deux semaines des polluants gazeux mesurées sur chacun des sites moyen-terme d'Abidjan et de Cotonou ont permis de définir une caractérisation moyenne de la pollution à Abidjan et Cotonou sur la période Décembre 2014 - Avril 2017. Les concentrations moyennes ont été calculées pour chacun des polluants et les résultats ont été synthétisés dans le tableau III.11. La figure 3.20 présente l'évolution des concentrations annuelles de  $NO_2$ ,  $NH_3$ ,  $HNO_3$ ,  $SO_2$  et  $O_3$  entre les années 2015 et 2016. L'année 2017 n'a pas été incluse car nous ne disposons que de 3 à 4 mois de données. Sur chacun des histogrammes la concentration annuelle du polluant en 2015 est représentée par une barre verticale hachurée en noir et celle de l'année 2016 est représentée par une barre

verticale de couleur marron. Les traits verticaux noirs représentent les écart-types moyens. Nous abordons la discussion gaz par gaz comme précédemment.

**Tableau III.11:** Concentrations moyennes des polluants gazeux (en ppb) mesurés sur les sites DACCIWA d’Abidjan et de Cotonou sur la période (Décembre 2014 - Avril 2017), nombre d’échantillons prélevés entre parenthèse.

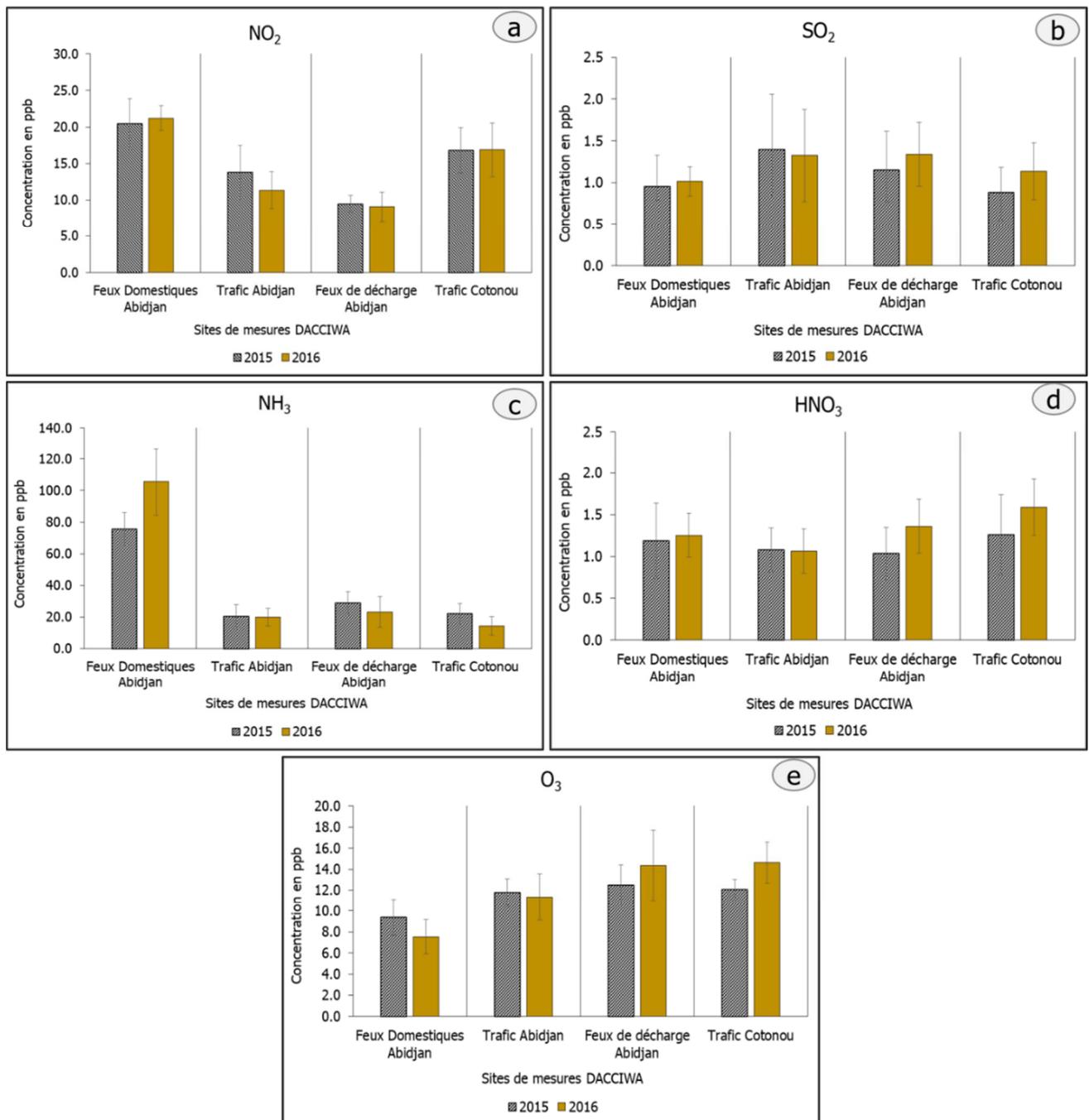
Villes	Sites de mesures (période d'échantillonnage)	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Abidjan	Feux domestiques (Janvier 2015 - Mars 2017)	21,1 ± 2,9 (108)	92,5 ± 23,6 (108)	1,3 ± 0,5 (108)	1 ± 0,3 (108)	8,7 ± 1,9 (108)
	Trafic (Janvier 2015 - Avril 2017)	12,5 ± 3,3 (111)	20,6 ± 6,4 (111)	1,1 ± 0,3 (111)	1,3 ± 0,6 (111)	11,7 ± 2,1 (111)
	Feux de décharge (Janvier 2015 - Mars 2017)	9,3 ± 1,8 (108)	26,6 ± 9,5 (108)	1,2 ± 0,35 (108)	1,2 ± 0,5 (108)	13,8 ± 3,3 (108)
Cotonou	Trafic (Décembre 2014 - Avril 2017)	17,2 ± 3,8 (116)	18,9 ± 6,8 (116)	1,6 ± 0,5 (116)	1,1 ± 0,5 (116)	14,2 ± 2,7 (116)

#### III.4.2.1. Caractérisation moyenne et variations annuelles du dioxyde d’azote

La concentration moyenne de NO<sub>2</sub> sur les sites DACCIWA d’Abidjan et de Cotonou pour la période de Décembre 2014 à Avril 2017 varie d’un site à un autre. Le site feux domestiques présente la concentration la plus élevée (21,1 ± 2,9 ppb) comparé aux 3 autres sites et le site feux de décharge d’Akouédo la concentration la plus faible (9,3 ± 1,8 ppb). L’étude des sources au chapitre 3 section 3.3.2. avait déjà permis de montrer qu’il existait deux sources de NO<sub>2</sub> sur le site feux domestiques avec une contribution de 79 % de la source feux domestiques et de 21 % de la source trafic. Cela pourrait expliquer les concentrations moyennes plus importantes de NO<sub>2</sub> sur le site feux domestiques.

Les variations des concentrations annuelles de NO<sub>2</sub> entre 2015 et 2016 pour chacun des sites sont présentées sur la figure 3.20a. On remarque que le site feux domestiques est le seul où on a observé une augmentation des concentrations de NO<sub>2</sub>. En effet, les concentrations sont passées de 20,4 ± 3,5 ppb en 2015 à 21,2 ± 1,7 ppb en 2016. Contrairement à ce site, on a observé une diminution des concentrations sur les deux autres sites d’Abidjan. Les concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> sont passées de 13,8 ± 3,7 ppb en 2015 à 11,4 ± 2,5 ppb en 2016 pour le site trafic et de 9,5 ± 1,2 en 2015 à 9,1 ± 2 ppb en 2016 pour le site feux de décharge. Sur le site trafic de Cotonou, on n’observe pas de variations significatives. Les concentrations sont restées pratiquement constantes avec une concentration moyenne de 16,8 ± 3,1 ppb en 2015 et 16,9 ± 3,7 ppb en 2016.

On constate généralement, sur l'ensemble des sites que la variabilité du NO<sub>2</sub> est assez faible et cette faible variabilité semble être liée à la présence importante des sources locales de NO<sub>2</sub>, à un faible apport de NO<sub>2</sub> des sources lointaines et à la faible variabilité pluviométrique enregistrée pendant la durée de l'étude. La durée de vie du NO<sub>2</sub> étant assez faible, il ne peut être transporté sur de très longues distances. Il stagne lorsqu'il fait chaud et a tendance à se dissiper lorsqu'il fait froid.



**Figure 3.20:** Evolution des concentrations moyennes annuelles des polluants gazeux sur les sites DACCIWA d'Abidjan et de Cotonou sur la période 2015-2016.

### III.4.2.2. Caractérisation moyenne et variations annuelles du dioxyde de soufre

Le tableau III.11 montre de faibles variations des concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> d'un site à un autre sur la période 2014-2017. Les concentrations moyennes obtenues sont  $1 \pm 0,3$  ppb,  $1,3 \pm 0,6$  ppb,  $1,2 \pm 0,5$  ppb et  $1,1 \pm 0,5$  ppb respectivement pour les sites feux domestiques, trafic Abidjan, feux de décharge et trafic de Cotonou. Les concentrations annuelles ont une faible tendance à croître entre 2015 et 2016 sur la plupart des sites (figure 3.20b). Sur les sites feux domestiques, feux de décharge et trafic de Cotonou les concentrations sont passées respectivement de  $0,96 \pm 0,4$  ppb à  $1 \pm 0,2$  ppb, de  $1,2 \pm 0,5$  ppb à  $1,3 \pm 0,4$  ppb et de  $0,9 \pm 0,3$  à  $1,1 \pm 0,3$  ppb. Sur le site trafic d'Abidjan, les concentrations de SO<sub>2</sub> sont restées pratiquement égales en passant de  $1,4 \pm 0,7$  ppb en 2015 à  $1,3 \pm 0,6$  ppb en 2016. La source trafic émettant le SO<sub>2</sub> est donc restée stable entre ces deux années.

### III.4.2.3. Caractérisation moyenne et variations annuelles de l'ammoniac

Les concentrations moyennes de NH<sub>3</sub> obtenues sur les sites d'Abidjan et de Cotonou pendant notre période d'étude montrent de très grandes différences d'un site à un autre. La concentration moyenne obtenue sur le site feux domestiques de Yopougon ( $92,5 \pm 23,6$  ppb) est près de 5 fois supérieure à celles obtenues sur les sites trafic d'Abidjan ( $20,6 \pm 6,4$  ppb) et de Cotonou ( $18,9 \pm 6,9$  ppb). Elle est aussi plus de 3 fois supérieure à la concentration moyenne obtenue sur le site de la décharge d'Akouédo ( $26,6 \pm 9,5$  ppb). Les concentrations NH<sub>3</sub> sont plus importantes sur les sites de combustion de bois et de résidus végétaux. Les valeurs importantes obtenues sur le site feux domestiques d'Abidjan sont beaucoup plus liées à la proximité entre la source et les capteurs (moins de 5 m).

L'étude de la variabilité interannuelle de NH<sub>3</sub> présentée à la figure 3.20c montre des variations différentes d'un site à un autre. De 2015 à 2016 on constate une augmentation de 39,5 % des concentrations de NH<sub>3</sub> sur le site feux domestiques qui sont passées de ( $75,7 \pm 10,4$  ppb) à ( $105,6 \pm 21,2$  ppb). Nous avons pu remarquer qu'entre le début des mesures en Décembre 2014 et la fin en Mars 2017, le nombre de foyers de fumage n'a cessé de croître en passant de 25 à 38. L'activité de fumage de poisson et de viande a gagné en intensité se poursuivant même les dimanches et assez tard dans la journée. Sur tous les autres sites on constate une diminution des concentrations moyennes 2015 à 2016. La diminution la plus significative a été observée sur le site trafic de Cotonou où les concentrations sont passées de  $22,1 \pm 6,3$  ppb à  $14,4 \pm 5,9$  ppb. Les diminutions des concentrations de NH<sub>3</sub> sont moins importantes sur les sites feux de décharge et trafic d'Abidjan où les concentrations sont passées respectivement de 28,8 ppb à 23,23 ppb et de 20,34 à 19,95 ppb.

#### **III.4.2.4. Caractérisation moyenne et variations annuelles de l'acide nitrique**

Le tableau III.11 montre que les concentrations moyennes de  $\text{HNO}_3$  obtenues sont pratiquement du même ordre de grandeur sur tous les sites d'Abidjan et de Cotonou. Elles sont comprises entre  $1,1 \pm 0,3$  ppb sur le site trafic d'Abidjan et  $1,6 \pm 0,5$  ppb sur le site trafic de Cotonou. A Abidjan la concentration la plus importante a été observée sur le site feux domestiques ( $1,3 \pm 0,5$  ppb) suivi du site feux de décharge ( $1,2 \pm 0,4$  ppb). Les écarts restent faibles entre les différents sites d'Abidjan et on pourrait dire que l'impact de la source anthropique de production de  $\text{HNO}_3$  n'est pas significatif. Les concentrations mesurées sont comparables à celles mesurées en milieu rural (Adon et al., 2010). Il y'a donc une faible variabilité spatiale des concentrations de  $\text{HNO}_3$  à Abidjan. Nous reviendrons sur cet aspect dans le chapitre IV.

L'analyse de la figure 3.20d présentant l'évolution des concentrations annuelles de  $\text{HNO}_3$  sur tous les sites entre 2015 et 2016 permet de constater une augmentation des concentrations annuelles de  $\text{HNO}_3$  sur presque tous les sites. En dehors du site trafic d'Abidjan où les concentrations sont restées pratiquement identiques ( $1,08 \pm 0,26$  ppb à  $1,06 \pm 0,26$  ppb), elles augmentent sur les autres sites de 2015 à 2016. Les concentrations sont passées de  $1,03 \pm 0,3$  ppb à  $1,36 \pm 0,3$  ppb, de  $1,26 \pm 0,5$  à  $1,59 \pm 0,3$  ppb et de  $1,19 \pm 0,45$  ppb à  $1,25 \pm 0,26$  ppb respectivement pour les sites feux de décharge, trafic de Cotonou et feux domestiques. Néanmoins ces augmentations de concentrations restent faibles.

#### **III.4.2.5. Caractérisation moyenne et variations annuelles de l'ozone**

La caractérisation moyenne de la pollution par l'ozone montre que les concentrations les plus importantes sur les sites moyen terme DACCIWA ont été mesurées sur le site trafic de Cotonou ( $14,2 \pm 2,7$  ppb) et sur le site feux de décharge d'Abidjan ( $13,8 \pm 3,3$  ppb). Sur ces deux sites les concentrations annuelles ont augmenté de 2015 à 2016 (figure 3.20e). Elles sont passées de  $12,1 \pm 1$  ppb à  $14,6 \pm 0,2$  ppb sur le site trafic de Cotonou et de  $12,5 \pm 1,9$  ppb à  $14,6 \pm 3,4$  ppb sur le site feux de décharge. Sur le site trafic d'Abidjan, la concentration moyenne de  $\text{O}_3$  est  $11,7 \pm 2,1$  ppb alors qu'elle est de  $8,7 \pm 1,9$  ppb sur le site feux domestiques. Sur ces deux derniers sites, on a observé au contraire une diminution des concentrations annuelles entre 2015 et 2016. Sur le site trafic d'Abidjan la concentration annuelle en 2015 est  $11,8 \pm 1,3$  ppb et celle en 2016 est  $11,3 \pm 2,3$  ppb. Sur le site feux de décharge, la concentration annuelle est passée de  $9,4 \pm 1,7$  ppb à  $7,5 \pm 1,6$  ppb. Soit une diminution de la concentration annuelle de 19,6 %.

*La caractérisation moyenne de la pollution gazeuse à Abidjan et Cotonou nous montre que pour le même polluant et dans la même ville, les concentrations varient d'un site source à un autre. Cela montre que les concentrations mesurées dépendent bien de la source de pollution à proximité. C'est notamment le cas pour  $\text{NO}_2$  et  $\text{NH}_3$  à Abidjan. La concentration moyenne de  $\text{NH}_3$  sur le site feux domestiques d'Abidjan est très élevée comparativement aux autres sites. Pour  $\text{SO}_2$  et  $\text{HNO}_3$  les concentrations mesurées sont relativement faibles sur tous les sites DACCIWA et varient très peu.*

*On remarque que pour tous les polluants et quelque soit le site, les concentrations annuelles varient peu d'une année à l'autre. Cela montre que la source d'émission des polluants primaires ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ) est restée assez stable. Le trafic automobile responsable de l'émission de la plupart de ces polluants n'a pas beaucoup changé malgré les efforts de rénovation des voies de circulation et de renouvellement du parc des principaux véhicules émetteurs à Abidjan. Pour les polluants secondaires ( $\text{O}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ), les faibles augmentations des concentrations annuelles pourraient être dues à la baisse de la pluviométrie annuelle entre 2015 et 2016 à Abidjan et Cotonou. Il y a donc eu moins de lessivage de l'atmosphère et donc une accumulation des polluants dans l'atmosphère.*

*La seule variation significative a été observée pour  $\text{NH}_3$  sur le site feux domestiques où les concentrations moyennes ont subi une augmentation entre 2015 et 2016. Ceci pourrait être lié à l'intensification des activités de fumage observée.*

### **III.5. Comparaison des concentrations moyennes annuelles des polluants sur les sites trafic d'Abidjan, Cotonou, Yaoundé, Bamako et Dakar**

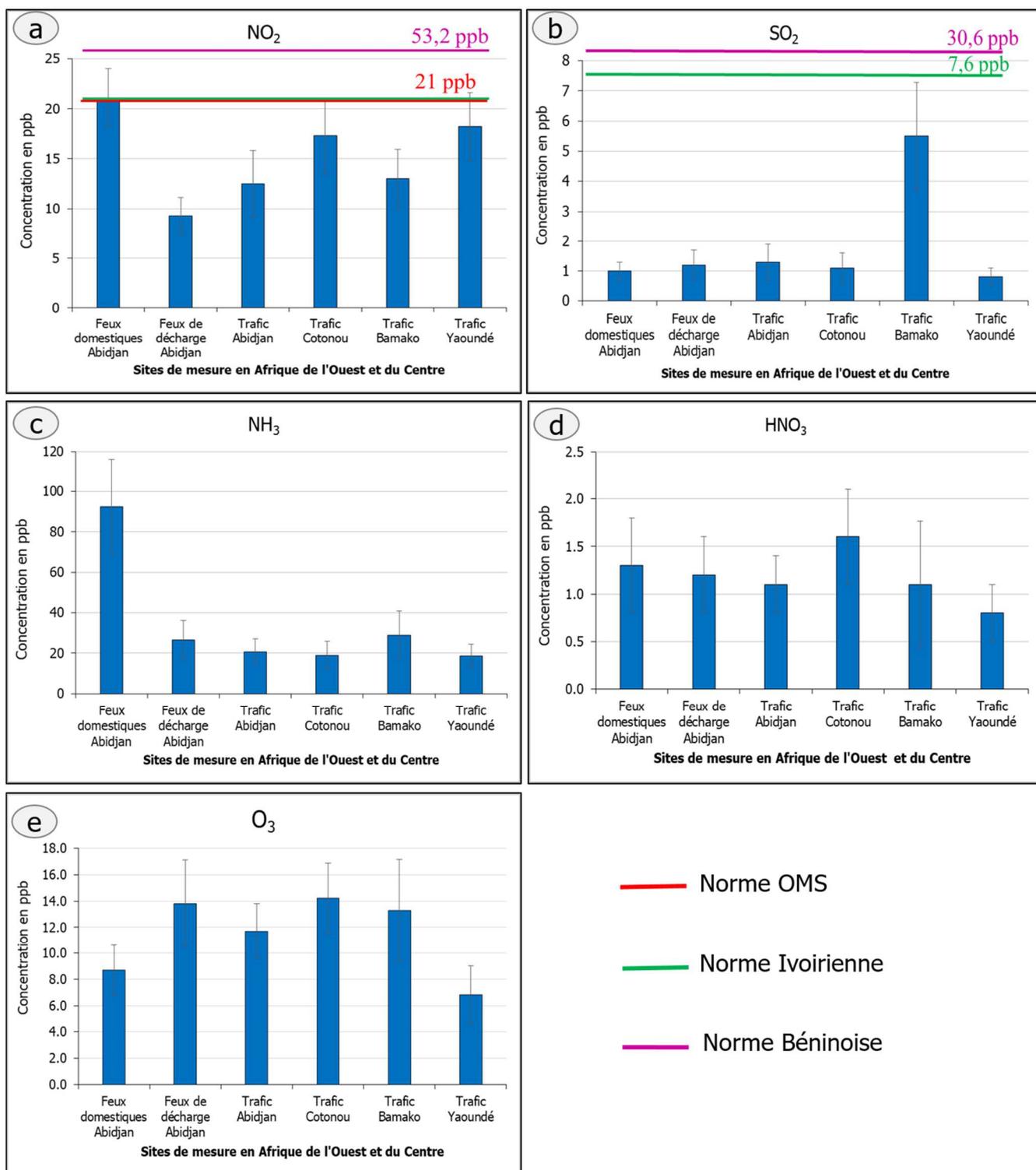
Dans cette partie, les concentrations moyennes des différents polluants gazeux pour la période de Décembre 2014 à Avril 2017 ont été calculées pour différentes villes africaines. Il s'agit ici de faire une comparaison des concentrations moyennes obtenues sur les sites DACCIWA avec celles obtenues sur des sites trafic à Yaoundé et Bamako dans le cadre du programme POLCA (POLLution des Capitales Africaines). La collecte des données sur les sites de Yaoundé et de Bamako a été réalisée sous les supervisions respectives de Madame Marie-Roumy Ouafu de l'université de Douala et de Monsieur Babacar Diop du département de physique de l'université de Bamako. Notre travail pour les sites de Bamako et de Yaoundé a consisté à traiter les résultats d'analyse, à effectuer le calcul des concentrations des polluants gazeux dans l'air et à valider la base de données. La base de données réalisée est présentée dans

les tableaux A2.1 et A2.2 en Annexe II, respectivement pour Bamako et Yaoundé. Pour Dakar, nous utilisons les résultats obtenus en 2009-2010 dans le projet POLCA (Adon et al., 2016).

Pour chacun des polluants un graphe a été réalisé résumant les concentrations moyennes calculées en ppb pour la période d'étude sur chaque site. Sur chaque graphe, les concentrations moyennes annuelles sont représentées par des barres bleues. Les traits horizontaux rouge, vert et violet indiquent les normes annuelles du polluant respectivement de l'OMS, de la Côte d'Ivoire et du Bénin lorsqu'elles existent. Tous ces graphes sont présentés à la figure 3.21.

### **III.5.1. Concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> sur différents sites en Afrique.**

Les concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> sont présentées à la figure 3.21a. On remarque que les concentrations moyennes sont presque toutes inférieures à la norme annuelle de l'OMS qui est de 21 ppb. Seul le site feux domestiques d'Abidjan dépasse légèrement ce seuil avec 21,1 ppb. On rappelle qu'outre les feux domestiques, ce site est fortement influencé par le trafic à proximité. Concernant les sites trafic, ceux de Yaoundé et de Cotonou ont les concentrations moyennes les plus élevées. Ces concentrations sont du même ordre de grandeur avec respectivement 18,2 ppb et 17,3 ppb pour Yaoundé et Cotonou, bien que ces deux sites présentent des caractéristiques différentes. Le trafic routier à Cotonou est constitué en grande partie des engins à deux roues tandis qu'à Yaoundé ce sont des véhicules de petite capacité comme les taxis collectifs et les moto-taxis qui constituent la principale source d'émission de NO<sub>2</sub>. Ces véhicules représentant environ 61 % du parc à Yaoundé (CUY, 2010) sont impliqués dans de nombreux accidents causant des embouteillages et émettant de nombreux polluants (Mfoulou Olugu, 2016). Des concentrations relativement plus faibles et du même ordre de grandeur ont été observées sur les sites trafic d'Abidjan (12,5 ppb) et de Bamako (13,0 ppb). La concentration moyenne mesurée à Bamako lors de notre étude est inférieure à celle obtenue par Adon et al (2016) sur la période de Janvier 2008 à Décembre 2009 qui est 16,2 ppb. Ces concentrations moyennes présentées dans la figure 3.21a sont de loin inférieures à celle obtenue à Dakar (31,7 ppb) sur la période de Juin 2008 à Décembre 2009 (Adon et al., 2016).



**Figure 3.21:** Concentrations moyennes des polluants gazeux (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>) dans les capitales d’Afrique de l’Ouest et du Centre.

### **III.5.2. Concentrations moyennes annuelles de SO<sub>2</sub> sur différents sites en Afrique.**

Les concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> sont présentées à la figure 3.21b. On remarque qu'à l'exception du site trafic de Bamako où l'on observe une concentration moyenne élevée de 5,5 ppb, les concentrations sont presque toutes comprises entre 0,8 ppb et 1,3 ppb. Cette valeur obtenue à Bamako dans le cadre de notre étude est supérieure à celle obtenue par les travaux d'Adon et al (2016) sur le même site où une concentration moyenne de 3,6 ppb avait été mesurée. Cependant, à Dakar la concentration moyenne (15,9 ppb) est largement au-dessus de celles trouvées sur les autres sites (Adon et al., 2016). Il n'existe pas de norme annuelle de l'OMS concernant SO<sub>2</sub> cependant elles sont prévues par les lois nationales en Côte d'Ivoire et au Bénin. Au regard de ces normes, on remarque que les concentrations annuelles mesurées sont très faibles et que l'objectif de qualité est atteint dans ces villes concernant SO<sub>2</sub>. Cependant, la concentration moyenne à Dakar est supérieure à la norme ivoirienne (7,6 ppb / an) et inférieure à la norme Béninoise (30,6 ppb/ an).

### **III.5.3. Concentrations moyennes annuelles de NH<sub>3</sub> sur différents sites en Afrique.**

Sur la figure 3.21c, les concentrations moyennes de NH<sub>3</sub> sur la période 2014-2017 montrent de premier abord que le site feux domestiques d'Abidjan est le plus pollué. En effet, la concentration moyenne mesurée sur ce site (92,5 ppb) est près de quatre fois supérieure à celles mesurées sur les autres sites. En dehors de ce site très proche de la source feux domestiques, le site feux de décharge d'Abidjan (26,6 ppb) et le site trafic de Bamako (29 ppb) ont aussi des niveaux de concentration relativement élevés dues à l'influence de la source feux domestiques sur ces sites. Sur les sites trafic d'Abidjan, de Cotonou et de Yaoundé les concentrations atteignent à peine 20 ppb avec respectivement 20,6 ppb, 19 ppb et 18,7 ppb. Ces dernières concentrations sont du même ordre de grandeur que celle trouvée à Dakar (21,1 ppb) lors de la campagne POLCA (Juin 2008 – Décembre 2009). Par contre, la concentration que nous avons trouvée à Bamako (29 ppb) est inférieure à celle obtenue par Adon et al (2016) lors de la campagne POLCA avec 46,7 ppb.

### **III.5.4. Concentrations moyennes annuelles de HNO<sub>3</sub> sur différents sites en Afrique.**

Les concentrations moyennes de HNO<sub>3</sub> présentées à la figure 3.21d montrent que les concentrations obtenues sur les différents sites varient très peu entre elles. On a obtenu 1,6 ppb, 1,3 ppb, 1,2 ppb, 1,1 ppb, 1,1 ppb et 0,8 ppb respectivement les sites trafic de Cotonou, feux domestiques d'Abidjan, feux de décharge d'Abidjan, trafic d'Abidjan, trafic de Bamako et Trafic de Yaoundé. Ces faibles variations laissent penser que le trafic n'est pas le principal

facteur qui influence les niveaux de concentration de  $\text{HNO}_3$ . On rappelle en effet que  $\text{HNO}_3$  est un polluant secondaire. On pourrait attribuer ce résultat à l'influence des paramètres météorologiques qui pourrait contribuer à faire baisser ou augmenter la concentration de  $\text{HNO}_3$ .

### **III.5.5. Concentrations moyennes annuelles de $\text{O}_3$ sur différents sites en Afrique.**

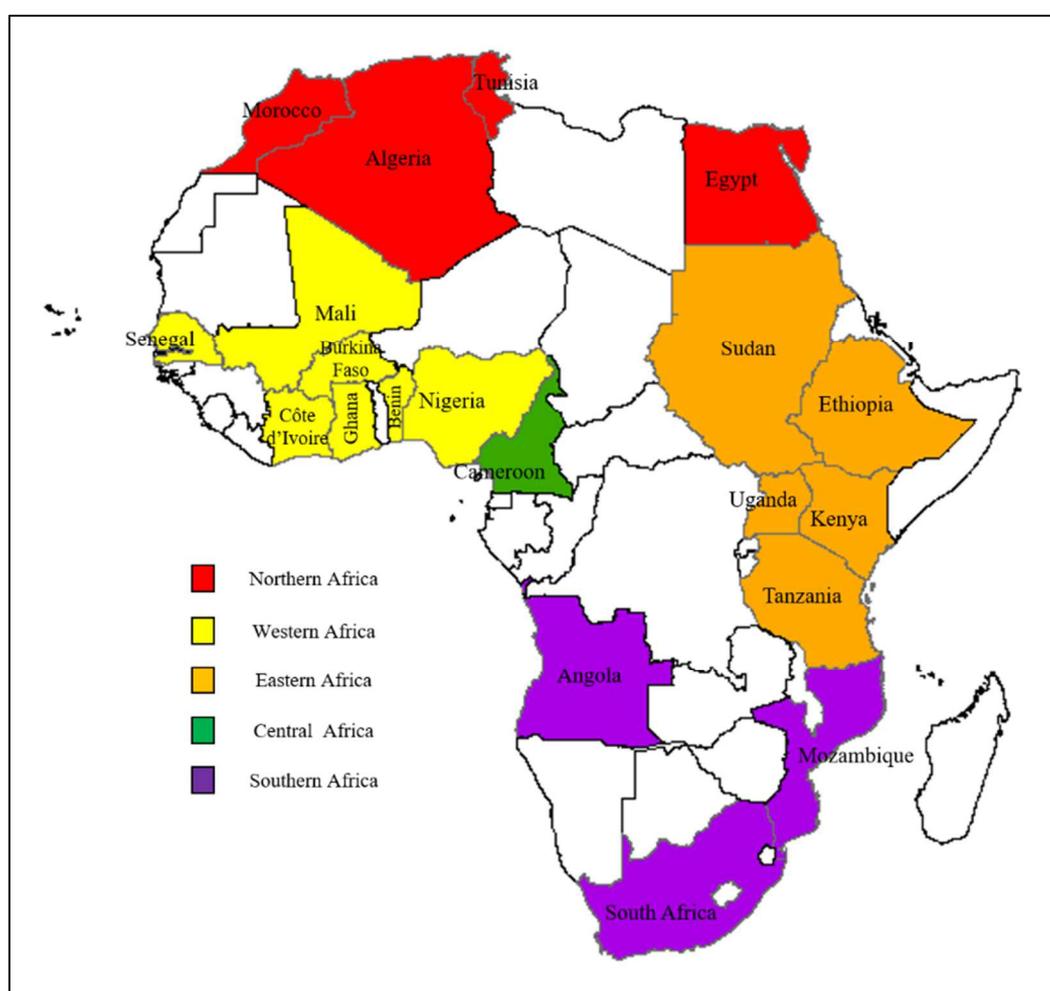
La figure 3.21e présente les niveaux de concentration d'ozone sur les sites de mesures situés en Afrique de l'Ouest et du centre. Les concentrations moyennes varient de 6,8 ppb (site trafic Yaoundé) à 14,2 ppb (site trafic Cotonou). Pour le site feux de décharge d'Abidjan, on a enregistré une concentration moyenne de (13,8 ppb) supérieure à celle du site feux domestiques d'Abidjan. On remarque aussi pour chaque site que le maximum d'ozone est obtenu là où les faibles concentrations de  $\text{NO}_2$  ont été mesurées (figure 3.21a). Les concentrations d'ozone sont donc en partie dues aux titrations de  $\text{NO}_2$ .

### **III.6. Bilan des mesures de $\text{NO}_2$ et $\text{SO}_2$ dans les villes africaines**

Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air sont très importants pour évaluer les risques sanitaires liés à l'exposition aux polluants gazeux. Ils aident également les pouvoirs publics à prendre des mesures d'atténuation des concentrations des polluants et à définir des indices de qualité de l'air (IQA) adaptés à chaque pays. En Afrique, ces réseaux de surveillance de la qualité sont pratiquement inexistant. Un réseau de qualité de l'air existe par exemple au Maroc ([http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/reseau\\_mesure/moyen\\_mesure](http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/reseau_mesure/moyen_mesure)), au Sénégal (<http://www.air-dakar.org/bulletins.html>) ou en Afrique du Sud (<http://www.saaqis.org.za/>) souvent lié aux réseaux de mesures météorologiques. Cependant, les données restent la plupart du temps difficiles d'accès au public ou parfois payantes. Nous avons donc dû utiliser les études réalisées dans le cadre de programmes scientifiques avec différents objectifs pour avoir un état de la qualité de l'air dans les villes africaines. Si une synthèse des mesures des concentrations de particules ( $\text{PM}_{2.5}$  et  $\text{PM}_{10}$ ) existe dans la littérature à l'échelle de l'Afrique (Petkova et al., 2013), ce n'est pas le cas pour les concentrations des polluants gazeux. Il apparaît assez difficile de donner une caractérisation moyenne de la pollution gazeuse en Afrique en raison de l'indisponibilité des résultats des études réalisées. Les résultats disponibles ne sont pas toujours publiés. L'une des principales sources de pollution gazeuse dans l'atmosphère des villes africaines est le trafic routier émettant du  $\text{NO}_2$  et du  $\text{SO}_2$ .

Ainsi pour terminer, nous proposons une synthèse des principales études scientifiques réalisées dans les villes africaines sur les concentrations gazeuses de  $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$ . Ces études

ont été menées à différentes échelles de temps (horaire, journalière, hebdomadaire, mensuelle et annuelle) dans les environnements urbains et industriels africains. Ceci est le résultat d'une recherche documentaire basée sur des études menées en Afrique entre 2005 et 2017. Les publications scientifiques dans lesquelles la méthodologie de collecte des données a été clairement décrite ont été sélectionnées et listées dans les tableaux III.12 et III.13 respectivement pour NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>. La figure 3.22 présente les pays africains pour lesquels des études de surveillance du NO<sub>2</sub> et du SO<sub>2</sub> ont été identifiées et incluses dans ce travail. Les pays appartenant à la même sous-région ont été mis dans la même couleur. Ainsi les pays sont colorés en rouge pour l'Afrique du Nord, en jaune pour les pays de l'Afrique de l'Ouest, en vert pour l'Afrique centrale, en orange pour l'Afrique de l'Est et en violet pour l'Afrique Australe.



**Figure 3.22:** Pays africains colorés par sous-région pour lesquelles des mesures de NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> ont été identifiées entre 2005 et 2017.

Cette recherche documentaire nous a permis de recenser des études sur la mesure de NO<sub>2</sub> et de SO<sub>2</sub> dans au moins 20 pays africains. La plupart de ces mesures ont été réalisées dans sept pays d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Mali, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Nigeria, Ghana et Bénin) et dans cinq pays d'Afrique de l'Est (Soudan, Kenya, Ethiopie, Ouganda et Tanzanie). Des études ont également été identifiées dans quatre pays d'Afrique du Nord (Algérie, Tunisie, Maroc et Égypte), trois pays d'Afrique australe (Afrique du Sud, Angola et Mozambique) et un pays d'Afrique centrale (Cameroun). Pour comparer les niveaux de concentration de NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> gazeux en Afrique aux normes de l'OMS sur la qualité de l'air, nous présentons respectivement dans les tableaux III.12 et III.13, pour chaque polluant et pour chaque pays, les concentrations moyennes, minimales et maximales lorsqu'elles sont disponibles.

Les mesures journalières ou horaires de NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> n'existent pas dans la majorité des villes africaines. Dans la plupart des études que nous avons trouvées, des campagnes de mesure de ces polluants ont été menées avec différentes méthodes (échantillonnage passif, analyseurs en temps réel ou mesures satellitales). Ainsi, seules quelques rares études permettent la comparaison avec les normes de l'OMS. La majorité des valeurs de concentrations trouvées dans la littérature étaient exprimées en µg.m<sup>-3</sup>. Nous avons donc converti toutes les valeurs dans cette unité par soucis d'uniformité. Nous donnons les taux de conversion des concentrations en µg.m<sup>-3</sup> pour chacun des gaz à une température moyenne de 25°C (298 K).

- 1 µg.m<sup>-3</sup> NO<sub>2</sub> = 0,53 ppb NO<sub>2</sub> (soit 1 ppb NO<sub>2</sub> = 1,88 µg.m<sup>-3</sup> NO<sub>2</sub>)

- 1 µg.m<sup>-3</sup> SO<sub>2</sub> = 0,38 ppb NO<sub>2</sub> (soit 1 ppb SO<sub>2</sub> = 2,62 µg.m<sup>-3</sup> SO<sub>2</sub>)

- 1 µg.m<sup>-3</sup> NH<sub>3</sub> = 1,36 ppb NO<sub>2</sub> (soit 1 ppb NO<sub>2</sub> = 0,74 µg.m<sup>-3</sup> NH<sub>3</sub>).

### **III.6.1. Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) dans les villes africaines**

Selon l'OMS, une exposition de courte durée (1 heure) à une concentration de 200 µg.m<sup>-3</sup> de NO<sub>2</sub> est toxique et a des effets importants sur la santé. Trois études avec un pas de temps moyen d'une heure ont été recensées et notées dans le tableau III.12. Il s'agit des études réalisées par Jackson (2005) en Tanzanie et par Adon et al. (2016) au Sénégal et au Mali. Elles montrent que la concentration horaire de NO<sub>2</sub> varie entre (18 µg.m<sup>-3</sup> - 53 µg.m<sup>-3</sup>), (9,4 µg.m<sup>-3</sup> - 150 µg.m<sup>-3</sup>) et (15,8 µg.m<sup>-3</sup> - 135 µg.m<sup>-3</sup>) à Dar-es-Salam, Dakar et Bamako respectivement. Ces niveaux de concentration sont largement sous le seuil de l'OMS.

**Tableau III.12:** Revue des niveaux de concentration de NO<sub>2</sub> en µg.m<sup>-3</sup> dans les capitales africaines à différentes échelles de temps (horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel) entre 2005 et 2017.

Pays	Ville	Durée d'exposition	Concentration de NO <sub>2</sub>			Références
			min	max	moyenne	
Sénégal	Dakar	Annuelle	3,5	19,6	-	Demay et al., 2011
Burkina Faso	Ouagadougou		22	27	-	Nanaa et al., 2012
Afrique du Sud	Northeastern		2	7	-	Josipovic et al., 2010)
Tunisie	Ben Arous		-	-	178	Chaaban, 2008
Sénégal	Dakar		41,37	84,61	59,6	Adon et al., 2016
Mali	Bamako		18,8	41,37	30,46	Adon et al., 2016
Côte d'Ivoire	Abidjan trafic		21,34	25,95	23,25	Cette étude
Mozambique	Maputo	Mensuelle	2,6	21,0	9,1	Cumbane et al., 2008
Sénégal	Dakar		48,0	70,0	-	Lioussé et Galy-Lacaux, 2010
Côte d'Ivoire	Abidjan		28,2	31,2	29,8	Lioussé et Galy-Lacaux, 2010
Cameroun	Yaoundé		15,0	51,7	33,3	Lioussé et Galy-Lacaux, 2010
Burkina Faso	Ouagadougou		51,1	66,9	57,7	Lioussé et Galy-Lacaux, 2010
Mali	Bamako		32,7	87,2	58,0	Lioussé et Galy-Lacaux, 2010
Côte d'Ivoire	Abidjan Traffic		22,6	44,9	33,5	Bahino et al., 2018
Côte d'Ivoire	Abidjan Industriel	14,4	47,0	39,3	Bahino et al., 2018	
Nigeria	Imo State/ Owerri	hebdomadaire	864	1015,34		Ibe et al., 2016
Ouganda	Kampala	2 semaines	9,32	52,9	24,9	Kirenga et al., 2015
Ghana	Accra	96 Heures	21,06	66,75		Arku et al., 2008
Bénin	Cotonou	24 heures	169,22	752,1		Mama et al, 2013
Kenya	Nairobi		0,1	245		Kaboro Beth, 2006
Maroc	Marrakech		10	35		Inchaouh et al., 2017
Egypte	Caire				164	Chaaban, 2008
Nigeria	Niger Delta		224	472		Obanijesu, 2009
Égypte	Caire		33,4	93,7	66,8	Hassan et al., 2013
Éthiopie	Addis-Abeba					Abera , 2009
Mali	Bamako		24,82	93,26	59,6	Adon et al., 2016
Tanzanie	Dar El Salam	1 heure	18	53		Jackson, 2005
Sénégal	Dakar		9,4	150		Adon et al., 2016
Mali	Bamako		15,8	135		Adon et al., 2016

Les lignes directrices de l'OMS pour la qualité de l'air indiquent que la valeur seuil pour l'exposition annuelle à la concentration de NO<sub>2</sub> est de 40 µg.m<sup>-3</sup>. Sept études ont été réalisées sur une période d'au moins un an à Dakar (Sénégal), Ouagadougou (Burkina Faso), Bamako (Mali), Abidjan (Côte d'Ivoire), Northeastern (Afrique du Sud) et Ben Arous (Tunisie) (Chaaban,

2008; Demay et al., 2011; Josipovic et al., 2010; Nanaa et al., 2012). Les concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> à Ben Arous, en Tunisie (178 µg.m<sup>-3</sup>) et à Dakar, au Sénégal (59,6 µg.m<sup>-3</sup>) dépassent la valeur seuil de l'OMS (40 µg.m<sup>-3</sup>).

Près de dix-neuf études ont été recensées aux échelles journalières, hebdomadaires et mensuelles. Huit études journalières ont été recensées avec des concentrations moyennes variant de 0,1 µg.m<sup>-3</sup> sur un site trafic de Nairobi (Kaboro, 2006) à 752 µg.m<sup>-3</sup> sur le site trafic du marché Dantokpa à Cotonou (Mama et al., 2013). Seulement 3 études mesurant le NO<sub>2</sub> sur une échelle de temps comprise entre 96h et 2 semaines ont été identifiées. La plus forte concentration (1015,34 µg.m<sup>-3</sup>) a été mesurée dans la ville d'Owerri, capitale de l'état pétrolier d'Imo au Nigeria (Ibe et al., 2016). Hormis cette valeur extrême, les concentrations varient de 9,32 µg.m<sup>-3</sup> dans les sites urbains de Kampala (Ouganda) à 60 µg.m<sup>-3</sup> dans les bidonvilles d'Accra (Ghana).

Les concentrations mensuelles moyennes de NO<sub>2</sub> sont comprises entre 2,6 µg.m<sup>-3</sup> et 87,2 µg.m<sup>-3</sup> pour les huit études répertoriées. Les valeurs les plus faibles ont été mesurées à Maputo (Mozambique) dans un site résidentiel et dans une zone verte. La concentration moyenne mensuelle à Maputo est de 9,13 µg.m<sup>-3</sup> et varie entre 2,6 µg.m<sup>-3</sup> et 21 µg.m<sup>-3</sup> (Cumbane et al., 2008). La concentration mensuelle moyenne la plus élevée de NO<sub>2</sub> a été mesurée à Bamako avec 58 µg.m<sup>-3</sup> (Lioussse et Galy-lacaux, 2010).

Les concentrations moyennes annuelles mesurées à Dakar, Ouagadougou, Abidjan et Northestern sont plus faibles et varient respectivement entre (3,5 µg.m<sup>-3</sup> et 19,6 µg.m<sup>-3</sup>), (22 µg.m<sup>-3</sup> et 27 µg.m<sup>-3</sup>), (21,34 µg.m<sup>-3</sup> et 25,95 µg.m<sup>-3</sup> et (2 µg.m<sup>-3</sup> et 7 µg.m<sup>-3</sup>). On observe de grandes différences entre les concentrations de NO<sub>2</sub> mesurées à Dakar par Demay et al. (2011) et celles mesurées par Adon et al (2016). Cette différence de concentration entre les travaux de Demay (3,5 µg.m<sup>-3</sup> et 19,6 µg.m<sup>-3</sup>) et ceux d'Adon (41.37 µg.m<sup>-3</sup> et 84.61 µg.m<sup>-3</sup>) pourrait être liée à la nature des équipements utilisés. En effet, les travaux de Demay ont utilisé des analyseurs actifs du centre de gestion de la qualité de l'air à Dakar, fournissant des données horaires pendant toute l'année 2010. Demay a relevé que ces équipements ont rencontré beaucoup de difficultés dans leur fonctionnement et environ 70 % des données ont pu être utilisées sur certains sites. Contrairement à ces travaux, ceux d'Adon ont utilisé des capteurs passifs exposés tous les 15 jours sur la période 2008-2009.

Notre étude montre que les données disponibles sur les concentrations de NO<sub>2</sub> dans les villes africaines ne sont comparables que dans très peu de cas aux seuils de l'OMS. Ces études

utilisent aussi bien des analyseurs passifs que des analyseurs actifs dont la maintenance n'est pas toujours bien assurée. Il serait donc judicieux pour les pouvoirs publics des pays africains de mettre en place des réseaux de surveillance de NO<sub>2</sub> aux échelles temporelles horaires et journalières. Les mesures réalisées doivent être réalisées en utilisant des méthodes référencées aux standards internationaux en métrologie (choix des sites représentatifs en zone urbaine, type d'instrument, calibration, étalonnage, report des données) pour obtenir des résultats fiables et comparables.

### **III.6.2. Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) dans les villes africaines**

L'OMS indique que des changements de la fonction pulmonaire et des symptômes respiratoires apparaissent après une période d'exposition de 10 minutes à une concentration de 500 µg.m<sup>-3</sup> de SO<sub>2</sub>. Nous n'avons trouvé dans la littérature aucune étude réalisée avec un intervalle de temps minimum de 10 minutes dans les villes africaines.

Trois études sur les concentrations horaires de SO<sub>2</sub> ont été trouvées. Les concentrations horaires de SO<sub>2</sub> dans les villes africaines sont comprises entre 9,14 µg.m<sup>-3</sup> et 1385 µg.m<sup>-3</sup>. Les plus fortes valeurs ont été mesurées à Dar-es-Salaam (Tanzanie) où les concentrations mesurées sur des sites trafic varient entre 558 µg.m<sup>-3</sup> et 1385 µg.m<sup>-3</sup> (Jackson, 2005). En Afrique de l'Ouest (Mali et Burkina), les concentrations sont beaucoup plus faibles et sont comprises 9,14 µg.m<sup>-3</sup> et 136 µg.m<sup>-3</sup>.

Pour une exposition pendant 24 heures à des concentrations élevées de SO<sub>2</sub>, des taux de mortalité significatifs ont été signalés (Burnett et al., 2004). Le seuil de concentration de SO<sub>2</sub> donné par les lignes directrices de l'OMS pour une exposition de 24 heures est de 20 µg.m<sup>-3</sup>. Huit études menées à l'échelle journalière sont rapportées dans le tableau III.13. Les mesures effectuées à Cotonou (Bénin) ont été effectuées au carrefour du marché de Dantokpa, caractérisé par une circulation importante d'engin à deux roues fonctionnant avec des moteurs à 2 ou 4 temps. Les concentrations moyennes journalières se situent entre 784,8 µg.m<sup>-3</sup> et 3662,4 µg.m<sup>-3</sup> (Mama et al., 2013). Ces concentrations sont de 39 à 183 fois plus élevées que la valeur seuil de l'OMS. À Dakar (68,54 µg.m<sup>-3</sup>), au Caire (34 µg.m<sup>-3</sup>) et à Bamako (29,03 µg.m<sup>-3</sup>), les concentrations moyennes journalières de SO<sub>2</sub> sont aussi supérieures à 20 µg.m<sup>-3</sup>. On remarque que seulement 2 études menées à Marrakech (Maroc) et à Tunis (Tunisie) ont des plages de concentration inférieures au seuil. À Nairobi et à Khartoum, la concentration maximale peut atteindre et parfois dépasser le seuil.

Environ six études rapportent des concentrations hebdomadaires et mensuelles de SO<sub>2</sub> (figure 3.32). En général, les concentrations hebdomadaires et mensuelles de SO<sub>2</sub> en Afrique varient de 0,77 µg.m<sup>-3</sup> à 18,9 µg.m<sup>-3</sup>. Les concentrations hebdomadaires mesurées dans l'état pétrolier d'Imo (Nigéria) sont beaucoup plus élevées. Elles varient plutôt entre 1203 µg.m<sup>-3</sup> à 1465 µg.m<sup>-3</sup> (Ibe et al., 2016).

**Tableau III.13:** Revue des niveaux de concentration de SO<sub>2</sub> en µg.m<sup>-3</sup> dans les capitales africaines à différentes échelles de temps (horaire, journalier, hebdomadaire, mensuel et annuel)

Pays	ville	durée d'exposition	Concentration de SO <sub>2</sub>			Références
			min	max	moyenne	
Algérie	Alger	Annuelle	-	-	360	Chaaban, 2008
Tunisie	Ben Arous		-	-	104	Chaaban, 2008
Nigeria	Lagos		6,01	50,22	-	Raheem et al 2009
Égypte	Caire		-	-	69	Chaaban, 2008
Maroc	Rabat		8	144	-	Chaaban, 2008
Burkina Faso	Ouagadougou		0,5	10,5	-	Nanaa et al., 2012
Afrique du Sud	Notheastern		2	29	-	Josipovic et al, 2010
Kenya	Nairobi		4,9	119,4	-	Kaboro, 2006
Sénégal	Dakar		10,46	83,7	41,6	Adon et al., 2016
Mali	Bamako		5,23	18,31	9,42	Adon et al., 2016
Côte d'Ivoire	Abidjan		2,77	3,66	3,5	Bahino PhD, 2017
Mozambique	Maputo	Mensuelle	0,48	16,05	1,25	Cumbane et al., 2008
Côte d'Ivoire	Abidjan Traffic		3,63	18,86	11,09	Bahino et al., 2018
Côte d'Ivoire	Abidjan Industriel		4,19	4,92	4,58	Bahino et al., 2018
Nigeria	Imo state	Hebdomadaire	1203	1465	-	Ibe et al., 2016
Ouganda	Kampala	2 semaines	0,77	8,35	3,79	Kirenga et al., 2015
Ghana	Accra	96 Heures	2,87	3,21	-	Arku et al., 2008
Kenya	Nairobi	24 heures	0,2	476,5	119,4	Kaboro, 2006
Maroc	Marrakech		8	12	-	Inchaouh et al., 2017
Soudan	Karthoum		4	180	-	khogali, 2016
Tunisia	Tunis		0,36	15,17	-	Kchih et Cherif, 2015
Bénin	Cotonou		784,8	3662,4	-	Mama et al., 2013
Égypte	Caire		17,2	57,2	34	Hassan et al, 2013
Sénégal	Dakar		30,34	102,55	68,54	Adon et al., 2016
Mali	Bamako		12,81	51,27	29,03	Adon et al., 2016
Tanzanie	Dar-es-Salaam		1 heure	558	1385	-
Sénégal	Dakar	14,38		136,03	-	Adon et al., 2016
Mali	Bamako	9,41		60,7	-	Adon et al., 2016

Des concentrations moyennes annuelles de SO<sub>2</sub> ont été indiquées dans 11 études scientifiques. Les concentrations mesurées en Afrique du Nord sont les plus élevées. Les niveaux moyens de SO<sub>2</sub> y sont compris entre 8 µg.m<sup>-3</sup> à Rabat (Maroc) et 325 µg.m<sup>-3</sup> à Alger (Algérie). En Afrique de l'Ouest, les concentrations sont plus faibles et vont de 0,5 µg.m<sup>-3</sup> à Ouagadougou (Burkina Faso) à 80 µg.m<sup>-3</sup> à Dakar (Sénégal). La concentration moyenne annuelle de SO<sub>2</sub> à Abidjan (3,66 µg.m<sup>-3</sup>) est l'une des plus faibles des villes ouest-africaines rapportées dans cette étude.

On peut remarquer qu'il existe peu d'études aux échelles de temps comparables avec les normes de l'OMS. Comme pour le NO<sub>2</sub>, des mesures standardisées devraient être effectuées sur le long terme et selon les normes de l'OMS.

### **III.7. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'étudier les résultats d'une campagne de mesure à moyen terme de concentrations de polluants gazeux (NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> et O<sub>3</sub>) réalisée sur 3 sites à Abidjan (Côte d'Ivoire) et un site à Cotonou (Bénin). Chacun de ces sites est représentatif des principales sources de pollution en Afrique de l'Ouest et identifiées dans le cadre du programme DACCIWA qui sont les feux domestiques, le trafic routier et les feux de décharge. Les résultats obtenus sur ces sites ont été comparés à d'autres mesures effectuées pendant la même période sur des sites trafic à Bamako (Mali) et Yaoundé (Cameroun). Au cours de cette étude nous avons collecté et analysé au total 5620 échantillons de gaz sur la période de Décembre 2014 à Avril 2017.

La base de données établie a été utilisée pour évaluer à partir de l'analyse en composante principale, la contribution de chaque source aux concentrations de polluants gazeux mesurées sur chaque site. Les résultats indiquent que :

- le site feux domestiques de Yopougon émet principalement NH<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub>. Ils constituent à eux deux 99 % des polluants émis. Le NO<sub>2</sub> mesuré sur ce site provient à 21 % de la source feux domestiques. NO<sub>2</sub> sur ce site provient aussi du trafic à proximité.
- sur le site trafic d'Adjamé, trois polluants sont essentiellement émis. Il s'agit de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> et NH<sub>3</sub> qui constituent 97,4 % des polluants émis par la source trafic avec un pourcentage de 70 % pour NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>.

- sur le site de la décharge d'Akouédo situé à la périphérie de la ville d'Abidjan on a observé l'émission de polluants issus des transformations photochimiques ( $O_3$ ,  $HNO_3$ ).
- à Cotonou, sur le site du marché Dantokpa, deux polluants majeurs ont été mesurés provenant de sources différentes.  $SO_2$  est principalement issu de la source trafic et  $NH_3$  provient de la source feux domestiques.

Nous avons aussi étudié les variations temporelles des concentrations des polluants sur chacun des sites. L'étude des variations mensuelles montre au cours d'une année une structure bimodale avec des pics d'amplitudes différentes. Le premier pic est généralement obtenu autour du mois de juillet à la fin de la saison pluvieuse tandis que le second pic beaucoup plus important est mesuré autour des mois de Novembre à Janvier pendant la grande saison sèche. La variabilité saisonnière s'est avérée être faible sur l'ensemble des sites et pour chacun des polluants. Cependant, nous avons remarqué la plupart du temps que les concentrations moyennes saisonnières des polluants sont plus importantes en saison sèche qu'en saison humide. Les concentrations moyennes annuelles calculées pour les années 2015 et 2016 pour tous les polluants sur chacun des sites ont montré une faible variabilité annuelle. Toutefois les concentrations mesurées en 2016 sont un plus élevées que celles mesurées en 2015.

Les concentrations moyennes obtenues à Abidjan et Cotonou ont été comparées à celles mesurées à Bamako et Yaoundé sur la même période et celles mesurées à Bamako et Dakar entre 2008 et 2009. Pour  $NO_2$ , on remarque que toutes les concentrations mesurées sont inférieures au seuil de l'OMS qui est de 21 ppb. De tous les sites trafic, ceux de Yaoundé (18,2 ppb) et de Cotonou (17,3 ppb), fortement influencés par la présence d'engins à deux roues ont les concentrations moyennes les plus élevées. La concentration moyenne de  $SO_2$  à Bamako est de loin la plus élevée. Cela laisse penser que le carburant utilisé à Bamako pourrait avoir une forte teneur en soufre. Les très fortes concentrations de  $NH_3$  mesurées sur le site feux domestiques d'Abidjan confirment bien que  $NH_3$  provient des processus de combustion de la biomasse. Les concentrations moyennes de  $O_3$  et  $HNO_3$  sont comparables dans toutes les villes.

Enfin, nous avons effectué une synthèse des principales études réalisées en Afrique sur la mesure de principaux polluants issus du trafic ( $NO_2$  et  $SO_2$ ). Les résultats indiquent que très peu de réseaux de surveillance de la qualité de l'air existent dans les villes africaines. Les rares données disponibles proviennent d'études réalisées dans le cadre de programmes de recherche. Ces études sont faites avec des techniques diverses et variées à des échelles de temps qui ne permettent pas de comparaisons avec les normes de l'OMS.

**Chapitre IV :**  
**Etude de la distribution spatiale des polluants gazeux à Abidjan et Cotonou**

## IV.1. Introduction

Dans le cadre du programme DACCIWA, nous avons présenté en introduction et dans le chapitre 2 les sites de mesures définis dans le cadre du WP2 « Pollution de l'air et Santé ». Ces sites ont été choisis comme représentatifs de 3 sources majeures de pollution en Afrique de l'Ouest (les feux domestiques, le trafic routier et les feux de décharge). Cependant, les villes africaines comme Abidjan et Cotonou présentent d'autres sources diverses de pollution non représentées par ce choix de sites. Par conséquent, nous avons proposé dans le cadre du WP2 de mettre en œuvre en parallèle des expériences de mesure moyen-terme (Chapitre III) des expériences intensives de mesures de la pollution gazeuse. Ainsi, afin de caractériser la pollution gazeuse dans ces villes et obtenir des ordres de grandeur des niveaux de concentration des polluants représentatifs de l'ensemble des villes d'Abidjan et de Cotonou, il nous est apparu opportun de prendre en compte la majorité des sources potentielles de pollution. C'est pourquoi, dans ce travail, nous avons développé une stratégie de mesures des concentrations des polluants sur un réseau de sites urbains et péri-urbains à Abidjan et Cotonou en saison sèche où le maximum de concentration est attendu (cf. section III.4.1.). Cette stratégie expérimentale a permis de prendre en compte d'autres sources de pollution telles que :

- Le secteur industriel,
- Le secteur résidentiel et commercial,
- Le secteur suburbain...

A Abidjan, le réseau a été réalisé sur la base d'un rapport d'étude du cabinet canadien TECSULT commandé par le ministère en charge de l'environnement en 2006. Cette étude avait pour objectif de créer un réseau de mesure de la qualité de l'air à Abidjan par l'installation de 50 instruments de mesure appelés pollumètres sur 50 sites. Malgré la réduction du nombre de sites à 15 due aux contraintes budgétaires, ce projet n'a toujours pas été mis en œuvre. Pour notre étude nous avons donc pris en compte, les 15 sites de mesures précédemment identifiés auxquels nous avons ajouté d'autres sites pour répondre aux objectifs du programme WP2.

Les principaux critères qui ont guidé le choix des sites à Abidjan sont :

- La prise en compte des sources majeures de pollution dans la ville,
- La répartition spatiale des sites dans la ville en installant au moins un site par commune,
- La prise en compte de la densité de la population qui pourrait être impactée,
- L'accessibilité et la sécurité des installations.

Des critères similaires ont aussi été utilisés pour le choix des sites à Cotonou. Cependant, les contraintes liées aux équipements disponibles ont conduit à un choix plus limité de sites.

Chacun des sites retenus pour ces campagnes intensives a été équipé en capteurs passifs INDAAF pour la mesure des concentrations des polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ) (cf. section II.2.1).

Les concentrations moyennes des polluants intégrées sur deux semaines ont été mesurées pendant 2 mois en saison sèche de Décembre à Février correspondant au maximum de concentration des polluants étudiés.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu les sites de mesures retenus pour cette étude à travers leur situation géographique et les sources majeures de pollution qui ont été identifiées à proximité. Ensuite les concentrations moyennes des polluants obtenues lors des différentes campagnes de mesures seront présentées. Les campagnes de mesures se sont déroulées à différentes périodes:

- sur 21 sites à Abidjan du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016,
- sur 23 sites à Abidjan et sur 8 sites à Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Les résultats obtenus aux points de mesure ont été interpolés sur toute la superficie des villes en utilisant différentes méthodes d'interpolation et le logiciel ArcGIS pour produire des cartes de pollution de chaque polluant. Les résultats de la première campagne de mesure à Abidjan ont fait l'objet d'un article intitulé « *A pilot study of gaseous pollutants' measurement ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  and  $\text{O}_3$ ) in Abidjan, Côte d'Ivoire: contribution to an overview of gaseous pollution in African cities* » et publié en 2018 dans le journal *Atmospheric Chemistry and Physics* (ACP). Cet article présente les résultats d'une étude originale de mesure des concentrations des polluants gazeux sur 21 sites et qui ont conduit à fournir les premières cartes de pollution de la ville d'Abidjan. Ensuite, cette publication a identifié les principales sources de pollution à Abidjan et évalué leurs contributions aux concentrations moyennes mesurées. Les résultats obtenus ont été placés dans un contexte régional et international à travers une comparaison des concentrations moyennes obtenues à Abidjan à celles mesurées dans d'autres villes d'Afrique et du monde. Enfin, la première revue bibliographique sur les concentrations de certains polluants gazeux dans les villes africaines a été présentée. L'entièreté de cet article est proposé en annexe de ce manuscrit.

## IV.2. Localisation des sites de mesures

### IV.2.1. Sites d'Abidjan

Deux campagnes intensives ont été réalisées à Abidjan pendant la grande saison sèche couvrant la période de Décembre à Février. Elles ont permis de mesurer les concentrations des polluants sur 27 sites de mesures au total. Les sites ont été identifiés à l'aide d'un code allant de SA1 à SA27. La figure 4.1 présente la répartition spatiale des 27 sites de mesures dans le district d'Abidjan. Dix sites parmi eux sont considérés comme des sites trafic à cause de leur proximité avec des voies de circulation intense (SA1 à SA6, SA21 à SA23 et SA18). Trois sites sont situés dans la zone industrielle de Yopougon (SA9), en zone 3 à Marcory (SA10) et dans la zone industrielle et portuaire de Vridi (SA11) à Port-Bouët. Six sites ont été placés dans des zones résidentielles (SA7, SA8, SA12, SA13, SA14 et SA20) caractérisées par l'utilisation de gaz butane, de bois de chauffe et de charbon de bois comme source d'énergie pour la cuisson.

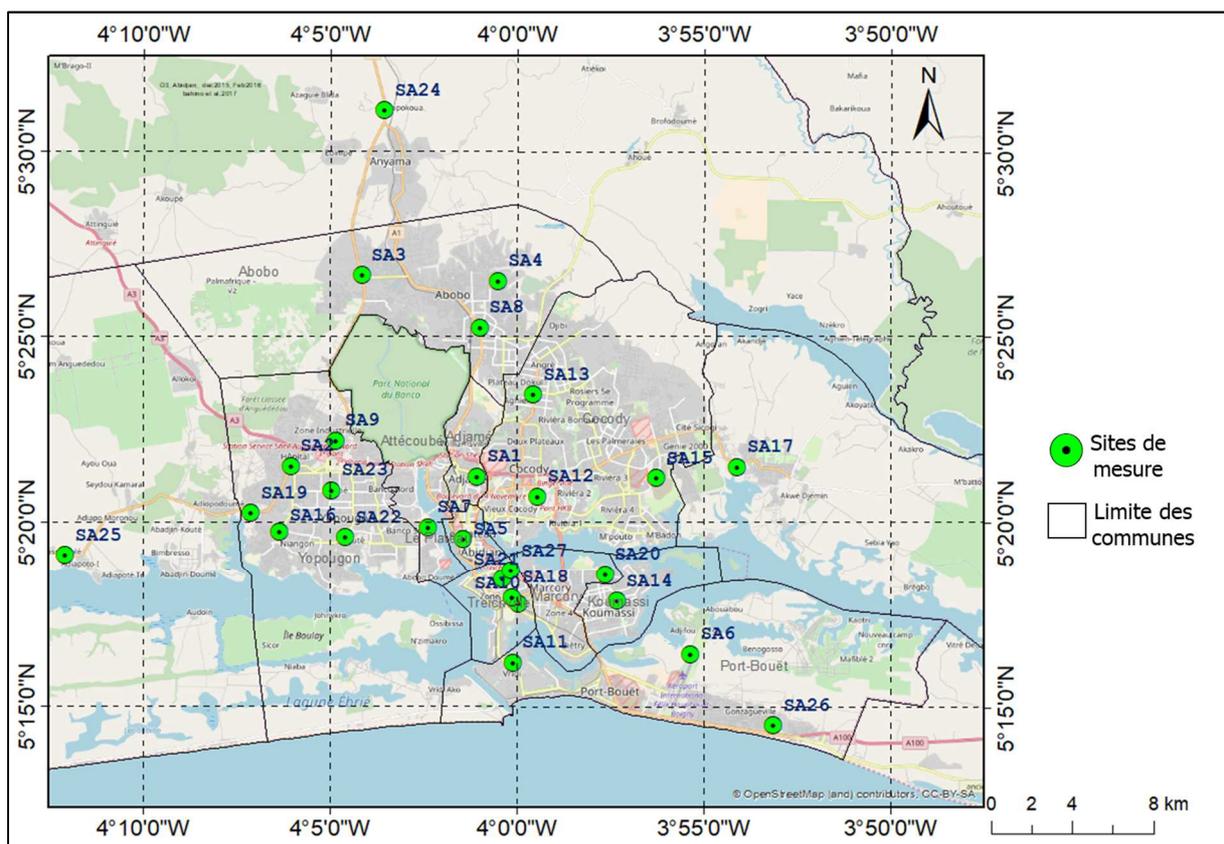


Figure 4.1: Répartition spatiale des sites de mesures dans le district d'Abidjan

Les deux sites situés à la périphérie de la ville (corridor de Yopougon Niangon (SA19) et Gonzagueville (SA26) et les trois situés dans les communes environnantes telles que Songon (SA25), Anyama (SA24) et Bingerville (SA17) ont été considérés comme des sites suburbains. On compte aussi les sites moyen-terme représentatifs des feux domestiques (SA16) à Yopougon et des feux de décharge (SA15) à la décharge d'Akouédo. Enfin, un site placé au centre de recherche écologique de Treichville (SA27) entouré de grands arbres et de verdure a été classé comme une zone verte.

Lors de la première campagne qui s'est déroulée du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, ce sont 21 sites de mesures qui ont été investigués. Le tableau IV.1 présente la liste des 21 sites de mesures, leur localisation et les sources majeures de pollution situées à proximité. Les premières cartes de distribution spatiale réalisées ont permis de constater que certaines zones d'Abidjan qui présentaient des sources potentielles de pollution n'avaient pas été prises en compte. Aussi, certaines zones présentaient des erreurs d'interpolation plus importantes liées à la faible densité du réseau de mesures en ces endroits. Nous avons donc dans la limite des moyens dont nous disposions, ajouté 6 sites supplémentaires lors de la deuxième campagne intensive qui s'est déroulée du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Ce sont :

- Collège Koffi Gadeau d'Abobo (SA4),
- Gare de Bassam (SA18) et Nanan Yamouso (SA20) à Treichville,
- Palais de justice (SA22) et Banco 2 (SA23) à Yopougon,
- « Sans fil » à Marcory (SA20).

Les sites suburbains et les sites faiblement impactés par les activités anthropiques lors de la première campagne intensive, n'ont pas été investigués à nouveau en considérant que les concentrations variaient très peu. Au final, la deuxième campagne intensive a concerné 23 sites de mesures présentés dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1:** Sites de mesures des polluants gazeux lors des deux campagnes intensives d'Abidjan. 1) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016. 2) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Code	Communes	Localisation des sites de mesure			Type de site	Campagnes intensives	
		Nom du site	Latitude	Longitude		1	2
SA1	ADJAME	Pharmacie 220 Logements	5°21'14"N	4°01'04"W	Trafic	X	X
SA2	YOPOUGON	Gesco	5°21'31"N	4°06'03"W	Trafic	X	X
SA3	ABOBO	Ndotré	5°26'41"N	4°04'10"W	Trafic	X	X
SA4	ABOBO	Collège Koffi Gadeau	5°26'33"N	4°00'31"W	Trafic		X
SA5	PLATEAU	Pharmacie Boulevard cadre	5°19'33"N	4°01'26"W	Trafic	X	X
SA6	PORT BOUET	Aéroport FHB	5°16'26"N	3°55'21"W	Trafic	X	X
SA7	ATTECOUBE	Mairie Attecoubé	5°19'52"N	4°02'23"W	Résidentiel	X	X
SA8	ABOBO	Mairie Abobo	5°25'15"N	4°01'00"W	Résidentiel	X	X
SA9	YOPOUGON	Zone industrielle	5°22'12"N	4°04'52"W	Industriel	X	X
SA10	MARCORY	Zone 3	5°17'48"N	3°59'57"W	Industriel	X	X
SA11	PORT BOUET	Tri Postal Vridi	5°16'12"N	4°00'07"W	Industriel/portuaire	X	X
SA12	COCODY	Université FHB	5°20'42"N	3°59'27"W	Résidentiel	X	X
SA13	COCODY	Angré les perles	5°23'27"N	3°59'34"W	Résidentiel	X	X
SA14	KOUMASSI	Place Inch'allah	5°17'52"N	3°57'20"W	Résidentiel	X	X
SA15	COCODY	Akouédo	5°21'12"N	3°56'16"W	Feux de décharge	X	X
SA16	YOPOUGON	Marché Lubafrique	5°19'44"N	4°06'21"W	Feux domestiques	X	X
SA17	BINGERVILLE	Pôle scientifique CNRI - UFHB	5°21'30"N	3°54'07"W	Suburbain	X	X
SA18	TREICHVILLE	Gare de Bassam	5°17'58"N	4°00'08"W	Trafic		X
SA19	YOPOUGON	Corridor Niangon Adjamé	5°20'15"N	4°07'08"W	Suburbain	X	X
SA20	MARCORY	Marcory sans fil	5°18'35"N	3°57'39"W	Résidentiel		X
SA21	TREICHVILLE	Nanan Yamouso	5°18'27"N	4°00'24"W	Trafic		X
SA22	YOPOUGON	Palais de Justice	5°19'36"N	4°04'36"W	Trafic		X
SA23	YOPOUGON	Banco 2	5°20'52"N	4° 4' 58"W	Trafic		X
SA24	ANYAMA	Corridor Anyama	5°31'8"N	4°03'34"W	Suburbain	X	
SA25	SONGON	Centre de sante urbain	5°19'6"N	4°12'06"W	Suburbain	X	
SA26	PORT-BOUET	Gonzagueville	5°14'31"N	3°53'09"W	Suburbain	X	
SA27	TREICHVILLE	CRE (Centre de Recherche Ecologique)	5°18'41"N	4°00'10"W	zone verte	X	

#### IV.2.2. Sites de Cotonou

Huit sites de mesures ont été identifiés et instrumentés à Cotonou. Chacun des sites a reçu un code d'identification allant de SC1 à SC8. Cinq sites ont été installés sur la rive gauche de la ville tandis que trois autres ont été placés sur la rive droite. La figure 4.2 montre la répartition spatiale des sites dans la ville de Cotonou.



**Figure 4.2:** Répartition spatiale des sites de mesures dans la ville de Cotonou.

Une partie des sites choisis sont situés à proximité de voies de circulation et ont été classés comme des sites trafic. Il s'agit du carrefour du marché Dantokpa (SC1), des CEG (Collège d'Enseignement Générale) Gbgamey (SC2), Zobgo (SC6) et Akapka centre (SC7). Les autres sites situés à proximité des zones résidentielles et dans des quartiers populaires ont été classés comme sites résidentiels. Le tableau IV.2 présente les caractéristiques de chaque site de Cotonou.

**Tableau IV.2:** Sites de mesures des polluants gazeux à Cotonou lors de la campagne intensive en saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Code	Arrondissement	Localisation des sites			Type de site
		Nom des sites	Latitude	Longitude	
SC1	6	Dantokpa	6°22'25"N	2°26'20"E	Trafic
SC2	11	CEG Gbégamey	6°21'33"N	2°24'59"E	Zone portuaire
SC3	12	Aéroport (Cardinal Bernadin G)	6°21'26"N	2°23'00"E	Résidentiel
SC4	8	Mairie de Cotonou	6°22'34"N	2°24'47"E	Résidentiel
SC5	3	CEG Sègbeya	6°22'59"N	2°26'38"E	Résidentiel
SC6	9	CEG Zogbo	6°23'29"N	2°23'41"E	Trafic
SC7	4	CEG Akpaka centre	6°22'09"N	2°26'49"E	Trafic
SC8	1	Dandji	6°21'52"N	2°29'10"E	Résidentiel

### IV.3. Concentrations moyennes des polluants gazeux en saison sèche à Abidjan et Cotonou.

Les concentrations moyennes de chaque polluant gazeux mesurées toutes les deux semaines sur chaque site sont indiquées dans les tableaux A3.1, A3.2 et A3.3 en annexe III respectivement pour Abidjan campagne 1 et 2 et Cotonou. Les concentrations moyennes calculées à partir des quatre périodes de deux semaines ont été utilisées pour fournir des cartes de distribution spatiale des polluants. Les concentrations moyennes des polluants et les écart-types calculés à Cotonou lors de la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 sont présentés dans le tableau IV.3. Le tableau IV.4 présente les concentrations moyennes des polluants obtenues lors des 2 campagnes intensives réalisées à Abidjan du 15 Décembre 2015 au 15 février 2016 et du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. Les cases vides dans le tableau IV.4 représentent des sites qui n'ont pas été investigués lors de l'une ou l'autre des campagnes de mesures.

**Tableau IV.3:** Concentration moyenne en ppb des polluants gazeux mesurés en saison sèche à Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Code	Nom des sites	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>
SC1	Dantokpa	20,1 ± 1,4	2,0 ± 0,4	19,5 ± 1,1	2,1 ± 0,4	19,7 ± 2,5
SC2	College Gbégamey	8,5 ± 1,9	0,4 ± 0,1	10,6 ± 1,7	1,3 ± 0,2	21,7 ± 1,9
SC3	Aéroport (Cardinal Bernadin G)	5,4 ± 0,2	0,4 ± 0,1	8,1 ± 0,7	1,2 ± 0,2	33,5 ± 2,3
SC4	Mairie de Cotonou	13,9 ± 0,8	0,4 ± 0,1	34,5 ± 4,3	1,3 ± 0,3	18,6 ± 2,8
SC5	CEG Sègbeya	10,5 ± 0,8	0,7 ± 0,1	17,4 ± 1,5	1,3 ± 0,1	19,7 ± 1,9
SC6	CEG Zogbo	15,8 ± 0,4	0,7 ± 0,1	18,8 ± 0,6	1,1 ± 0,2	17,2 ± 2,7
SC7	CEG Akpapka centre	14,5 ± 0,7	0,7 ± 0,1	13,0 ± 0,9	1,4 ± 0,3	15,4 ± 1,6
SC8	Dandji	9,5 ± 0,7	0,3 ± 0,0	22,0 ± 0,9	1,1 ± 0,1	20,2 ± 2,4

**Tableau IV. 4:** Concentrations moyennes en ppb des polluants gazeux mesurées lors des deux campagnes intensives d'Abidjan : Campagne 1 du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, campagne 2 du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Site	campagne 1					campagne 2				
	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
SA1	20,8 ± 5,0	31,1 ± 6,1	1,1 ± 0,1	2,6 ± 1,4	11,3 ± 1,0	14,9 ± 1,7	26,5 ± 4,3	1,4 ± 0,2	1,7 ± 0,3	12,7 ± 1,5
SA2	11,6 ± 1,0	27,6 ± 2,3	0,6 ± 0,1	6,8 ± 1,3	12,4 ± 1,0	8,8 ± 1,8	47,5 ± 13,0	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	9,9 ± 1,3
SA3	12,2 ± 1,8	23,5 ± 2,4	0,4 ± 0,1	7,2 ± 1,2	8,9 ± 0,9	18,6 ± 1,8	21,9 ± 1,9	1,3 ± 0,3	1,3 ± 0,3	10,6 ± 0,9
SA4	-	-	-	-	-	17,6 ± 2,5	22,7 ± 1,7	1,0 ± 0,3	1,1 ± 0,1	11,1 ± 1,1
SA5	23,9 ± 4,9	23,0 ± 2,2	1,1 ± 0,4	3,1 ± 1,1	7,8 ± 0,4	21,3 ± 2,3	15,5 ± 2,5	0,7 ± 0,2	2,4 ± 0,5	7,5 ± 0,7
SA6	6,9 ± 0,9	18,8 ± 1,9	0,9 ± 0,1	0,4 ± 0,2	18,8 ± 3,0	5,7 ± 0,6	13,5 ± 2,9	0,8 ± 0,3	0,5 ± 0,1	17,2 ± 2,3
SA7	17,5 ± 2,9	37,0 ± 10,9	1,2 ± 0,5	1,5 ± 0,5	12,4 ± 2,0	15,8 ± 2,2	23,9 ± 4,6	1,4 ± 0,7	1,6 ± 0,6	12,9 ± 1,1
SA8	20,4 ± 2,1	30,6 ± 3,6	1,1 ± 0,3	1,4 ± 0,6	10,5 ± 1,9	18,1 ± 1,8	47,1 ± 4,6	0,9 ± 0,6	0,9 ± 0,3	9,2 ± 1,8
SA9	19,9 ± 3,4	21,6 ± 2,8	1,3 ± 0,2	1,8 ± 0,7	12,2 ± 1,3	38,8 ± 1,6	28,8 ± 1,8	0,7 ± 0,1	4,5 ± 1,0	5,3 ± 0,6
SA10	17,7 ± 1,0	20,9 ± 2,9	0,8 ± 0,1	1,6 ± 0,4	8,8 ± 1,5	15,6 ± 1,4	56,1 ± 10,5	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,0	8,2 ± 1,0
SA11	25,0 ± 1,7	19,6 ± 1,6	0,7 ± 0,2	1,9 ± 0,5	9,6 ± 1,9	27,2 ± 1,8	19,9 ± 2,9	0,7 ± 0,1	1,6 ± 0,2	7,1 ± 1,9
SA12	12,5 ± 2,4	23,9 ± 5,0	1,0 ± 0,3	0,7 ± 0,1	14,0 ± 0,5	12,5 ± 2,0	10,9 ± 1,1	1,6 ± 0,3	1,5 ± 0,2	20,1 ± 3,7
SA13	18,5 ± 2,2	26,9 ± 2,4	1,2 ± 0,3	1,7 ± 0,1	12,9 ± 1,9	13,5 ± 1,3	13,7 ± 1,4	1,2 ± 0,4	1,1 ± 0,5	12,8 ± 2,1
SA14	17,6 ± 1,9	67,7 ± 8,3	0,6 ± 0,1	1,1 ± 0,3	7,6 ± 2,4	15,4 ± 1,8	28,5 ± 1,6	1,6 ± 0,3	1,9 ± 0,3	15,2 ± 1,5
SA15	12,0 ± 1,4	39,1 ± 2,1	1,3 ± 0,2	1,2 ± 0,7	17,6 ± 1,9	12,3 ± 0,3	42,6 ± 14,7	1,5 ± 0,3	0,9 ± 0,2	13,3 ± 2,2
SA16	18,3 ± 0,6	102,1 ± 9,1	1,2 ± 0,2	1,1 ± 0,2	10,2 ± 1,4	21,1 ± 1,1	117,3 ± 9,1	1,4 ± 0,3	1,0 ± 0,3	10,9 ± 2,3
SA17	13,6 ± 3,7	22,5 ± 6,1	1,4 ± 0,3	1,0 ± 0,3	16,8 ± 3,0	5,5 ± 0,5	9,8 ± 1,5	0,7 ± 0,1	0,4 ± 0,0	15,8 ± 0,9
SA18	-	-	-	-	-	33,5 ± 2,8	23,2 ± 1,7	0,7 ± 0,1	3,6 ± 0,4	7,5 ± 0,8
SA19	5,4 ± 0,3	44,0 ± 2,2	0,2 ± 0,0	3,4 ± 1,0	6,8 ± 0,7	10,7 ± 0,3	26,7 ± 0,7	0,8 ± 0,2	1,3 ± 0,5	8,2 ± 1,1
SA20	-	-	-	-	-	16,2 ± 1,6	28,5 ± 2,9	1,0 ± 0,1	1,7 ± 0,1	12,8 ± 2,2
SA21	-	-	-	-	-	22,6 ± 1,2	48,0 ± 4,5	0,6 ± 0,0	1,8 ± 0,2	6,8 ± 1,1
SA22	-	-	-	-	-	9,5 ± 0,8	27,3 ± 2,4	0,8 ± 0,3	0,6 ± 0,2	11,9 ± 1,0
SA23	-	-	-	-	-	12,4 ± 2,2	23,1 ± 3,6	1,0 ± 0,1	0,5 ± 0,1	10,9 ± 1,1
SA24	7,7 ± 0,6	32,2 ± 3,8	0,2 ± 0,0	4,7 ± 0,8	5,1 ± 0,6	-	-	-	-	-
SA25	2,7 ± 0,1	9,1 ± 1,7	0,7 ± 0,2	1,9 ± 0,2	12,3 ± 1,1	-	-	-	-	-
SA26	6,9 ± 0,5	14,3 ± 2,6	0,8 ± 0,4	0,4 ± 0,1	19,1 ± 1,7	-	-	-	-	-
SA27	6,0 ± 0,7	13,6 ± 2,9	0,6 ± 0,2	0,4 ± 0,1	13,6 ± 1,4	-	-	-	-	-

#### IV.4. Méthodes d'interpolation spatiale dans les réseaux de qualité de l'air

L'interpolation spatiale permet à l'aide de fonctions mathématiques d'estimer des valeurs de pollution en tous points ou nœuds d'une grille régulière superposée à un domaine d'étude sur la base de mesures ponctuelles et dispersées. Elle repose sur l'application de méthodes spécifiques de spatialisation des données et l'utilisation de logiciels adaptés.

Il existe deux groupes principaux de méthodes d'interpolation : les méthodes déterministes et les méthodes géostatistiques.

- Les techniques d'interpolation déterministes reposent sur des propriétés purement mathématiques et permettent de créer des surfaces à partir de points mesurés, en fonction du degré de similarité (c'est le cas par exemple avec la pondération par l'inverse de la distance) ou du degré de lissage (fonctions de base radiale).
- Les techniques d'interpolation géostatistique (krigeage) utilisent les propriétés statistiques des points mesurés. Les techniques géostatistiques quantifient l'auto-corrélation spatiale parmi les points mesurés et tiennent compte de la configuration spatiale des points d'échantillonnage autour de l'emplacement de prévision.

Deux méthodes d'interpolation sont fréquemment utilisées pour étudier la distribution spatiale des polluants dans les réseaux de qualité de l'air. Il s'agit de la méthode de pondération par l'inverse de la distance (PID) ou IDW (Inverse Distance Weighted) et du krigeage.

La formule générale utilisée (4.1) par les deux interpolateurs pour prédire la concentration en un point est une combinaison linéaire des concentrations mesurées aux points échantillonnés.

$$Z_{pi} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_{oi} \quad (4.1)$$

$Z_{oi}$ : Concentration observée (mesurée) au point  $i$ ,

$Z_{pi}$ : Concentration prédite par le modèle d'interpolation au point  $i$ ,

$N$ : Nombre de points de mesure  $i$ .

$\lambda_i$ : Pondération de la valeur relevée au point  $i$ .

##### IV.4.1. La pondération par l'inverse de distance ou IDW (Inverse Distance Weighted)

L'interpolation par pondération inverse de la distance (IDW) détermine la concentration prévue en point comme la moyenne pondérée des concentrations mesurées aux points

d'échantillonnage voisins (Ibrahim et al., 2012; Rivera-Gonzalez et al., 2015). La pondération est une fonction de l'inverse de la distance. Le poids,  $\lambda_i$  dépend uniquement de la distance entre les points de mesures et l'emplacement de prédiction. Cette méthode suppose que l'influence du polluant étudié décroît avec la distance par rapport à l'emplacement échantillonné.

#### IV.4.2. Le krigeage

Le krigeage est la méthode d'interpolation dérivant de la théorie des variables régionalisées selon laquelle la variation spatiale des concentrations des polluants est statistiquement homogène. Le krigeage dépend de l'expression de la variation spatiale de la propriété en fonction du variogramme, et minimise les erreurs de prédiction qui sont elles-mêmes estimées (Oliver et Webster, 1990). Pour cette méthode, les poids  $\lambda_i$  ne sont pas donc seulement basés sur la distance mais aussi sur l'arrangement spatial global des sites d'échantillonnage.

##### IV.4.2.1. Analyse du comportement spatial des données et modélisation statistique

Dans le cadre de la méthode géostatistique du krigeage, la prise en compte des caractéristiques spatiales naturelles du polluant se fait à l'aide d'une analyse variographique ou analyse structurale. Cette analyse est fondamentale pour le choix du modèle d'interpolation à appliquer aux données expérimentales. L'analyse variographique permet de quantifier la variabilité spatiale du polluant à partir des valeurs observées aux différents sites ponctuels de mesures et en fonction de la distance qui les sépare.

- *Le semi-variogramme des données*

Le variogramme illustre ainsi la continuité ou corrélation spatiale du phénomène étudié. En pratique, plus la distance entre deux sites de mesures est grande et moins les mesures sont corrélées. Le variogramme empirique peut être estimé à partir de la formule 4.2 proposé par Wong et al. (2004).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^h [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4.2)$$

où  $N(h)$  est le nombre de paires dont les points sont espacées de la distance  $h$ .

$x_i$  et  $x_{i+h}$  sont deux points séparés par la distance  $h$

$Z(x_i)$  et  $Z(x_{i+h})$  sont les concentrations mesurées aux point  $x_i$  et  $x_{i+h}$ .

On obtient donc une série de points expérimentaux auxquels on cherche à ajuster un modèle permettant de déduire la covariance entre deux points quelconque en fonction de leur espacement. L'outil krigeage propose différents modèles de semi-variogrammes empiriques qui peuvent être de type sphérique, gaussien, circulaire, exponentiel ou linéaire. Une fois le modèle adopté, toute la suite des calculs se fait avec les valeurs obtenues du modèle et non avec les valeurs expérimentales.

- ***Paramètre des semi-variogrammes***

La portée, le seuil et la pépite sont couramment utilisés pour décrire ces modèles. Les semi-variogrammes empiriques obtenus sont couramment décrits à partir de ces trois paramètres définis comme suit :

- La pépite ( $C_0$ ) ou effet pépite est la semi-variance à une distance nulle.

C'est la valeur pour laquelle la courbe du semi-variogramme coupe l'axe des ordonnées. La pépite caractérise la variation à très courte échelle des concentrations mesurées, qui peuvent être dues à des erreurs de localisation, à la précision du capteur, à des erreurs d'analyse ou à la précision analytique.

- La portée ( $a$ ) est la distance en deçà de laquelle la dépendance spatiale est apparente.

Elle représente l'étendue spatiale de la structure dans les données. Au-delà de cette distance les observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne et ne sont plus liées linéairement. La valeur du semi-variogramme correspond alors à la variance de la variable aléatoire.

- Le seuil ( $C_s$ ) ou palier est la variance de la variable aléatoire.

C'est la valeur du semi-variogramme à la portée. Il représente l'écart le plus grand en moyenne entre deux variables aléatoires.

#### **IV.4.2.2. Résultats de l'analyse des données**

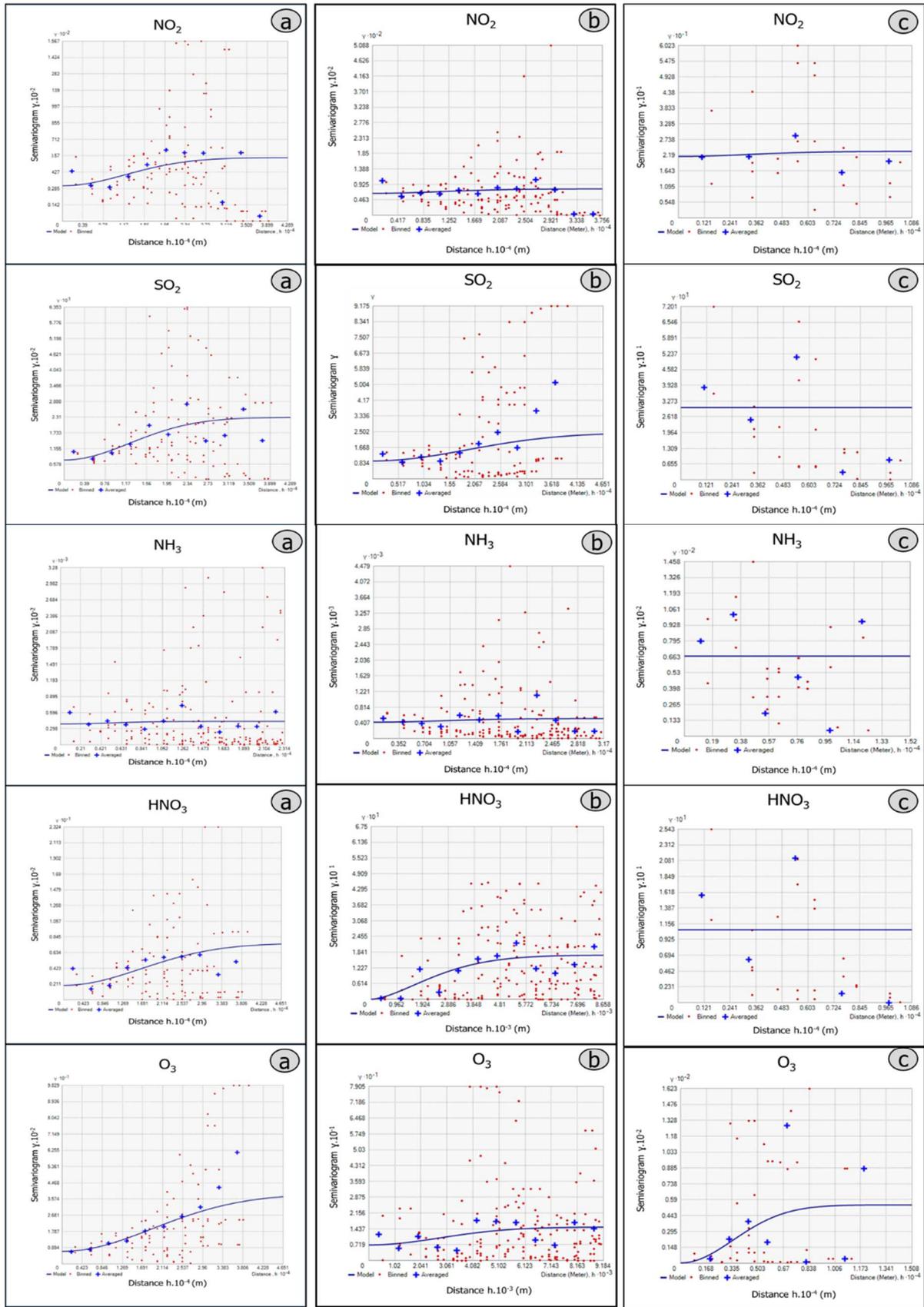
- ***Semi-variogrammes des données de pollution***

Les semi-variogrammes des données de pollution issues des campagnes intensives d'Abidjan et de Cotonou ont été réalisés à l'aide l'outil Geostatistical Analyst du logiciel ArcGIS version 10.2.2. Les résultats obtenus pour chaque polluant à Abidjan et Cotonou sont présentés à la figure 4.3. Les caractéristiques de chaque semi-variogramme sont représentées

dans le tableau IV.5. On remarque à Abidjan que lors des deux campagnes (1 et 2), les données suivent un modèle gaussien pour la majorité des gaz (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>). Ce résultat montre qu'il existe une dépendance ou auto-corrélation spatiale dans le jeu de données de ces gaz. A la différence des gaz précédents, les concentrations de NH<sub>3</sub> dans les deux campagnes et de NO<sub>2</sub> lors de la campagne 2 suivent plutôt un modèle pépitique. Cela indique qu'il n'y a pas d'homogénéité dans les variations spatiales des concentrations de NH<sub>3</sub> et traduit l'influence de certaines sources locales. En effet, des concentrations très élevées de NH<sub>3</sub> (4 à 5 fois supérieures aux autres sites) ont été mesurées sur les sites feux domestiques de Yopougon (SA16) et de Koumassi (SA14). Ces sites sont situés à moins de 5 m des sources de pollution. Il ne serait donc pas judicieux d'interpoler ces concentrations en utilisant le krigeage. A Cotonou, les semi-variogrammes suivent un modèle pépitique pour NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, et NH<sub>3</sub> indiquant aussi l'absence d'auto-corrélation spatiale dans les concentrations des polluants. Cela ici est plutôt dû à l'insuffisance des sites de mesures. Pour O<sub>3</sub> il y a auto-corrélation sur une distance inférieure à 8 km.

**Tableau IV.5:** Paramètres des semi-variogrammes

Villes	Campagnes de mesures	Paramètres du semi-variogramme	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Abidjan	Campagne 1 (15 Déc. 2015-15 Fév. 2016)	Pépité Co (ppb) <sup>2</sup>	30,90	456,79	0,07	1,93	6,93
		Seuil Cs (ppb) <sup>2</sup>	24,46	177,28	0,16	5,66	31,68
		Portée (km)	29,44	34,20	30,39	40,41	46,51
	Campagne 2 (15 Déc. 2016-15 Fév. 2017)	Pépité Co (ppb) <sup>2</sup>	65,88	427,56	0,00	0,95	7,07
		Seuil Cs (ppb) <sup>2</sup>	13,20	92,37	0,17	1,50	8,10
		Portée (km)	27,99	23,26	5,72	46,51	6,79
Cotonou	Campagne 2 (15 Déc. 2016-15 Fév. 2017)	Pépité Co (ppb) <sup>2</sup>	21,90	67,00	0,10	0,30	0,30
		Seuil Cs (ppb) <sup>2</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	53,80
		Portée (km)	15,20	15,20	15,20	15,20	8,40



**Figure 4.3:** Semi-variogrammes des concentrations des cinq polluants mesurés à Abidjan, du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 (a), du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 (b) et à Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 (c).

#### IV.4.3. Validation croisée et choix de la méthode d'interpolation (MAE, RMSE, R<sup>2</sup>)

Les erreurs de prédiction commise par chacun des modèles d'interpolation sont généralement estimées à partir de 3 tests statistiques. Ce sont l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>).

La meilleure méthode d'interpolation pour chaque polluant est celle qui minimise les erreurs (RMSE, MAE) et qui a un coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) le plus proche de 1.

##### IV.4.3.1. L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne ou Root Mean Square Error (RMSE) est l'écart-type des résidus. Les résidus représentent les erreurs de prédiction de la concentration en un point donné et donnent une mesure de la distance des points de données de la ligne de régression. RMSE est une mesure de la répartition de ces résidus. En d'autres termes, cela nous indique à quel point les données sont concentrées autour de la ligne de meilleur ajustement. L'erreur quadratique moyenne se calcule à partir de la formule (4.3) proposée par Barnston (1992) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{pi} - Z_{oi})^2} \quad (4.3)$$

##### IV.4.3.2. L'erreur absolue moyenne (MAE)

L'erreur absolue moyenne ou Mean Absolute Error (MAE) est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts entre la concentration mesurée  $Z_{oi}$  et la concentration prédite  $Z_{pi}$  en point  $i$  résidus. Il se calcule à partir de la formule suivante (4.4) :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_{pi} - Z_{oi}| \quad (4.4)$$

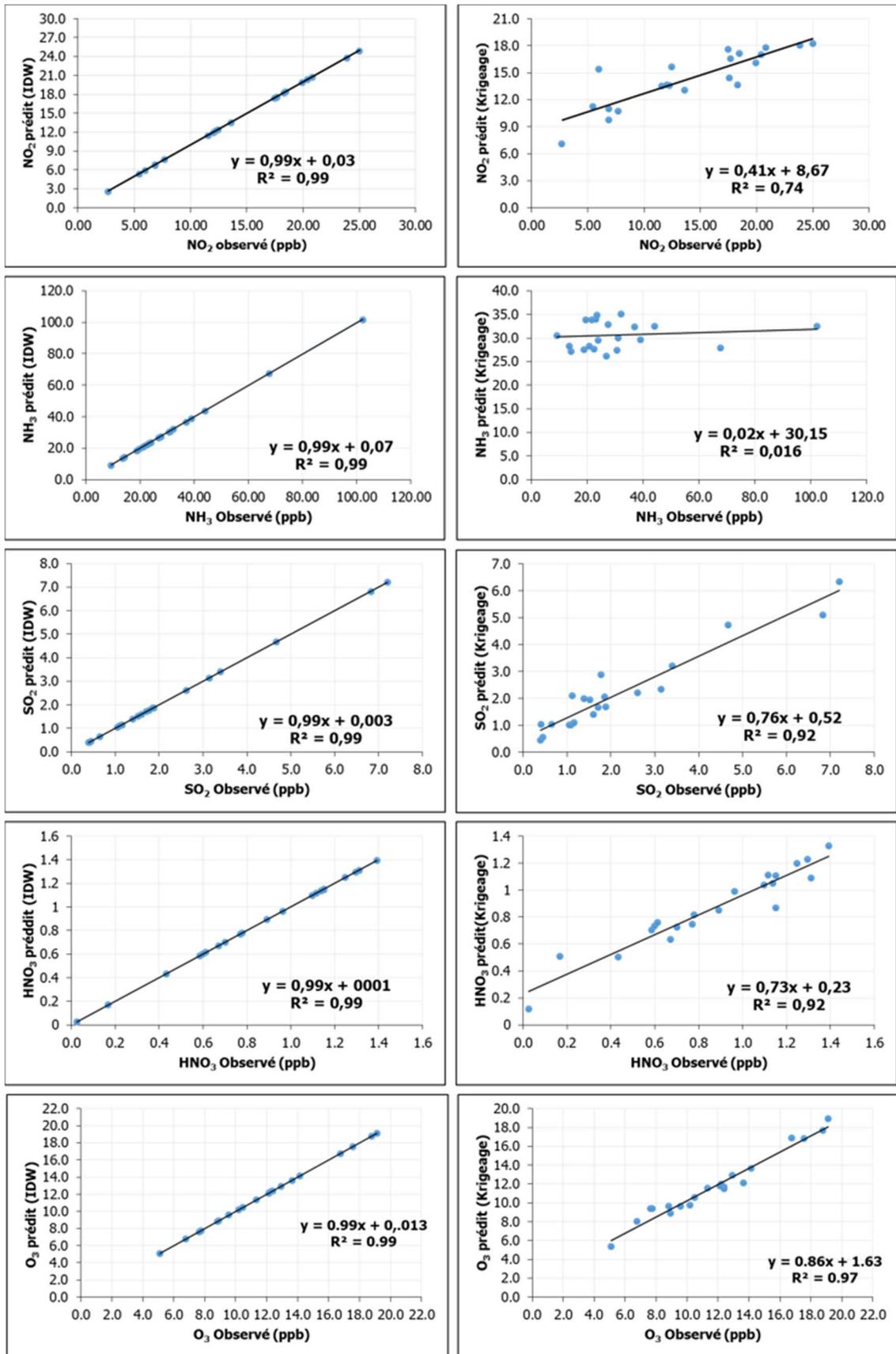
##### IV.4.3.3. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup>

Le coefficient de détermination mesure la relation linéaire ("proportionnalité") entre les valeurs de deux variables. Ainsi le coefficient est important si on souhaite ajuster une ligne droite. Cette droite est appelée droite de régression ou droite des moindres carrés, parce qu'elle est calculée pour minimiser la somme des carrés des distances de tous les points à la droite.

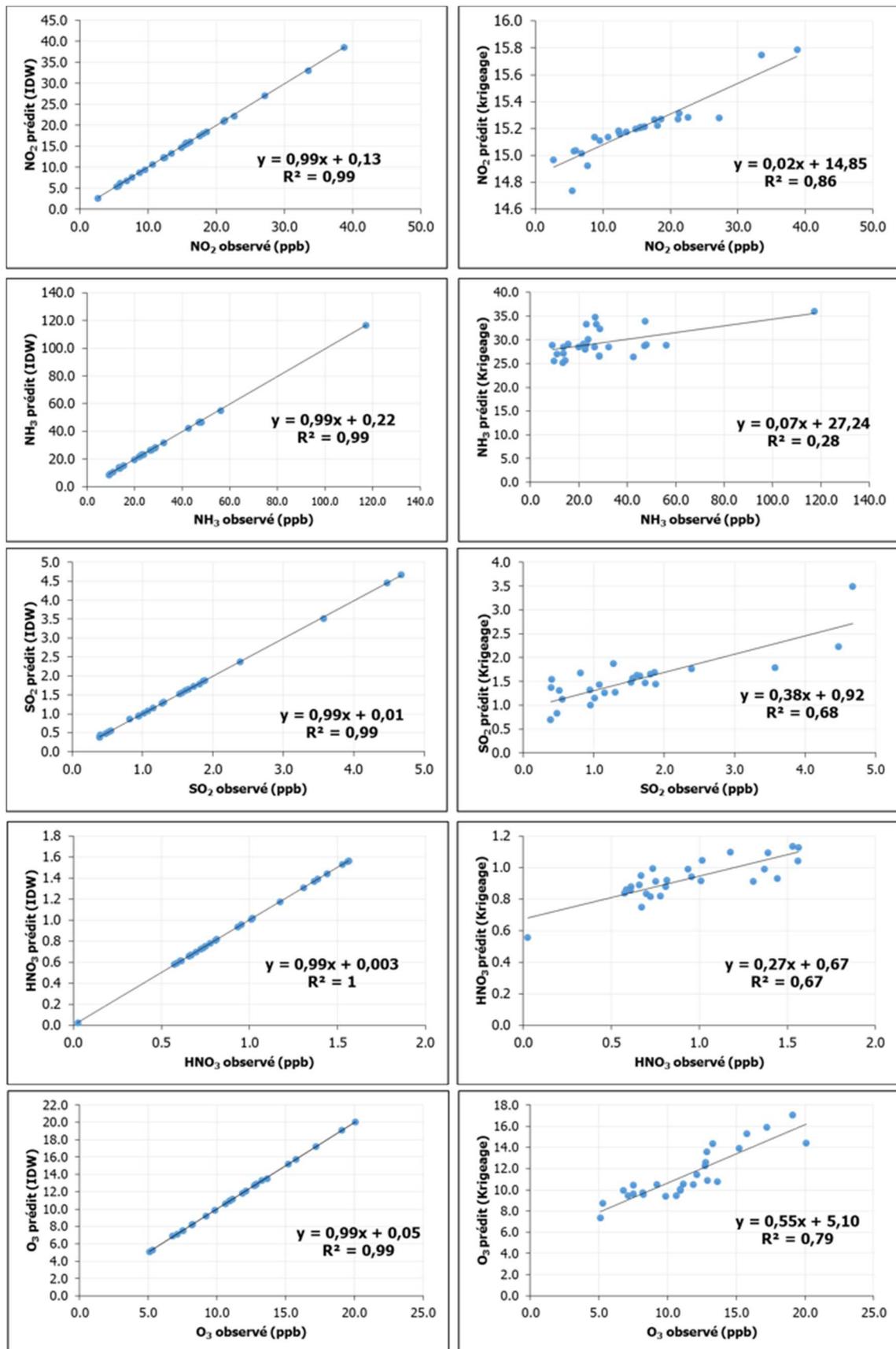
#### **IV.4.3.4. Résultats de la validation croisée**

Les courbes de régressions linéaires ont été tracées à partir des résultats de l'interpolation par IDW et par krigeage. Les résultats sont présentés aux figures 4.4, 4.5 et 4.6 respectivement pour la première et la deuxième campagne d'Abidjan et, pour la campagne de Cotonou. Les coefficients de corrélations calculés sont regroupés dans le tableau IV.6. Ils montrent que le meilleur ajustement linéaire est toujours obtenu en utilisant la méthode de pondération par l'inverse de la distance (IDW) quel que soit le polluant. Le coefficient de détermination  $R^2 = 0,99$  pour IDW et est compris entre 0,0160 et 0,97 pour le krigeage lors de la première campagne de mesure à Abidjan. Lors de la deuxième campagne à Abidjan le coefficient de régression variait entre 0,99 et 1 pour IDW et entre 0,28 et 0,86 pour le krigeage. A Cotonou, ce coefficient est égal à 1 pour IDW et compris 0,07 et 1 pour le krigeage. Le calcul des erreurs (MAE et RMSE) a aussi montré que les plus faibles erreurs ont chaque fois été obtenues pour IDW.

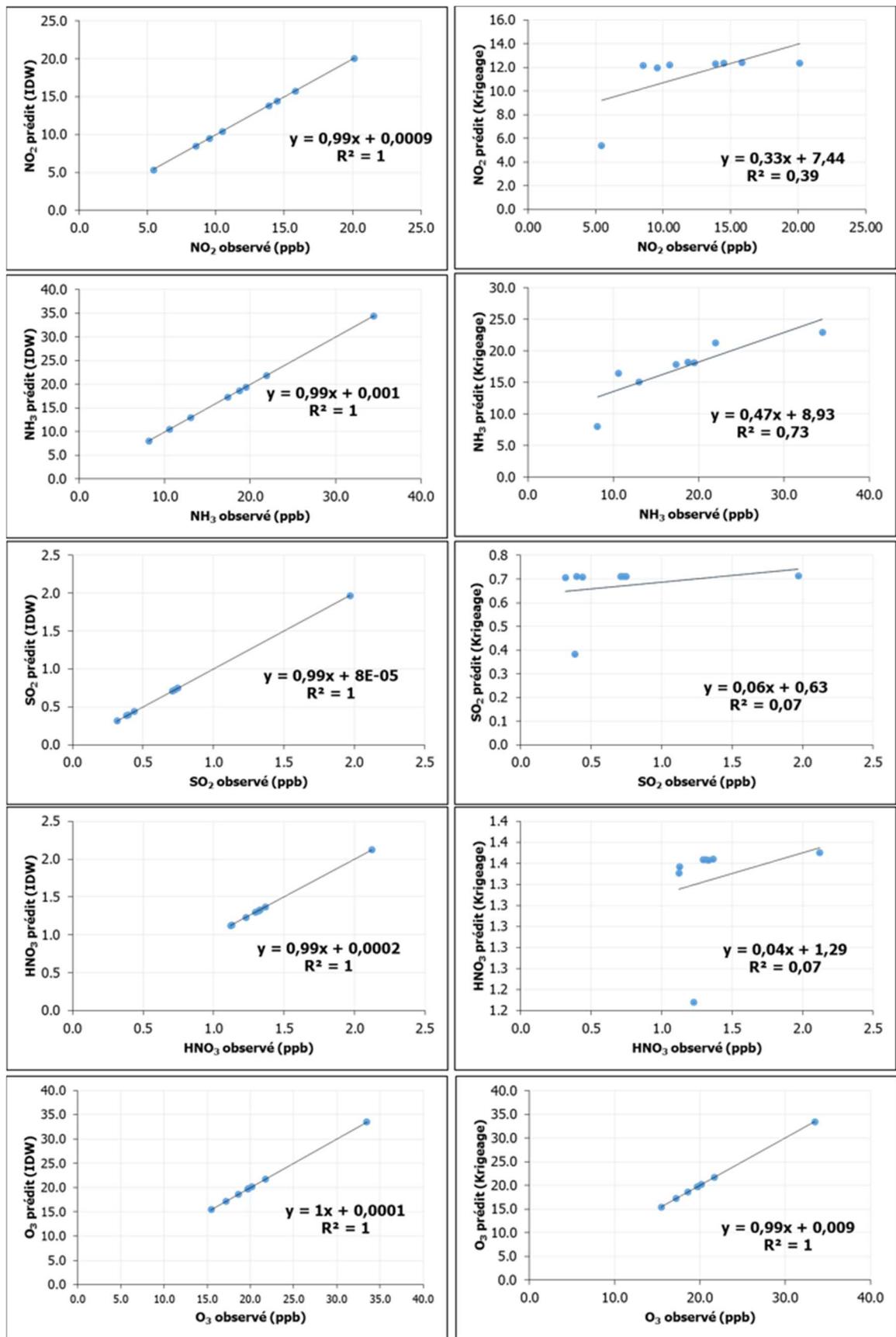
Les résultats de la validation croisée montrent que pour tous les polluants et pour chaque campagne de mesure, les erreurs d'interpolation les plus faibles et le meilleur ajustement linéaire ont été obtenus en utilisant la méthode de pondération inverse par la distance (IDW). Par conséquent, la méthode IDW a été retenue pour la réalisation des cartes de distributions spatiales des polluants.



**Figure 4.4:** Courbes de régression linéaires entre les concentrations des polluants observées à Abidjan (15 Déc. 2015- 15 Fév. 2016) et celles prédites par les modèles d'interpolation (IDW et Krigage).



**Figure 4.5:** Courbes de régression linéaires entre les concentrations des polluants observées à Abidjan (15 Déc. 2016- 15 Fév. 2017) et celles prédites par les modèles d'interpolation (IDW et Krigage).



**Figure 4.6:** Courbes de régression linéaires entre les concentrations des polluants observées à Cotonou (15 Déc. 2016- 15 Fév. 2017) et celles prédites par les modèles d'interpolation (IDW et Krigage).

**Tableau IV.6:** Résultats de la validation croisée pour les modèles d'interpolation krigeage et IDW.

Villes	Campagnes de mesures	Polluants	MAE		RMSE		R <sup>2</sup>	
			IDW	Krigeage	IDW	Krigeage	IDW	Krigeage
Abidjan	Campagne 1 (15 Déc. 2015- 15-Fév. 2016)	NO <sub>2</sub>	0,0100	3,4190	0,0310	4,0640	0,9990	0,7380
		NH <sub>3</sub>	0,0290	13,0160	0,0620	19,9450	0,9990	0,0160
		SO <sub>2</sub>	0,0030	0,4370	0,0060	0,6210	0,9990	0,9160
		HNO <sub>3</sub>	0,0000	0,0930	0,0000	0,1270	0,9990	0,9160
		O <sub>3</sub>	0,0070	0,6090	0,0090	0,8150	0,9990	0,9650
	Campagne 2 (15 Déc. 2016- 15 Fév. 2017)	NO <sub>2</sub>	0,0642	6,0988	0,2486	14,9099	0,9998	0,8573
		NH <sub>3</sub>	0,1488	13,4789	0,5372	36,5941	0,9999	0,2818
		SO <sub>2</sub>	0,0074	0,5166	0,0308	1,3812	0,9998	0,6792
		HNO <sub>3</sub>	0,0012	0,2311	0,0029	0,5148	1,0000	0,6738
		O <sub>3</sub>	0,0178	1,6551	0,0771	3,7381	0,9999	0,7874
Cotonou	Campagne 2 (15 Déc. 2016- 15 Fév. 2017)	NO <sub>2</sub>	0,0003	2,8314	0,0005	3,5441	1,0000	0,3938
		NH <sub>3</sub>	0,0003	2,8157	0,0005	4,6724	1,0000	0,7287
		SO <sub>2</sub>	0,0000	0,2848	0,0001	0,4871	1,0000	0,0697
		HNO <sub>3</sub>	0,0000	0,1698	0,0000	0,2913	1,0000	0,0700
		O <sub>3</sub>	0,0001	0,0072	0,0001	0,0090	1,0000	1,0000

#### IV.5. Cartes de distributions spatiales des polluants gazeux (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>) à Abidjan et Cotonou.

Dans ce travail de thèse, nous avons bénéficié d'une formation sur l'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour la réalisation des cartes de pollution lors d'une mission au siège de l'agence du bureau d'étude international « Ramboll Environment » à Aix en Provence (France). Cette mission avait pour but d'évaluer les différentes méthodes d'interpolations au regard des données de terrain collectées et de choisir la mieux adaptée. Elle a également permis de prendre en main le logiciel ArcGIS dans le but de produire les premières cartes de pollution des villes d'Abidjan et de Cotonou.

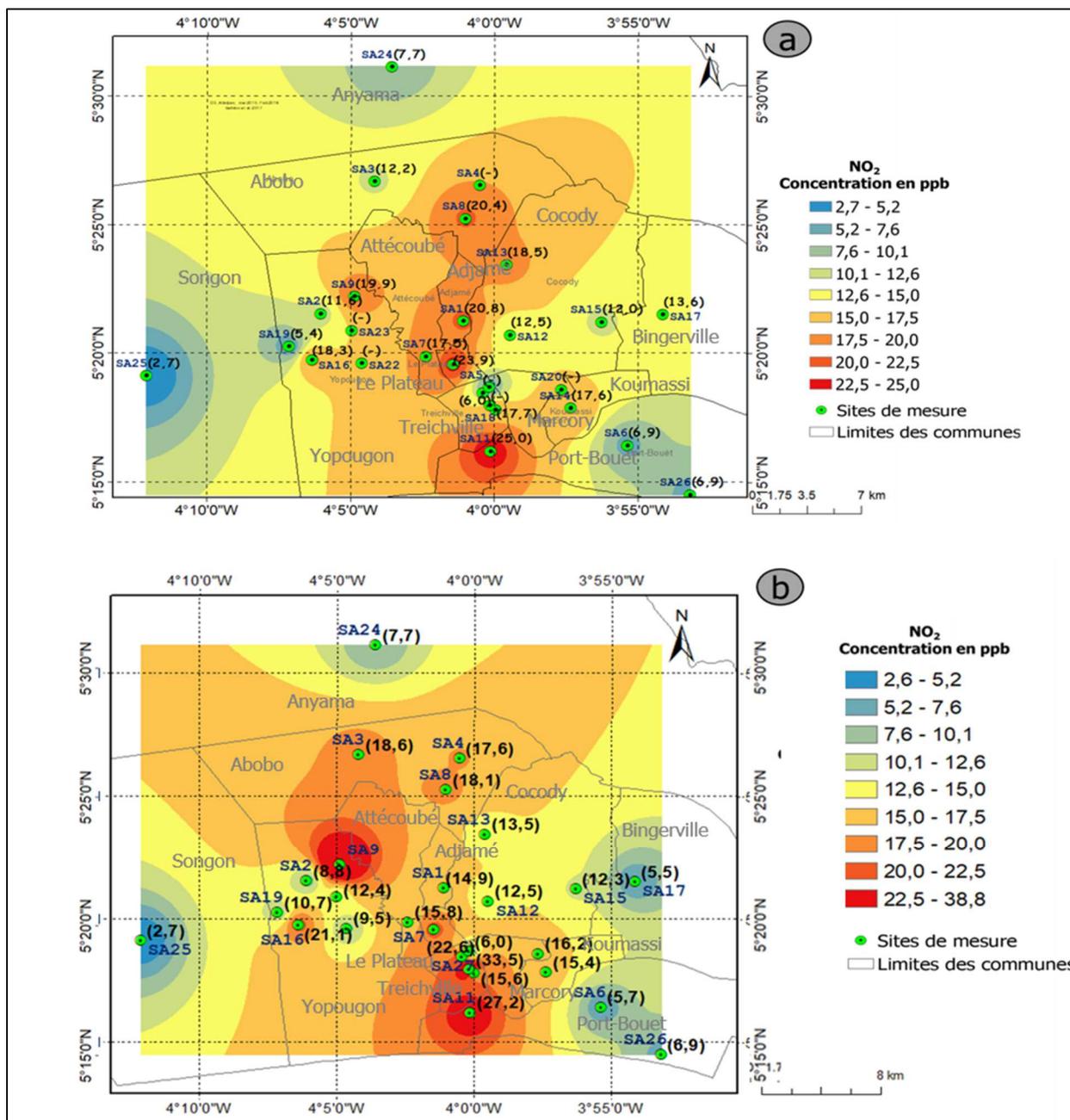
La création des cartes, l'ajout des différentes couches et le géo-traitement des données de concentration mesurées ont été réalisés à l'aide de l'application ArcMap du logiciel de traitement d'informations géographiques ArcGIS dans sa version 10.2.2. Sur toutes les cartes présentées dans cette section, les concentrations des polluants sont représentées par une échelle de couleur de concentration croissante allant du bleu au rouge. Les concentrations mesurées en ppb sur chacun des sites sont représentées entre parenthèse à côté de la référence du site. Chaque site de mesures est représenté par un identifiant SA1 à SA27 pour Abidjan et SC1 à SC8 pour Cotonou.

Dans cette section, nous présentons pour chaque gaz les résultats obtenus lors des deux campagnes intensives du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 et du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 à Abidjan. Nous insisterons davantage sur les résultats de la deuxième campagne car plus de sites ont été investigués. Nous présentons également les résultats de la campagne intensive réalisée à Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

#### **IV.5.1. Cartes de distribution spatiale de NO<sub>2</sub> à Abidjan et Cotonou**

##### **IV.5.1.1 Cartes de distribution spatiale de NO<sub>2</sub> à Abidjan**

Les répartitions spatiales des concentrations de NO<sub>2</sub> dans le district d'Abidjan lors de la première et de la deuxième campagne de mesure sont respectivement représentées sur les figures 4.7a et 4.7b. Ces cartes révèlent que les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> varient entre 2,7 ppb et 25 ppb lors de la première campagne et entre 2,7 ppb et 38,8 ppb lors de la seconde campagne de mesure. Elles montrent que les plus fortes concentrations ont été mesurées sur des sites situés dans les zones industrielles. Par exemple la figure 4.7b montre des concentrations respectives de  $38,8 \pm 1,6$  ppb et  $27,2 \pm 1,8$  ppb sur le site de la zone industrielle de Yopougon (SA9) et de celui du tri postal (SA11) situé dans la zone industrielle de Vridi. Ces valeurs élevées pourraient s'expliquer d'une part par l'accroissement du nombre d'industries et par le trafic intense dû à la circulation de gros camions. D'autre part à Vridi, ce sont les activités portuaires, le trafic intense et la présence de terminaux pétroliers qui sont susceptibles d'émettre du NO<sub>2</sub> qui pourraient expliquer ces niveaux de concentration. Ces activités en zones industrielles sont bien connues pour être la principale source d'émissions anthropiques d'oxyde d'azote dans l'atmosphère (Krzyzanowski et Cohen, 2008). Outre les sites industriels, de fortes concentrations ont aussi été mesurées sur des sites dominés par le trafic. C'est notamment le cas de la gare routière de Bassam (SA18) où la concentration moyenne mesurée est de  $33,5 \pm 2,8$  ppb. À proximité du boulevard Nanan Yamouso de Treichville (SA21) et dans la commune du plateau au centre-ville (SA5) les concentrations mesurées sont presque identiques avec  $22,6 \pm 1,2$  ppb et  $21,3 \pm 2,3$  ppb respectivement. Ces fortes concentrations mesurées à Abidjan à proximité des voies de circulation confirment que NO<sub>2</sub> est bien un traceur de la source trafic comme montré au chapitre 3 de ce mémoire (Istrate et al., 2014).



**Figure 4.7:** Distribution spatiale de NO<sub>2</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

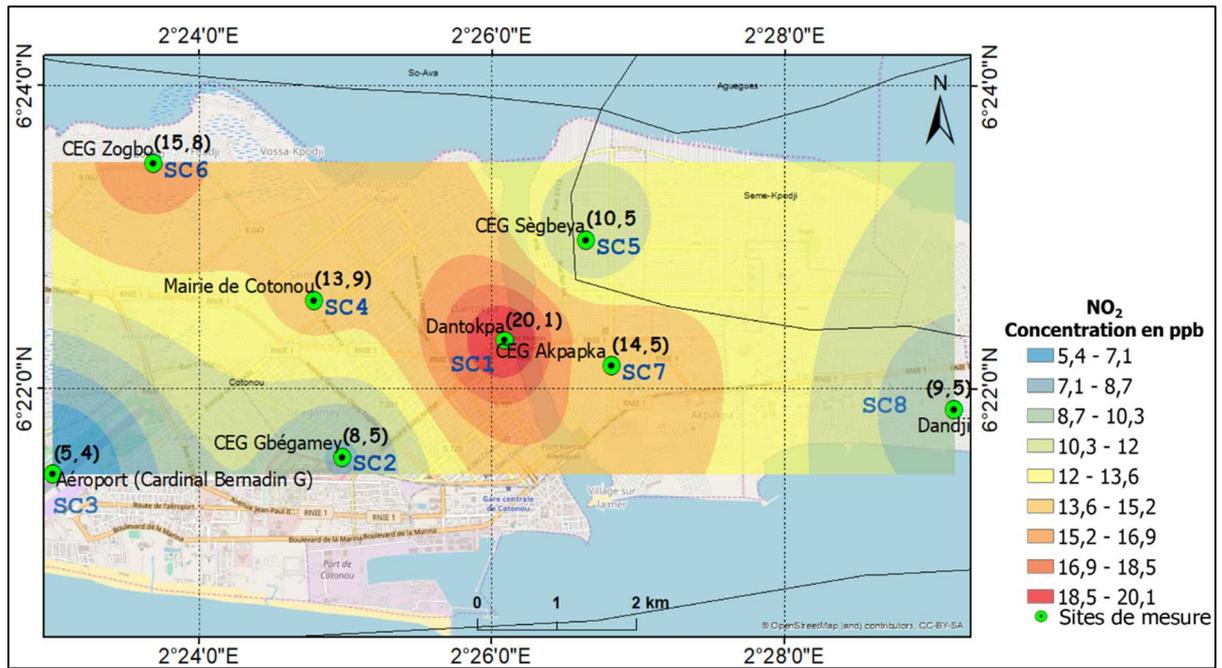
La plupart des véhicules sont de seconde main et ont un âge supérieur à 20 ans (Ministère des transports, 2017). Ces véhicules qui pour la plupart ne sont plus conformes aux normes de qualité de l'air en vigueur au sein des états de l'Union Européenne (UE), sont importés en masse et utilisés dans les transports en commun en raison de leurs prix modérés.

Outre les sites trafic et industriel, des concentrations comparables ont été mesurées sur le site feux domestiques de Yopougon (SA16) avec  $21,1 \pm 1,1$  ppb. La caractérisation des

sources avait montré que 21 % du NO<sub>2</sub> mesuré sur ce site provenait du trafic (cf. section III.3.2.1). La figure 4.7b permet de distinguer deux grandes zones. L'une où les concentrations sont comprises entre  $13,5 \pm 1,3$  ppb et  $18,6 \pm 1,8$  ppb et constituée en majorité de sites résidentiels (SA7, SA8, SA13, SA14, SA20) et de quelques sites trafic (SA1, SA3, SA4). Ils sont situés pour la plupart au Sud et au Nord de la ville. La seconde zone est constituée de sites ayant une concentration moyenne comprise entre  $2,7 \pm 0,1$  ppb et  $12,5 \pm 2,0$  ppb. La majorité de ces sites est située aux périphéries Est et Ouest de la ville. Ils sont moins influencés par la présence du trafic et beaucoup plus influencés par les émissions COV biogéniques liés à la présence de quelques forêts qui pourraient favoriser les transformations chimiques de NO<sub>2</sub> en d'autres composés.

#### **IV.5.1.2. Carte de distribution spatiale de NO<sub>2</sub> à Cotonou**

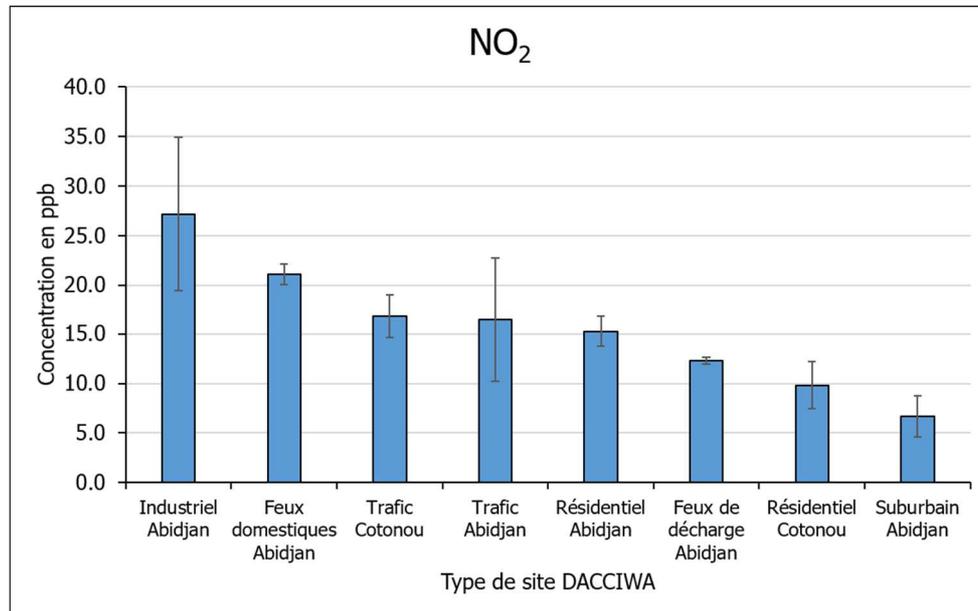
La figure 4.8 présente la distribution spatiale de NO<sub>2</sub> dans la ville de Cotonou. Les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> en saison sèche à Cotonou varient entre  $5,4 \pm 0,2$  ppb et  $20,1 \pm 1,4$  ppb. Les concentrations les plus élevées ont été mesurées dans le centre-ville notamment au carrefour du marché Dantokpa (SC1) caractérisé par un trafic important de taxi-motos (zemidjan). Des concentrations élevées ont aussi été mesurées sur le site trafic situé à proximité du CEG Zobgo (SC6) et sur le site du CEG Akpakpa centre (SC7) avec  $15,8 \pm 0,4$  ppb et  $14,5 \pm 0,7$  ppb respectivement. Les plus faibles concentrations de NO<sub>2</sub> ont été mesurées au Sud-Ouest de la ville. C'est le cas du site de l'aéroport Cardinal Bernandin Gantin (SC3) avec  $5,4 \pm 0,2$  ppb et du site du CEG Gbgamey (SC2) avec  $8,5 \pm 1,9$  ppb. Ces sites bien qu'étant à proximité du trafic routier présentent des gradients de concentration qui pourraient être liés au transport des polluants vers le centre-ville. En effet, la rose des vents établie à partir des données de l'aéroport de Cotonou (SC3) indique que les vents dominants sont de direction Sud-Sud-Ouest (cf. figure 2.20). Le NO<sub>2</sub> une fois émis pourraient ainsi être transporté et s'ajouter à ceux déjà émis dans le centre-ville. A la périphérie Est de la ville, sur le site du quartier populaire Dandji (SC8), la concentration moyenne de NO<sub>2</sub> est également faible et se situe autour de  $9,5 \pm 0,7$  ppb.



**Figure 4.8:** Distribution spatiale de  $\text{NO}_2$  à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Au regard des résultats obtenus à Abidjan et Cotonou on constate que les principales sources de  $\text{NO}_2$  sont localisées dans le centre-ville là où les activités industrielles et le trafic sont intenses. La figure 4.9 présente les concentrations moyennes de  $\text{NO}_2$  à Abidjan et à Cotonou par type de site. La concentration moyenne de  $\text{NO}_2$  sur les sites industriels à Abidjan est de  $27,2 \pm 7,7$ ppb. Cette valeur est en hausse par rapport à celle mesurée sur la période (Décembre 2015 - Février 2016) où la concentration moyenne mesurée était de  $20,9 \pm 2,8$  ppb (Bahino et al., 2018). Cet accroissement est en grande partie lié à la politique industrielle de la Côte d'Ivoire qui a favorisé ces dernières années l'installation de plusieurs nouvelles unités de production dans les zones industrielles. Le site feux domestiques vient en second lieu avec une concentration moyenne de  $21,1 \pm 1,1$  ppb. Cela indique que cette source peut émettre de grandes quantités de  $\text{NO}_2$  et que les actions visant à l'amélioration de la qualité de l'air doivent en tenir compte. Sur les sites trafic d'Abidjan et de Cotonou, les concentrations moyennes sont pratiquement identiques avec  $16,5 \pm 6,2$  ppb et  $16,8 \pm 2,2$  ppb respectivement bien que les sources de pollution soient différentes. À Abidjan la concentration moyenne de  $\text{NO}_2$  en saison sèche est restée stable comparée à celle mesurée lors de la campagne précédente qui était de  $17,8 \pm 4,7$  ppb (Bahino et al., 2018). L'étude montre aussi une grande différence dans les concentrations moyennes de  $\text{NO}_2$  mesurées sur les sites résidentiels à Abidjan ( $15,2 \pm 1,5$  ppb) et Cotonou ( $9,8 \pm 2,4$  ppb). Les sites résidentiels à Abidjan sont très souvent traversés par des

voies de circulations bitumées avec un trafic plus dense qu'à Cotonou. Comme on aurait pu s'y attendre la concentration moyenne sur les sites suburbains est moins importante à Abidjan avec  $6,7 \pm 2,1$  ppb.



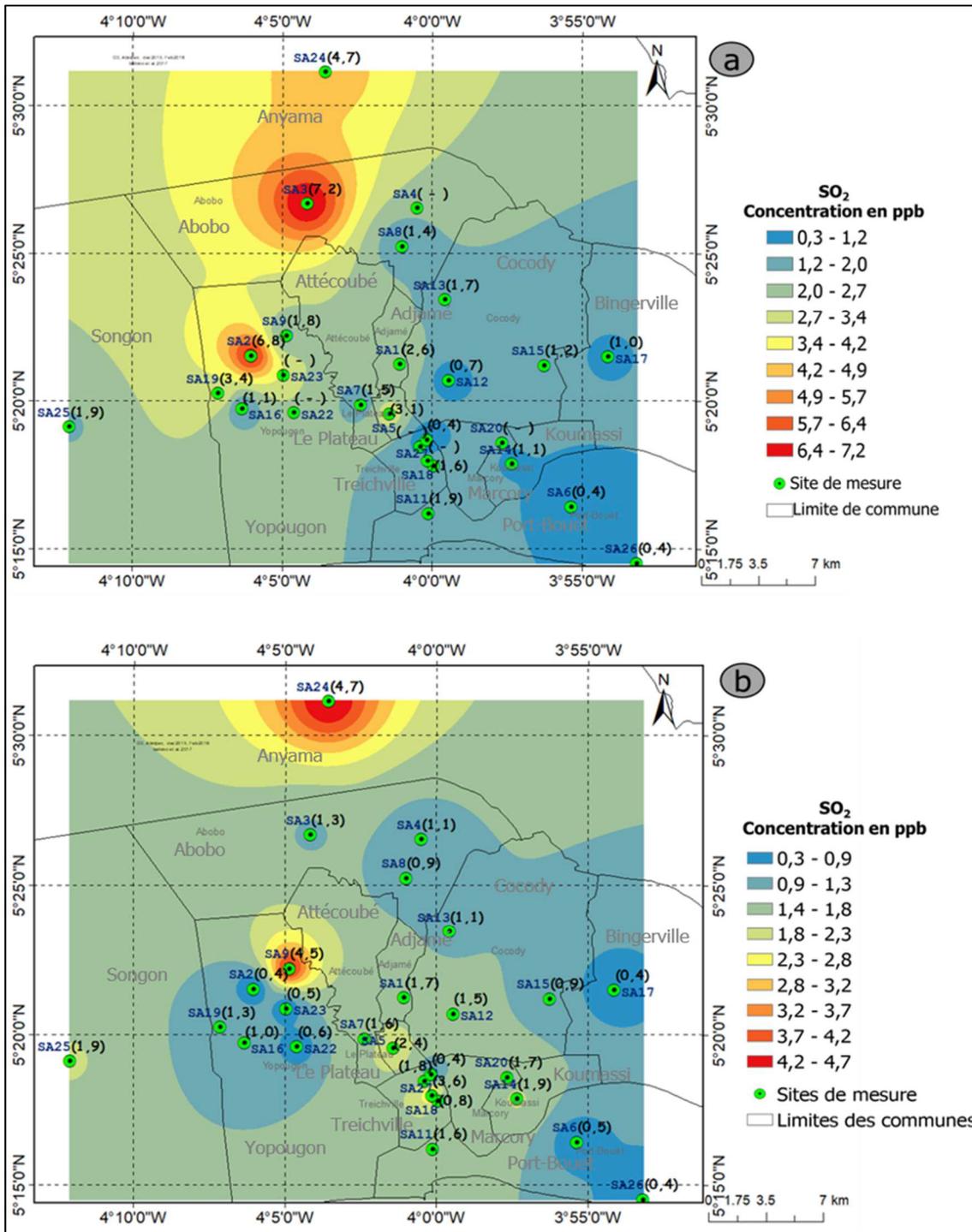
**Figure 4.9:** Concentration moyenne de NO<sub>2</sub> par source de pollution à Abidjan et Cotonou.

## IV.5.2. Cartes de distribution spatiale de SO<sub>2</sub> à Abidjan et Cotonou

### IV.5.2.1 Cartes de distribution spatiale de SO<sub>2</sub> à Abidjan

Les figures 4.10a et 4.10b présentent respectivement la distribution spatiale des concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> à Abidjan du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 et du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. Les concentrations moyennes de NO<sub>2</sub> varient entre 0,3 et 7,2 ppb lors de la première campagne et entre 0,4 et 4,7 ppb lors de la seconde campagne. Lors de cette seconde campagne (Figure 4.10b), la plus forte concentration ( $4,7 \pm 0,8$  ppb) a été mesurée au Nord de la ville sur le site suburbain du corridor d'Anyama (SA24). Cette forte concentration pourrait être liée aux activités de production intensive de charbon de bois à l'aide des fours traditionnels émettant de grandes quantités de fumées. Le combustible utilisé est principalement constitué de bois d'hévéa provenant de la reconversion des grandes plantations de caoutchouc. Selon l'étude NAMA (Nationally Appropriate Mitigation Action) sur le charbon de bois durable en Côte d'Ivoire, la production de charbon de bois a augmenté de 22 % entre 2003 (400 850 t) et 2012 (488 128 t), de même que celle de la production de bois de chauffage est passée de 8 699 979 m<sup>3</sup> en 2003 à 9 034 617 m<sup>3</sup> 2012 (UNDP, 2015). Le charbon de bois (47 %) et le bois de chauffage (35 %) sont les principales sources d'énergie pour les ménages

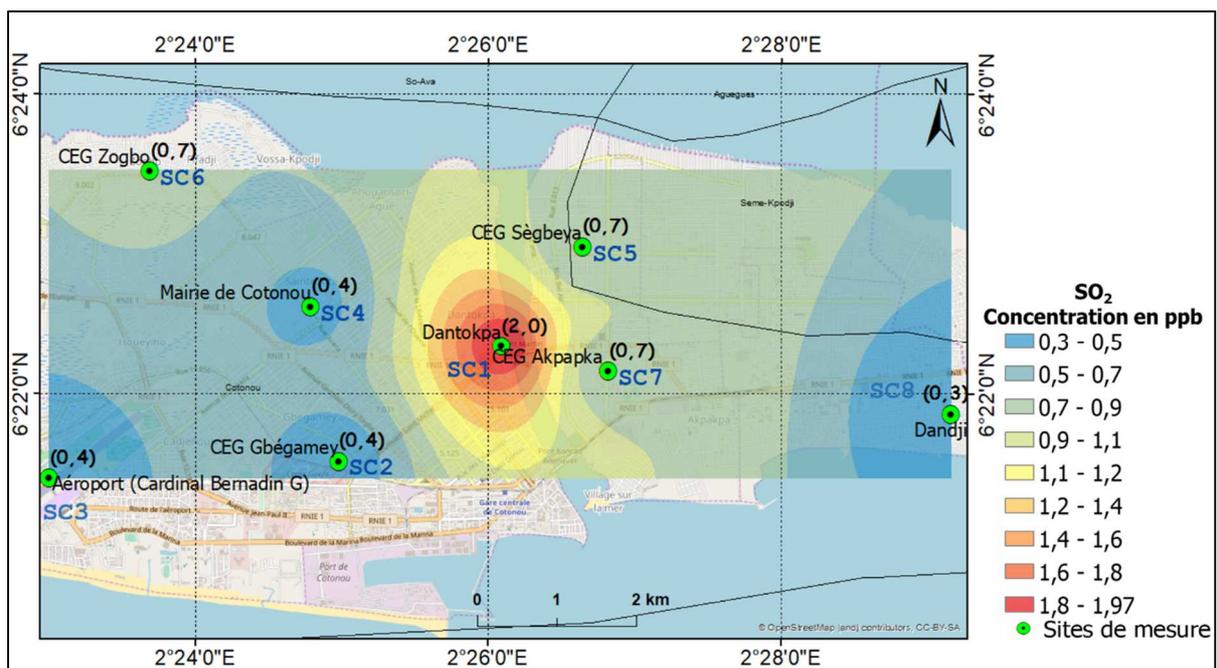
des zones urbaines de Côte d'Ivoire, faisant de la biomasse une source importante de SO<sub>2</sub> (Bates et al., 1992). Comme dans le cas du NO<sub>2</sub>, des concentrations élevées de SO<sub>2</sub> sont aussi observées dans les zones où le trafic routier est dense et dans les zones industrielles. C'est notamment le cas sur le site installé à la zone industrielle de Yopougon (SA9) où une concentration moyenne de  $4,5 \pm 1,0$  ppb a été mesurée. Outre les activités industrielles susceptibles d'émettre du SO<sub>2</sub>, le site est aussi fortement influencé par le trafic. Sur les sites trafic de la gare de Bassam (SA18) et de la pharmacie du boulevard cadre dans le centre-ville (SA5) où de fortes concentrations de NO<sub>2</sub> avaient été mesurées, les concentrations de SO<sub>2</sub> mesurées sont de  $3,6 \pm 0,4$  ppb et  $2,4 \pm 0,5$  ppb respectivement. Ces résultats pourraient indiquer que le SO<sub>2</sub> ici est principalement émis par les sources industrielles et trafics. Il est à noter que les entreprises de raffinage situées dans la zone industrielle n'ont pas encore d'unité de désulfuration. Ce type d'unité de production peut constituer une source importante de SO<sub>2</sub> (Rodriguez et Hrbek, 1999; Tam et al., 1990). La teneur en soufre du carburant produit et commercialisé en Côte d'Ivoire est supérieure à 2000 ppm (CCAC et PNUE, 2016). Cette teneur est plus de 40 fois supérieure aux normes appliquées dans la plupart des pays développés (50 ppm ou moins). Pour la majorité des sites d'Abidjan (85 %) les concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> sont inférieures à 2 ppb. Les plus faibles concentrations ont été mesurées à l'Est de la ville d'Abidjan où les concentrations varient entre 0,4 ppb et 1,1 ppb.



**Figure 4.10:** Distribution spatiale de SO<sub>2</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

#### IV.5.2.2 Carte de distribution spatiale de SO<sub>2</sub> à Cotonou

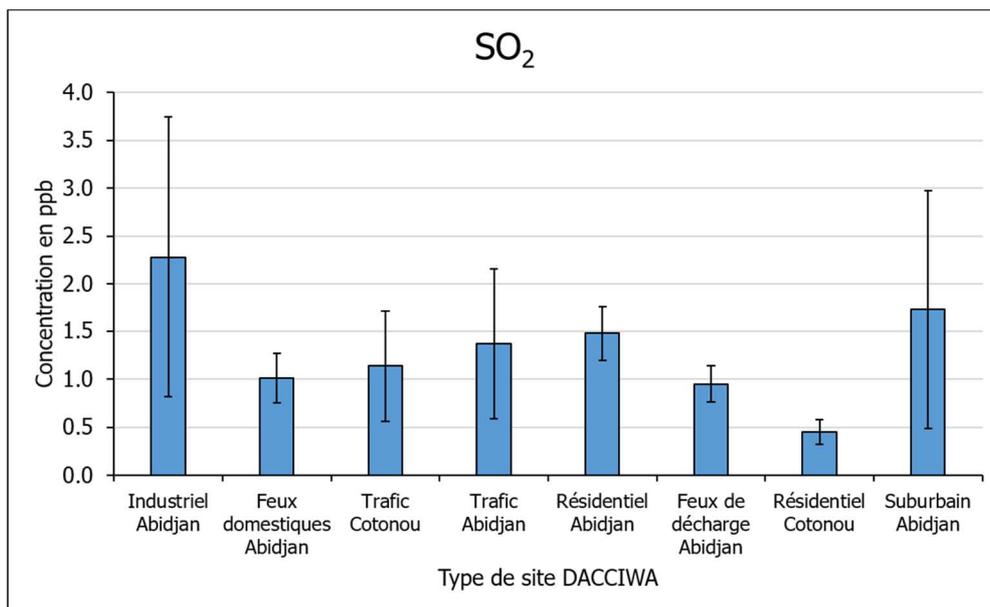
Les concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> mesurées sur les différents sites à Cotonou pendant la saison sèche (Décembre 2016 - Février 2017) sont représentées à la figure 4.11. On remarque une zone de forte concentration au carrefour du marché Dantokpa (SC1) avec une concentration moyenne de  $2,0 \pm 0,4$  ppb. Tout comme pour NO<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub> mesuré sur ce site semble provenir essentiellement du trafic dominé par les motos-taxis. Le coefficient de corrélation entre NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub> calculé à partir de l'ensemble des données collectées au carrefour du marché Dantokpa dans cette période est  $r = 0,8$ . La concentration moyenne mesurée sur le site de Dantokpa est près de 5 fois supérieure à celles mesurées sur les autres sites de la ville. Les concentrations moyennes sur les autres sites varient entre  $0,3 \pm 0,0$  ppb à Dandji (SC8) et  $0,7 \pm 0,1$  ppb à CEG Zobgo (SC6), CEG Sègbeya (SC5) et CEG Akpakpa centre (SC7). Tout comme pour NO<sub>2</sub>, on observe aussi un gradient de concentration au Sud-Ouest et à l'Est de la ville.



**Figure 4.11:** Distribution spatiale de SO<sub>2</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

La figure 4.12 présente les concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> par type de site à Abidjan et Cotonou. Les concentrations moyennes de SO<sub>2</sub> mesurées sur les sites industriels ( $2,3 \pm 1,5$  ppb) et suburbains ( $1,7 \pm 1,2$  ppb) à Abidjan sont globalement les plus élevées. Ceci confirme bien que les activités industrielles et la fabrication de charbon de bois dans les zones situées aux périphéries Nord et Est d'Abidjan constituent des sources importantes de SO<sub>2</sub>. Les

concentrations moyennes mesurées sur les sites trafic ( $1,4 \pm 0,8$  ppb) et résidentiel ( $1,5 \pm 0,3$  ppb) d'Abidjan sont du même ordre de grandeur et supérieures à celles mesurées sur le site trafic de Cotonou ( $1,1 \pm 0,6$  ppb). Cependant, compte tenu de la forte teneur en soufre du carburant au Bénin (cf. section III.3.2.4) on aurait pu s'attendre à de fortes concentrations à Cotonou. On constate que les fortes concentrations à Cotonou sont très localisées sur les zones de fort trafic comme le carrefour du marché Dantokpa. Les sites résidentiels de Cotonou avec  $0,5 \pm 0,1$  ppb ont la plus faible concentration moyenne de  $SO_2$ . Ces sites sont moins impactés par le trafic contrairement aux sites résidentiels d'Abidjan.



**Figure 4.12:** Concentration moyenne de  $SO_2$  par source de pollution à Abidjan et Cotonou

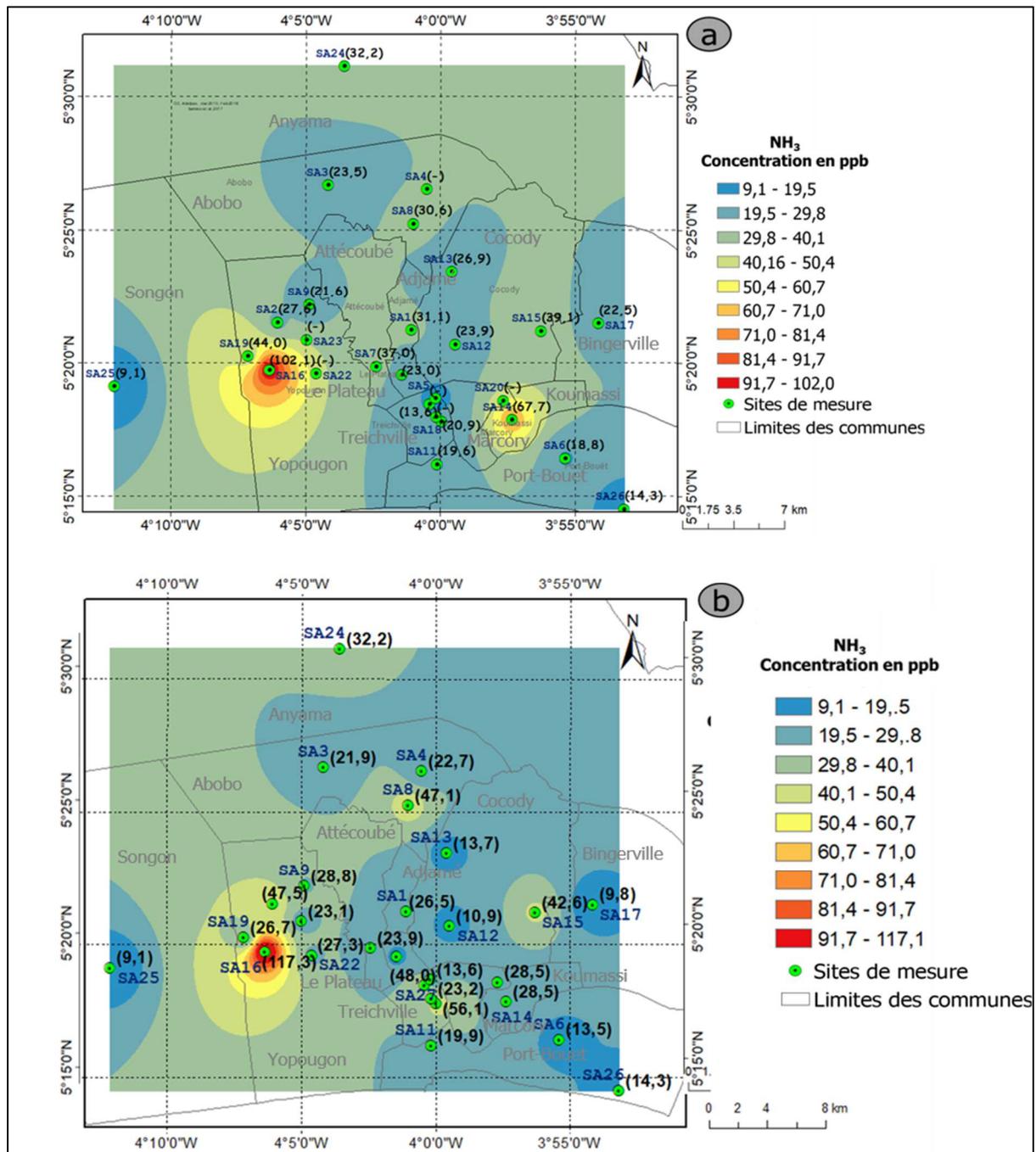
### IV.5.3. Cartes de distribution spatiale de $NH_3$ à Abidjan et Cotonou

#### IV.5.3.1. Cartes de distribution spatiale de $NH_3$ à Abidjan

La principale source d'émission de  $NH_3$  est la combustion de biomasse, notamment la combustion de biocarburants, l'agriculture, l'élevage et l'utilisation abondante des engrais azotés (Paulot et al., 2017; Behera et al., 2013; Akagi et al., 2011). Dans les zones urbaines, les feux domestiques, le trafic et l'activité industrielle sont généralement considérés comme des sources majeures de  $NH_3$  (Sun et al., 2017; Teng et al., 2017; Perrino et al., 2002; Sapek, 2013; Sutton et al., 2000; Whitehead et al., 2007). Dans les capitales d'Afrique de l'Ouest, les feux domestiques et les feux de biomasse sont les principales sources d'émission de  $NH_3$  (Liousse et al., 2014; Adon et al., 2010; Modi et al., 2002). Les émissions anthropiques de  $NH_3$  pour les sources de feux domestiques à Bamako (Mali) et à Dakar (Sénégal) ont été estimées en 2005 à

$1,6 \times 10^{-3} \text{ TgNH}_3 \text{ an}^{-1}$  et  $7,0 \times 10^{-4} \text{ TgNH}_3 \text{ an}^{-1}$  respectivement (Adon et al., 2016). A Abidjan,  $\text{NH}_3$  est le polluant le plus abondant. Les figures 4.13a et 4.13b montrent la distribution spatiale de  $\text{NH}_3$  à Abidjan lors des deux campagnes de mesure en saison sèche. On relève d'importantes différences spatiales au niveau des concentrations moyennes qui varient entre  $9,1 \pm 1,7 \text{ ppb}$  et  $102 \text{ ppb}$  (figure 4.13a) et entre  $9,1 \text{ ppb}$  et  $117,3 \text{ ppb}$  (figure 4.13b). Les résultats de la seconde campagne indiquent que la plus forte concentration moyenne a été mesurée sur le site feux domestiques de Yopougon (SA16) avec  $117,3 \pm 9,1 \text{ ppb}$ . Ce site instrumenté pour le suivi moyen-terme des polluants dans le cadre du programme DACCIWA est situé à proximité d'un fumoir traditionnel de denrées alimentaires (Cf. section 2.1.1.3). Il a été sélectionné pour étudier les concentrations de polluants émis par les feux domestiques à la source. De fortes concentrations ont aussi été mesurées sur le site industrielle de Marcory zone 3 (SA10) et sur les sites trafic du boulevard Nanan Yamouso à Treichville (SA21) et du rond-point de Gesco (SA2) avec des concentrations respectives de  $56,1 \pm 10,5 \text{ ppb}$ ,  $48,0 \pm 4,5 \text{ ppb}$  et  $47,5 \pm 13,0 \text{ ppb}$ . Ces sites sont suivis de celui de la mairie de la commune d'ABOBO ( $47,1 \pm 4,6 \text{ ppb}$ ) fortement influencé par le trafic et le secteur résidentiel et de celui de la décharge d'Akouédo ( $42,6 \pm 14,7 \text{ ppb}$ ). Outre ces zones de fortes concentrations, les autres sites d'Abidjan présentent des concentrations allant de  $9,1 \pm 1,7 \text{ ppb}$  à  $32,1 \pm 3,8 \text{ ppb}$ . Toutes ces concentrations de  $\text{NH}_3$  mesurées à Abidjan sont supérieures à celles mesurées sur les sites ruraux en Afrique (Adon et al., 2010). Ces résultats indiquent que plusieurs sources contribuent aux émissions de  $\text{NH}_3$  dans l'atmosphère à Abidjan. Ceci est principalement dû à la multiplicité des activités anthropiques susceptibles d'émettre  $\text{NH}_3$  à Abidjan. On pourrait citer en premier lieu les feux issus de la combustion du bois et du charbon de bois qui représentent les principales sources d'énergie utilisées pour la cuisson par les ménages à Abidjan. Cette source de  $\text{NH}_3$  est présente dans toute la ville à divers degrés. Aux périphéries Est et Ouest de la ville ce sont plutôt des ensembles de fermes avicoles et porcines installées en raison de la disponibilité de l'espace et du caractère rural de ces zones (Yapi-Diahou et al., 2011) qui sont responsables des concentrations de  $\text{NH}_3$ . Les travaux de Golly et Koffi-Didia (2015) ont montré l'existence de 63 fermes avicoles modernes et de 9 fermes porcines modernes uniquement dans la commune de Songon à l'Ouest d'Abidjan. Le lisier issu de ces fermes constitue aussi une des principales sources d'émission de  $\text{NH}_3$  et de composés azotés (Degré et al., 2001; Bouwman et Van Der Hoek, 1997). En plus des élevages, ces zones péri-urbaines contiennent de grandes plantations industrielles et individuelles d'hévéa et de banane. Ces plantations font souvent un usage parfois excessif d'engrais chimiques riches en urée conduisant à des émissions importantes d'ammoniac (Degré et al., 2001). A la décharge publique d'Akouédo (SA15) classée comme une décharge

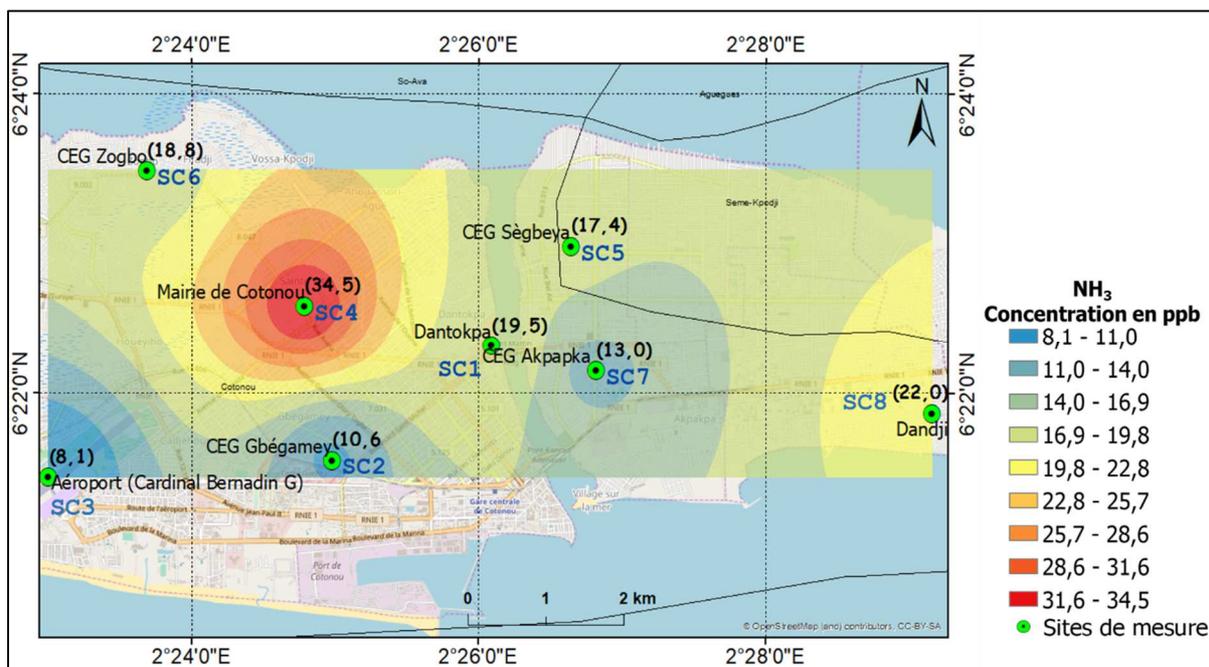
« sauvage » (Kouame et al., 2006) et installée sur une superficie de 153 ha, ce sont la décomposition bactérienne des déchets (végétaux, animaux et industriels) et leur combustion qui sont responsables des concentrations élevées de  $\text{NH}_3$ . En effet, La décharge ouverte depuis 1965 et recevant environ 1000000 t de déchets par an constitue une source potentielle de  $\text{NH}_3$  liée à la décomposition bactérienne des ordures (Adjiri et al., 2015).



**Figure 4.13:** Distribution spatiale de  $\text{NH}_3$  dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

#### IV.5.3.2 Carte de distribution spatiale de NH<sub>3</sub> à Cotonou

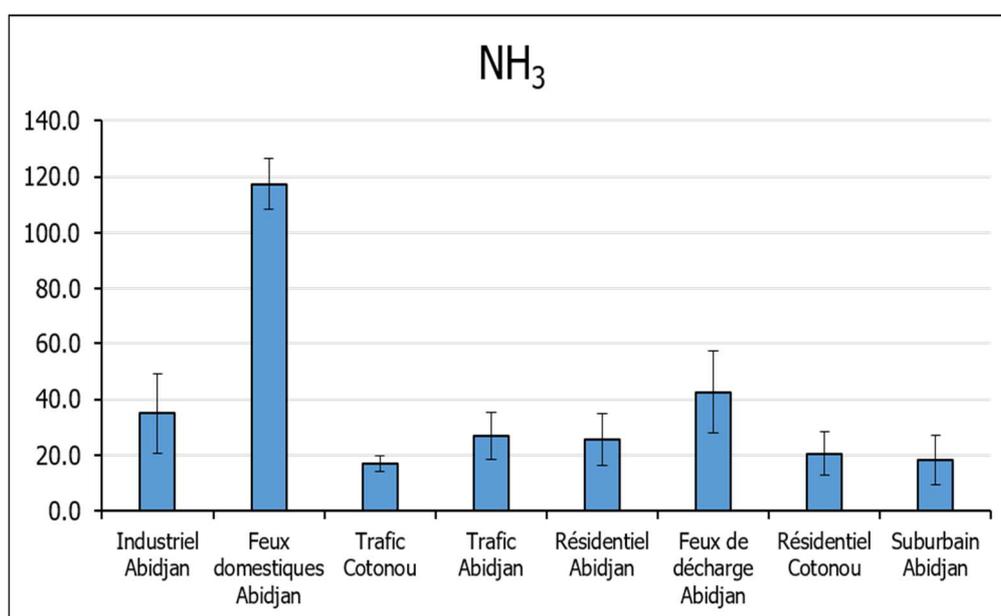
La carte de distribution spatiale de NH<sub>3</sub> à Cotonou (figure 4.14) montre que les concentrations varient entre  $8,1 \pm 0,7$  ppb à l'aéroport (SC3) et  $34,3 \pm 4,3$  ppb à proximité de la mairie de Cotonou (SC4). Le site de la mairie de Cotonou est un site résidentiel caractérisé par l'utilisation du bois de chauffe et du charbon de bois comme source d'énergie pour la cuisson. Comme montré dans le chapitre 3, ces sources d'énergie constituent les principales sources d'émission de NH<sub>3</sub> à Cotonou. La concentration moyenne mesurée sur ce site est près de 2 fois supérieure à celles mesurées à Dandji (SC8), Dantopka (SC1), Zogbo (SC6) et Segbeya (SC5) avec respectivement  $22,0 \pm 0,9$  ppb,  $19,5 \pm 1,1$  ppb,  $18,8 \pm 0,6$  ppb et  $17,4 \pm 1,5$ . Les concentrations mesurées sur ces derniers sites sont pratiquement du même ordre de grandeur. Les concentrations sont beaucoup moins élevées au sud-ouest de la ville (Aéroport et CEG Gbégamey) et au CEG Akpakpa centre ( $10,6 \pm 1,7$  ppb).



**Figure 4.14** : Distribution spatiale de NH<sub>3</sub> à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

*Au regard des concentrations moyennes de NH<sub>3</sub> mesurées dans ces deux villes, on remarque que les sites impactés par les processus de combustion tels que les sites feux domestiques et feux de décharge présentent les concentrations les plus élevées. Cela est confirmé par la figure 4.15 qui présente les concentrations moyennes de NH<sub>3</sub> par type de site. Sur les sites feux domestiques d'Abidjan, on note les concentrations maximales ( $117,3 \pm 9,1$  ppb). Ce résultat est fortement lié à l'utilisation du bois de chauffe mais aussi et surtout à la*

proximité du site mesures de la source. Pour toutes les autres sources à Abidjan et Cotonou, les concentrations moyennes de  $\text{NH}_3$  ne dépassent pas (ou peu) la valeur de 40 ppb. La figure 4.15 permet de remarquer que les feux de décharge ( $42,6 \pm 14,7$  ppb) et les sites industriels d'Abidjan ( $34,9 \pm 14,1$  ppb) constituent aussi des sources importantes de  $\text{NH}_3$ . Les plus faibles concentrations ont été mesurées à Cotonou sur les sites résidentiels ( $20,5 \pm 7,8$  ppb) et trafic ( $17,1 \pm 2,7$  ppb). On remarque que toutes les concentrations moyennes mesurées à Abidjan et Cotonou sont très supérieures aux concentrations mesurées sur des sites en milieu rural en Afrique où les concentrations varient entre 1 et 9 ppb (Adon et al., 2010; Carmichael et al., 2003; Fattore et al., 2014; Martins et al., 2007). Ces concentrations sont comparables à celles mesurées sur des sites urbains dans d'autres villes Ouest africaines telles que Dakar et Bamako (Adon et al., 2016).



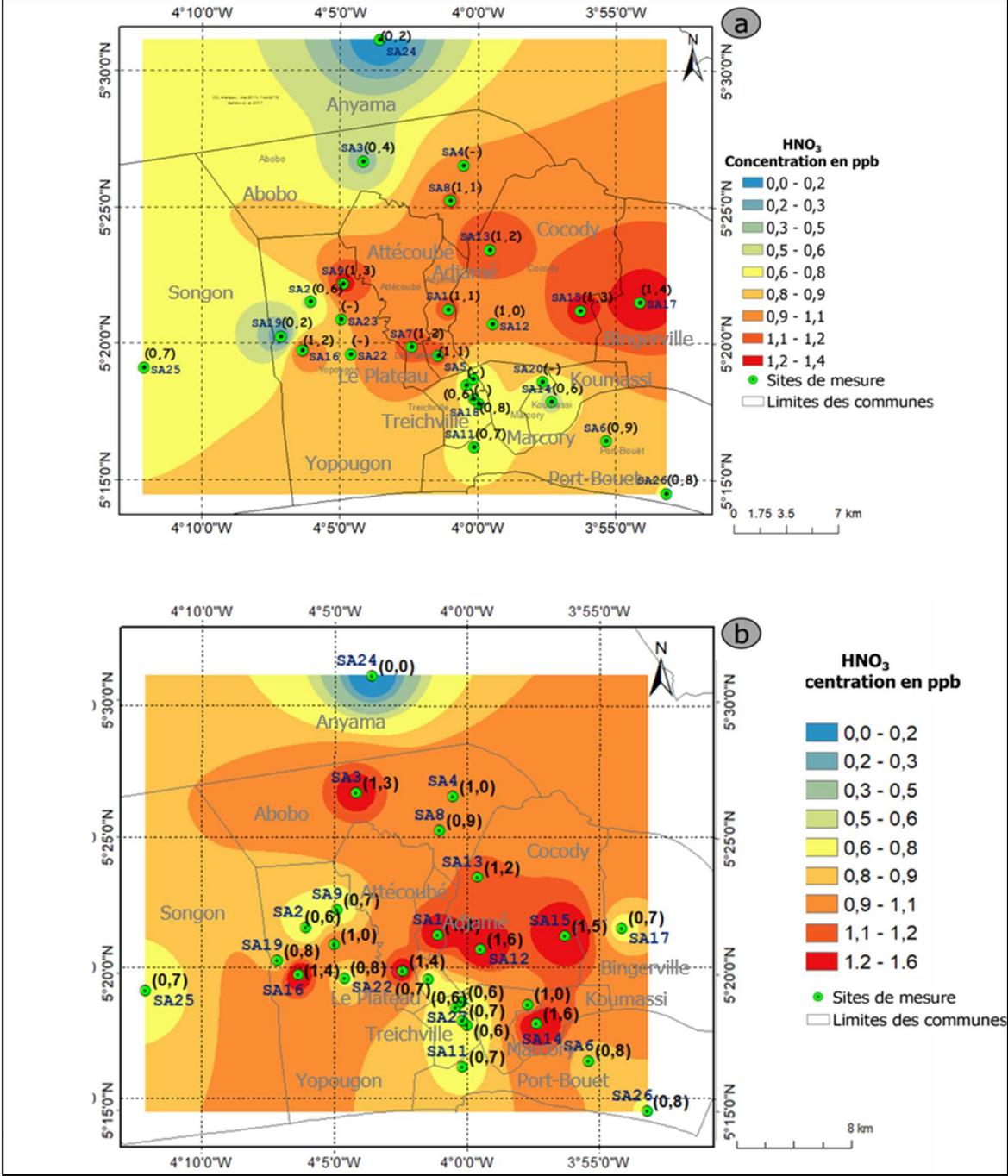
**Figure 4.15:** Concentration moyenne de  $\text{NH}_3$  par source de pollution à Abidjan et Cotonou

#### IV.5.4. Cartes de distribution spatiale de $\text{HNO}_3$ à Abidjan et Cotonou

##### IV.5.4.1. Cartes de distribution spatiale de $\text{HNO}_3$ à Abidjan

$\text{HNO}_3$  est un produit secondaire issu de l'oxydation des composés azotés gazeux. C'est l'un des acides minéraux contribuant à l'acidification des pluies (Cogbill et Likens, 1974). Les figures 4.16a et 4.16b montrent respectivement la distribution spatiale de  $\text{HNO}_3$  à Abidjan pendant les saisons sèches du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 et du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. On relève que les concentrations sont globalement peu élevées et comprises entre  $0,2 \pm 0,0$  ppb et  $1,6 \pm 0,3$  ppb. La figure 4.16b montre que pour un peu plus de 40 % des

sites, les concentrations sont supérieures à 1 ppb. Ces sites sont pour la plupart localisés à l'Est de la ville. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le  $\text{HNO}_3$  gazeux est le résultat de plusieurs processus de transformation chimique de  $\text{NH}_3$  et des  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_2 + \text{NO}$ ) guidés par la présence d'oxydants tels que  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$  et  $\text{OH}$  (Seinfeld et Pandis, 2016; Kumar et al., 2004; Hanke et al., 2003).

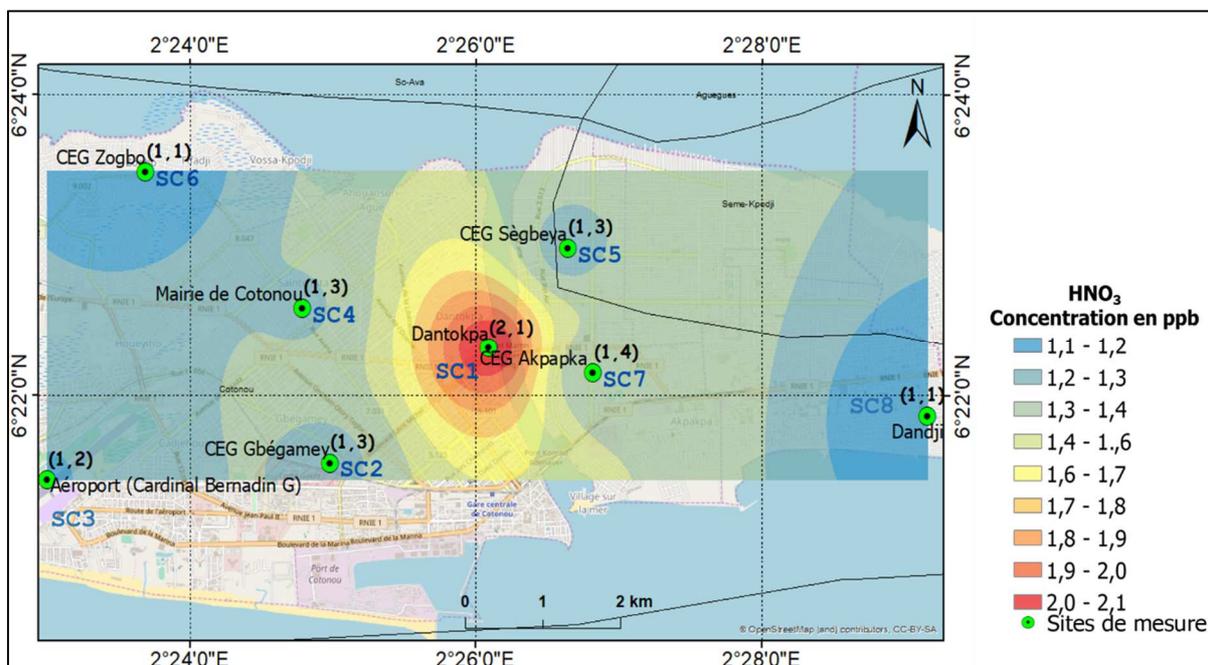


Les vents dominants en provenance du Sud-Ouest d'Abidjan pourraient transporter les polluants précurseurs produits dans le centre-ville vers l'Est. Le vieillissement des précurseurs dans les masses d'air conduit à la production de  $\text{HNO}_3$  loin de leurs sources. Ces résultats obtenus sont pratiquement identiques à ceux obtenus lors de la campagne intensive précédente (Bahino et al., 2018).

#### IV.5.4.1. Cartes de distribution spatiale de $\text{HNO}_3$ à Abidjan

#### IV.5.4.2. Carte de distribution spatiale de $\text{HNO}_3$ à Cotonou

La figure 4.17 présente la distribution spatiale de  $\text{HNO}_3$  à Cotonou. Les concentrations ici varient entre  $1,1 \pm 0,1$  ppb et  $2,1 \pm 0,4$  ppb. Ces concentrations sont pratiquement du même ordre de grandeur que celles obtenues à Abidjan. La figure 4.17 fait apparaître un pic de concentration au carrefour du marché Dantokpa avec  $2,1 \pm 0,4$  ppb. Cette concentration pourrait être liée à la forte concentration de  $\text{SO}_2$  mesurées sur ce site trafic. En effet, la caractérisation des sources (cf. section III.3.2) avait permis de montrer une forte corrélation entre  $\text{HNO}_3$  et  $\text{SO}_2$  ( $r = 0,5$ ). Les concentrations de  $\text{HNO}_3$  ici pourraient donc être dues aux émissions directes de  $\text{HNO}_3$  par les moteurs diesels. Hormis ce site, les concentrations mesurées à Cotonou varient très peu d'un site à un autre. Elles sont comprises entre  $1,1 \pm 0,1$  ppb et  $1,3 \pm 0,1$  ppb.

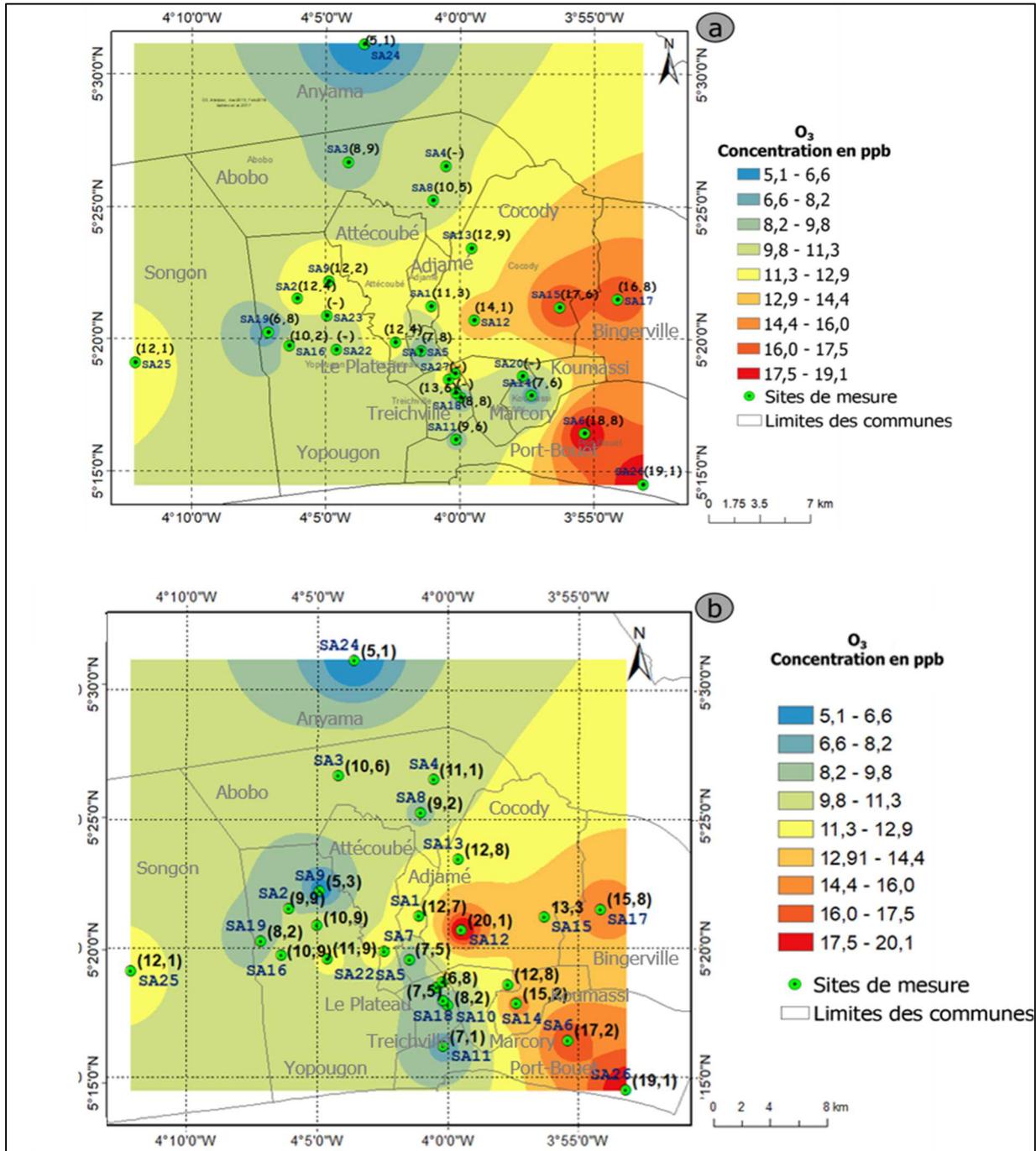


**Figure 4.17:** Distribution spatiale de  $\text{HNO}_3$  à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

## **IV.5.5. Cartes de distribution spatiale de O<sub>3</sub> à Abidjan et Cotonou**

### **IV.5.5.1. Cartes de distribution spatiale de O<sub>3</sub> à Abidjan**

Dans les zones urbaines, l'ozone troposphérique a un impact néfaste sur la santé humaine et l'environnement naturel (Hagenbjörk et al., 2017). Nous avons mesuré la concentration de O<sub>3</sub> en différents points dans le district d'Abidjan. Les figures 4.18a et 4.18b montrent la répartition spatiale de l'ozone dans le district d'Abidjan pendant les saisons sèches du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 et du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017. On remarque globalement la présence de O<sub>3</sub> dans toute la ville avec des concentrations variant de 5,1 ppb à 19,1 (figure 4.18a) et de 5,1 ppb à 20,1 ppb (figure 4.7b). Cependant les niveaux de concentration croissent considérablement de l'Ouest à l'Est d'Abidjan. En effet, la figure 4.18b montre que les concentrations les plus élevées ont été observées au campus de l'université FHB (SA12) et sur les sites suburbains de Gonzagueville (SA26), de l'aéroport FHB et de Bingerville (SA17) avec respectivement  $20,1 \pm 3,7$  ppb,  $19,1 \pm 1,7$  ppb,  $17,2 \pm 2,3$  ppb,  $15,8 \pm 0,9$  ppb. Ces sites périphériques bénéficient de conditions atmosphériques favorables à la production nette d'ozone tel que l'ensoleillement mensuel compris entre 117 heures et 224 heures (Messou et al., 2013), une forte humidité relative de l'air due à la présence de vapeur d'eau issue de l'embrun marin et la présence de COV biogéniques issus de végétation. Comme dans le cas du HNO<sub>3</sub>, les concentrations élevées mesurées à l'est de la ville peuvent aussi être dues au vieillissement des polluants précurseurs (NO<sub>2</sub> et COV) transportés dans la direction Est par les vents dominants provenant du Sud-ouest de la ville.

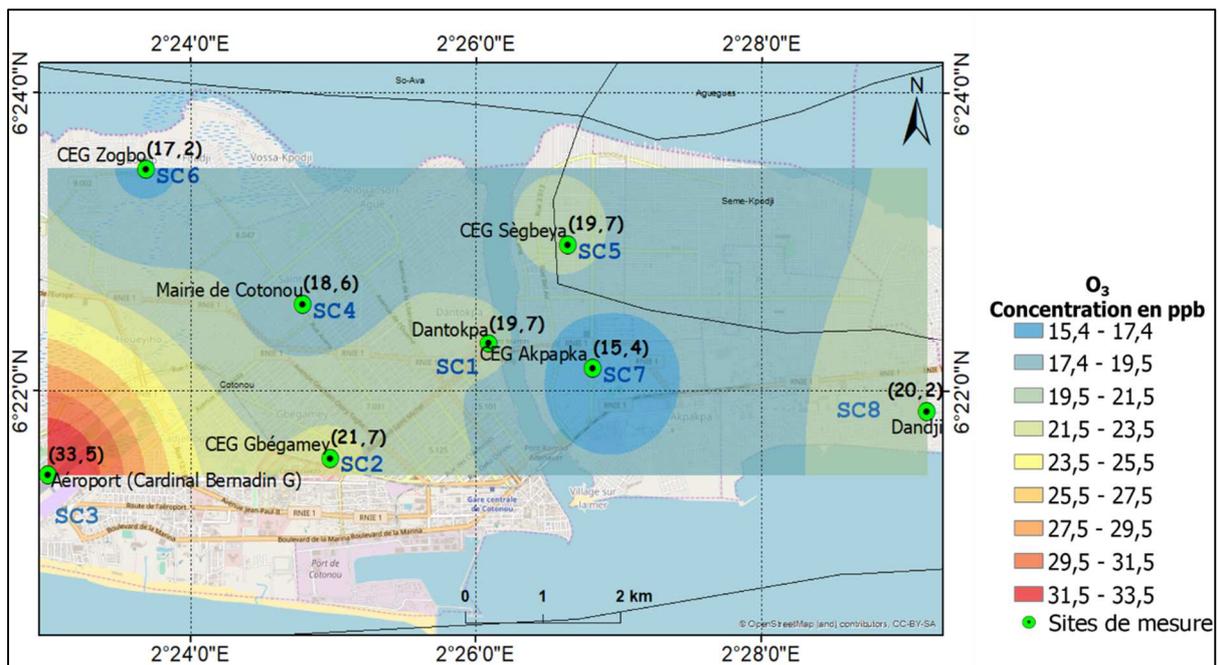


**Figure 4.18:** Distribution spatiale de O<sub>3</sub> dans le District d'Abidjan pendant la saison sèche a) du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016, b) du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

#### IV.5.5.2. Cartes de distribution spatiale de O<sub>3</sub> à Cotonou

La distribution spatiale de O<sub>3</sub> à Cotonou est représentée à la figure 4.19. Les concentrations de O<sub>3</sub> à Cotonou sont globalement plus élevées que celles mesurées à Abidjan. Elles varient entre  $15,4 \pm 1,6$  ppb et  $33,5 \pm 2,3$  ppb. On remarque que les concentrations les

plus élevées ont été mesurées au Sud-Ouest de la ville sur le site de l'aéroport (SC3) et de celui du collège Gbégamey avec des concentrations respectives de  $33,5 \pm 2,3$  ppb et  $21,7 \pm 1,9$  ppb. Tout comme à Abidjan, les faibles concentrations de  $\text{NO}_2$  mesurées dans les aéroports sont associées à de fortes concentrations de  $\text{O}_3$ . Cela suppose qu'il se produit une transformation locale des  $\text{NO}_x$  en  $\text{O}_3$  compte tenu des conditions favorables d'humidité et d'ensoleillement.



**Figure 4.19:** Distribution spatiale de  $\text{O}_3$  à Cotonou pendant la saison sèche du 15 Décembre 2016 au 16 Février 2017.

Comme nous l'avons mentionné au début de cette section, la discussion n'a concerné que les résultats de la deuxième campagne intensive à Abidjan et Cotonou en tenant compte néanmoins des résultats de la première campagne faisant l'objet de la publication présentée ci-dessous. En effet, cet article présente les résultats de la première campagne intensive qui s'est déroulée uniquement à Abidjan du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 sur 21 sites de mesures.

## IV.6. Conclusion

Le chapitre 4 a permis de rendre compte des mesures de concentrations polluants gazeux effectuées à l'aide capteurs passifs réalisées lors de deux campagnes intensives à Abidjan et d'une campagne intensive à Cotonou. Ces mesures réalisées sur 27 sites au total à Abidjan et 8 sites à Cotonou dans le cadre du projet Européen DACCIWA WP2 ont permis d'étudier la

distribution spatiale des polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ) en prenant en compte différentes sources de pollution. Cette base de données originale a permis pour la première fois de caractériser les niveaux de concentration moyens des polluants gazeux et de produire des cartes de pollution pour chacune des villes étudiées.

L'analyse de la distribution spatiale des polluants gazeux a montré une forte variabilité spatiale des concentrations des polluants à Abidjan et Cotonou. Les concentrations moyennes des polluants gazeux à Abidjan lors de la campagne de mesures du 15 décembre 2015 au 15 février 2016 sont comprises entre (2,7 ppb - 25 ppb) pour le  $\text{NO}_2$ , (9,1 ppb - 102,1 ppb) pour  $\text{NH}_3$ , (0,2 ppb - 1,4 ppb) pour  $\text{HNO}_3$ , (0,4 ppb - 7,21 ppb) pour  $\text{SO}_2$  et (5,1 ppb - 19,1 ppb) pour  $\text{O}_3$ . Ces valeurs diffèrent peu des résultats obtenus lors de la campagne du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017 à Abidjan où les concentrations sont comprises entre (2,6 ppb – 38,8 ppb) pour le  $\text{NO}_2$ , (9,1 ppb - 117,1 ppb) pour  $\text{NH}_3$ , (0,02 ppb - 1,6 ppb) pour  $\text{HNO}_3$ , (0,3 ppb - 4,7 ppb) pour  $\text{SO}_2$  et (5,1 ppb – 20,1 ppb) pour  $\text{O}_3$ . A Cotonou les concentrations sont comprises entre (5,4 ppb – 20,1 ppb) pour le  $\text{NO}_2$ , (8,1 ppb – 34,3 ppb) pour  $\text{NH}_3$ , (1,1 ppb – 2,1 ppb) pour  $\text{HNO}_3$ , (0,3 ppb - 2 ppb) pour  $\text{SO}_2$  et (15,4 ppb – 33,5 ppb) pour  $\text{O}_3$ .

Les concentrations moyennes des polluants par type de source ont aussi été calculées pour  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$ . Les résultats indiquent que les sources industrielle et trafic sont les plus émettrices de  $\text{NO}_2$  et de  $\text{SO}_2$  tandis que  $\text{NH}_3$  est principalement émis par la source feux domestiques. Les résultats montrent aussi que le niveau de concentration des polluants gazeux tels que  $\text{NH}_3$  et  $\text{NO}_2$  est très important sur la plupart des sites. Ce résultat met en évidence d'une part, la prédominance de la source des feux domestiques avec l'utilisation de bois et de charbon de bois émettant une grande quantité de  $\text{NH}_3$ . D'autre part, il montre l'impact significatif du trafic automobile sur les concentrations de  $\text{NO}_2$  et de  $\text{SO}_2$  dans les deux villes.

Dans cette étude, nous avons aussi réalisé un premier bilan des études réalisées en Afrique sur les polluants gazeux majeurs issus du trafic ( $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$ ). Cette étude a permis de donner un aperçu global des concentrations de gaz à l'échelle de plusieurs villes africaines. Elle fait le bilan de 22 publications sur les mesures de  $\text{NO}_2$  et de  $\text{SO}_2$  réalisées dans 20 pays africains au cours de la période 2005-2017. Les résultats mettent en évidence l'absence de réseaux de surveillance de la qualité de l'air dans la plupart des villes. Seules quelques études réalisées par des équipes de recherche dans le cadre de programmes scientifiques avec des objectifs divers permettent de donner une idée de l'état de la qualité de l'air. Ces études ont été réalisées avec des techniques différentes et à des échelles temporelles variables qui ne permettent pas de

comparaison avec les normes de l'OMS. Les résultats disponibles indiquent que la pollution gazeuse à Abidjan est comparable à celle des autres villes d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique centrale. Les concentrations moyennes horaires de NO<sub>2</sub> dans les villes africaines (9,4 µg.m<sup>-3</sup> - 135 µg.m<sup>-3</sup>) sont inférieures à la norme de l'OMS qui est de 200 µg.m<sup>-3</sup> / h. La concentration moyenne annuelle de NO<sub>2</sub> à Abidjan est de 23,5 µg.m<sup>-3</sup> et de 33,3 µg.m<sup>-3</sup> à Cotonou. A l'échelle des autres villes africaines les concentrations moyennes annuelles sont dans la gamme de 2 µg.m<sup>-3</sup> à 175 µg.m<sup>-3</sup>. La norme annuelle de l'OMS (40 µg.m<sup>-3</sup>) est dépassée à Dakar et à Tunis. Les concentrations journalières de SO<sub>2</sub> dans les villes africaines varient de 0,2 µg.m<sup>-3</sup> à 3662 µg.m<sup>-3</sup> et dépassent la norme de l'OMS sur 24 heures (20 µg.m<sup>-3</sup>) dans la plupart des villes africaines, sauf à Marrakech et à Tunis.

# Conclusion générale et perspectives

Ce travail de recherche a été effectué dans le cadre du groupe de travail 2 (WP2) du programme scientifique Européen DACCIWA. C'est une contribution à l'étude des niveaux de concentrations moyennes des polluants gazeux dans les milieux urbains d'Afrique de l'Ouest. Cette étude porte principalement sur l'analyse du suivi spatial et temporel des concentrations de polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$ , et  $\text{SO}_2$ ) dans les villes d'Abidjan et de Cotonou. Ce travail de thèse constitue une étude originale qui permet de fournir une base de données sur les concentrations de polluants gazeux dans quelques capitales d'Afrique de l'Ouest (Abidjan, Cotonou, Bamako, Yaoundé) où très peu d'études ont été réalisées à ce jour et où les réseaux de surveillance de la qualité de l'air n'existent pas.

La première partie de ce travail a consisté à prendre part activement à l'élaboration de la stratégie expérimentale globale incluant le choix et la logistique à mettre en place sur chaque site de mesures DACCIWA dans chaque ville. Les sites étant choisis, représentatifs de sources majeures de pollution, soit feux domestiques, décharge et trafic, j'ai ensuite assuré l'installation des équipements de gaz à Abidjan et mis en œuvre la mesure sur le terrain des concentrations des polluants gazeux pour un suivi sur la période de Décembre 2014 à Avril 2017. Cette étape a nécessité une formation préalable sur la technique de mesure utilisant les capteurs passifs et sur les techniques d'analyse des échantillons par chromatographie ionique développée au laboratoire d'Aérodologie de Toulouse. Ainsi, mon travail regroupe la collecte et l'analyse de 5620 échantillons au total (suivi moyen terme: 3740, campagnes intensives: 1880) et m'a conduit à calculer et valider les concentrations dans l'air des polluants gazeux. La base de données obtenue pour  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$ , et  $\text{SO}_2$  reste à ce jour, la plus complète et la plus longue représentative des sources majeures de pollution urbaine en Afrique de l'Ouest (feux domestiques, trafic et feux issus de combustion déchets). Cette base de données originale est intégrée à la base de données régionale BAOBAB (Base Afrique de l'Ouest Beyond AMMA Base) et est disponible sur le site du programme DACCIWA (<http://baobab.sedoo.fr/DACCIWA/>). Mon travail de thèse est basé essentiellement sur l'analyse de cette base de données. Cette première partie de mon travail m'a permis d'acquérir des compétences variées en métrologie, en analyses statistiques de données et en utilisation de logiciels basés sur les systèmes d'information géographique (SIG) tel que ArcGIS.

Le chapitre 3 présente les premiers résultats de cette étude. Dans un premier temps, une analyse de la base de données en composante principale a permis d'évaluer, la contribution de chaque source aux concentrations des polluants gazeux mesurées sur chacun des sites moyennement. Les résultats indiquent que le site feux domestiques de Yopougon émet principalement  $\text{NH}_3$  et  $\text{NO}_2$  qui représentent 99 % des polluants émis. Le  $\text{NO}_2$  mesuré sur ce site provient à 21 % de la source feux domestiques, le reste provenant du trafic à proximité. Sur le site trafic d'Adjamé,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$  sont essentiellement émis et constituent 97,4 % des polluants émis par la source trafic avec un pourcentage de 70 % pour  $\text{NO}_2$  et  $\text{SO}_2$ . Sur le site de la décharge d'Akouédo, situé à la périphérie de la ville d'Abidjan, on a observé de fortes concentrations des polluants secondaires issus des transformations photochimiques ( $\text{O}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ). A Cotonou, sur le site trafic du marché Dantokpa,  $\text{SO}_2$  et  $\text{NH}_3$  constituent les polluants majeurs mais ils ne proviennent cependant pas de la même source.  $\text{SO}_2$  est principalement issu de la source trafic et  $\text{NH}_3$  provient de la source feux domestiques.

Dans un second temps, ce chapitre présente l'analyse des variations temporelles des concentrations des polluants gazeux sur chacun des sites. L'étude des variations mensuelles montre au cours d'une année une structure bimodale avec des pics d'amplitudes différentes. Le premier pic est généralement obtenu autour du mois de juillet à la fin de la saison pluvieuse tandis que le second pic beaucoup plus important est mesuré autour des mois de Novembre à Janvier pendant la grande saison sèche. La variabilité saisonnière s'est avérée être faible sur l'ensemble des sites et pour chacun des polluants avec cependant des concentrations moyennes saisonnières supérieures en saison sèche. Les concentrations moyennes annuelles calculées pour les années 2015 et 2016 pour tous les polluants sur chacun des sites ont montré une faible variabilité annuelle, avec toutefois des concentrations en 2016 légèrement plus élevées qu'en 2015.

Les concentrations moyennes sur l'ensemble de la période d'étude obtenues à Abidjan et Cotonou ont été comparées à celles mesurées à Bamako et Yaoundé sur la même période et à celles mesurées à Bamako et Dakar entre 2008 et 2009. Pour  $\text{NO}_2$ , on remarque que toutes les concentrations mesurées sont inférieures au seuil de l'OMS qui est de 21 ppb. Les plus fortes concentrations de  $\text{NO}_2$  ont été mesurées sur les sites trafic de Yaoundé (18,2 ppb) et de Cotonou (17,3 ppb).

Dans le chapitre 4, nous avons développé un réseau de sites de mesures dans le but d'étudier la pollution atmosphérique gazeuse spatialisée à l'échelle des villes d'Abidjan et

Cotonou. Deux campagnes intensives de mesures de concentrations des polluants gazeux ont été réalisées en saison sèche incluant en plus des sources précédemment listées, d'autres sources de pollution telles que la source industrielle, le secteur résidentiel et les zones suburbaines. Ces campagnes de mesures ont été réalisées sur 27 sites au total à Abidjan et sur 8 sites à Cotonou. Elles ont permis de réaliser les premières cartes de pollution gazeuse pour Abidjan et Cotonou et d'étudier la distribution spatiale des polluants gazeux (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>).

L'analyse de la distribution spatiale des polluants gazeux indique une forte variabilité spatiale des concentrations des polluants aussi bien à Abidjan qu'à Cotonou. Ces concentrations sont fortement liées aux sources de pollution à proximité. Les concentrations moyennes des polluants gazeux à Abidjan (15 décembre 2016 au 15 février 2017) sont comprises entre (2,6 ppb – 38,8 ppb) pour le NO<sub>2</sub>, (9,1 ppb - 117,1 ppb) pour NH<sub>3</sub>, (0,02 ppb - 1,6 ppb) pour HNO<sub>3</sub>, (0,3 ppb - 4,7 ppb) pour SO<sub>2</sub> et (5,1 ppb – 20,1 ppb) pour O<sub>3</sub>. Ces valeurs diffèrent peu des résultats obtenus lors de la campagne précédente du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016 et publiés dans la session spéciale DACCIWA/ACP/AMT du journal *Atmospheric Chemistry and Physics* (Bahino et al., 2018). A Cotonou les concentrations sont comprises entre (5,4 ppb – 20,1 ppb) pour le NO<sub>2</sub>, (8,1 ppb – 34,3 ppb) pour NH<sub>3</sub>, (1,1 ppb – 2,1 ppb) pour HNO<sub>3</sub>, (0,3 ppb - 2 ppb) pour SO<sub>2</sub> et (15,4 ppb – 33,5 ppb) pour O<sub>3</sub>.

Dans l'article Bahino et al. (2018) présenté au chapitre 4, nous avons aussi réalisé la première revue bibliographique des études réalisées dans les villes africaines sur les concentrations ambiantes des polluants gazeux majeurs issus du trafic (NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>). Cette étude fait le bilan de 22 publications sur les mesures de NO<sub>2</sub> et de SO<sub>2</sub> réalisées dans 20 pays africains au cours de la période 2005-2017. Les résultats mettent en évidence l'absence de réseaux de surveillance de la qualité de l'air dans la plupart des villes. Un aperçu de l'état de la qualité de l'air dans ces villes est donné à travers quelques études réalisées par des équipes de recherche dans le cadre de programmes scientifiques avec des objectifs et des méthodes divers. Ces études ont pour la plupart été réalisées à des échelles temporelles variables qui ne permettent pas de comparaison avec les normes de l'OMS. Les résultats disponibles indiquent que la pollution gazeuse à Abidjan est comparable à celle des autres villes d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique centrale. Les concentrations moyennes horaires de NO<sub>2</sub> dans les villes africaines varient entre 9,4 µg.m<sup>-3</sup> et 135 µg.m<sup>-3</sup>. Ces valeurs restent inférieures à la norme horaire de l'OMS qui est de 200 µg.m<sup>-3</sup>. h<sup>-1</sup>. La concentration moyenne annuelle de NO<sub>2</sub> à Abidjan est de 23,5 µg.m<sup>-3</sup> et de 33,3 µg.m<sup>-3</sup> à Cotonou. Dans les autres villes africaines de cette étude, les concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> se trouvent dans une gamme de 2 µg.m<sup>-3</sup> à 175 µg.m<sup>-3</sup>. Le seuil

annuel de l'OMS ( $40 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) est dépassé uniquement à Dakar et à Tunis. Concernant le  $\text{SO}_2$ , les concentrations moyennes journalières varient de  $0,2 \mu\text{g.m}^{-3}$  à  $3662 \mu\text{g.m}^{-3}$  et dépassent la norme de l'OMS sur 24 heures ( $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) dans la plupart des villes africaines, sauf à Marrakech et à Tunis.

Au terme de ce travail, nous pouvons affirmer que l'un des objectifs principaux de la tâche 2.3 du programme DACCIWA portant sur l'analyse d'une base de données à moyen-terme des concentrations de polluants gazeux ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ) a été atteint. Ces résultats qui ont fait l'objet d'un premier article publié et d'un second en cours d'écriture ont été présentés à des congrès et conférences internationaux (communications orales et posters). Ces rencontres m'ont permis d'échanger avec des experts dans le domaine de la chimie atmosphérique et d'acquérir de l'expérience au niveau des présentations de résultats scientifiques. De plus, mon travail m'a permis d'être co-auteur de 2 autres publications notamment en lien avec mon implication lors des campagnes intensives DACCIWA qui ont portées sur l'étude des aérosols atmosphériques et des facteurs d'émissions des sources de pollution urbaines précédemment citées (Keita et al., 2018 ; Djossou et al., 2018).

Certains aspects de ce travail pourraient être améliorés pour répondre à tous les objectifs de la tâche 2.3, notamment ceux concernant le lien pollution-impact sanitaire. En effet, les efforts à ce jour devraient porter sur l'amélioration du pas de temps des mesures de concentration des polluants gazeux et particulaires à travers l'acquisition d'instrument de mesure en temps réel. Des mesures à des échelles de temps plus fines pourraient permettre d'accéder aux variations horaires et d'étudier le cycle diurne des concentrations des polluants en lien avec les sources de pollution et les paramètres météorologiques. Les données journalières des concentrations des polluants pourraient aussi permettre d'évaluer l'impact sanitaire de la pollution de l'air à travers un croisement avec des bases de données épidémiologiques (données journalières d'admissions hospitalières, morbidité, mortalité...). Les paramètres tels que les risques relatifs (RR) et le nombre des cas attribuable à un niveau de pollution (NA) pourraient être alors calculés pour déterminer le nombre des décès évités par les stratégies de réduction des concentrations des polluants. Ces informations pourraient aider les décideurs à adopter des stratégies ou définir des scénarios de réduction des concentrations des polluants dans l'air. Les mesures en temps réel des concentrations pourraient enfin permettre de comparer des niveaux de concentration des polluants avec les normes horaires, journalières et annuelles de l'OMS et des législations nationales. L'aspect santé a été abordé dans le WP2 de DACCIWA à travers une collaboration avec l'institut Pasteur de Côte d'Ivoire et l'université Pierre et Marie Curie qui a mis en relation les concentrations des particules fines ( $\text{PM}_{2.5}$ ) à

Abidjan avec les enquêtes épidémiologiques. Ce travail n'a pas été présenté dans ce mémoire de thèse. La pollution gazeuse en lien avec la santé est une de nos préoccupations majeures qui sera abordée dans le cadre de nos projets qui viennent de débiter.

Nous avons aussi dans ce travail comblé l'absence de données spatialisées de pollution à Abidjan et Cotonou en réalisant les premières cartes de pollution pour ces deux villes. Nous avons établi pour cela un réseau de surveillance de la qualité de l'air constitué de plusieurs sites de mesures dans chacune des villes. Le réseau de mesure réalisé à Abidjan a été fait avec l'aide du ministère en charge de l'environnement à travers le CIAPOL (Centre Ivoirien Anti-POLLution) qui vient de renforcer sa capacité opérationnelle à travers l'acquisition d'un camion labo. Ces réseaux réalisés à Abidjan et Cotonou devraient dans un premier temps être améliorés à travers une densification et un maillage plus régulier. La précision des cartes pourrait être ainsi considérablement améliorée. Dans un second temps, ces réseaux devraient être pérennisés afin d'apporter aux décideurs des informations régulières sur l'état et le suivi de la qualité de l'air et d'aider à la prise de décision.

La majeure partie des préoccupations visant à l'amélioration de ce travail sont prises en compte dans le cadre d'un nouveau projet intitulé « Pollution de l'Air et Santé dans les Milieux Urbains de Côte d'Ivoire (PASMU) ». Ce projet dont l'atelier de lancement s'est déroulé le 23 Mars 2018 à Bingerville se déroulera sur une période de 3 ans. Ce projet s'inscrit dans la continuité de mon travail de thèse et vise à la réalisation de cartes de risques sanitaires en lien avec la pollution de l'air. Ce projet permettra à terme de réaliser une base donnée longue de 6 années pour la ville d'Abidjan. Ces données pourraient être disponibles pour les modèles de recherche afin d'aider à la prévision des épisodes de pollution et la création d'un système d'alerte.

Des initiatives récentes ont clairement montré l'importance des études à mener sur le continent africain. On peut citer le projet BreathLife lancé en 2016 de l'Organisation Mondiale de la Santé sur l'estimation des expositions à la pollution de l'air et son impact sur la santé. Ce projet met en exergue le fait que la pollution de l'air en Afrique est un problème encore très mal évalué et représente un risque sanitaire et environnemental majeur. Il encourage les équipes de chercheurs africains à mettre en synergies leurs compétences afin d'aborder les questions relatives aux émissions des polluants, à leurs transport et dépôt et à la prévision des épisodes de pollution par la modélisation.

L'organisation Mondiale de la Météorologie a elle aussi lancé une initiative en décembre dernier lors du workshop « Seamless Prediction of Air Pollution for Africa: from Regional to Urban» qui s'est déroulé à Pretoria en Décembre 2017.

Ce travail de thèse s'inscrit entièrement dans les objectifs de ces différents projets internationaux et pourrait constituer une base de données importante pour certaines villes majeures d'Afrique de l'ouest et centrale que sont Abidjan, Cotonou, Bamako et Yaoundé.

## Références bibliographiques

- Abera, K.: Air Pollution in Ethiopia: Indoor Air Pollution in a rural Butajira and Traffic Air Pollution in Addis Ababa, School of Public Health Medical Faculty Addis Ababa University, Addis Ababa, June. [online] Available from: <http://etd.aau.edu.et/bitstream/123456789/6847/1/8.Abera%20Kumie.pdf> (Accessed 2 March 2018), 2009.
- Adams, M. D. and Kanaroglou, P. S.: Mapping real-time air pollution health risk for environmental management: combining mobile and stationary air pollution monitoring with neural network models, *J. Environ. Manage.*, 168, 133–141, 2016.
- Adjiri, A. O., Laciné, G. D., Nagnin, S., Victor, K. K. and Jean, B.: Caractérisation du biogaz de la décharge d'Akouédo (Abidjan, Côte d'Ivoire): influence des saisons sur le potentiel d'émanation naturelle, 2268-3798, 2015.
- Adon, M., Galy-Lacaux, C., Yoboue, V., Delon, C., Lacaux, J. P., Castera, P., Gardrat, E., Pienaar, J., Al Ourabi, H., Laouali, D., Diop, B., Sigha-Nkamdjou, L., Akpo, A., Tathy, J. P., Lavenu, F. and Mougin, E.: Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers, *Atmospheric Chem. Phys.*, 10(15), 7467–7487, doi:10.5194/acp-10-7467-2010, 2010.
- Adon, M., Galy-Lacaux, C., Delon, C., Yoboue, V., Solmon, F. and Kaptue Tchunte, A. T.: 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 Chem. Phys.*, 13(22), 11351–11374, 2013.
- Adon, M., Yoboue, V., Galy-Lacaux, C., Lioussé, C., Diop, B., Doumbia, E. H. T., Gardrat, E., Ndiaye, S. A. and Jarnot, C.: 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 environments, *Atmos. Environ.*, 135, 31–40, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.03.050, 2016.
- Airparif: Polluants dépassant les normes de qualité de l'air de façon récurrente, Fiche polluants 2013, [https://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/fiches-polluants-2013.pdf](https://www.airparif.asso.fr/_pdf/fiches-polluants-2013.pdf), 2013.
- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., Reid, J. S., Karl, T., Crouse, J. D. and Wennberg, P. O.: Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmospheric Chem. Phys.*, 11(9), 4039–4072, doi:10.5194/acp-11-4039-2011, 2011.
- Al-Ourabi, H.: Etude expérimentale de gaz azotés, du dioxyde de soufre et de l'ozone à l'échelle des écosystèmes de l'Afrique tropicale: Application à l'estimation des dépôts secs gazeux dans le cadre du réseau IDAF, PhD Thesis, Toulouse 3., 2002.
- Andreae, M. O.: Biomass burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate, *Glob. Biomass Burn. Atmospheric Clim. Biospheric Implic.*, 3–21, 1991.
- Arku, R. E., Vallarino, J., Dionisio, K. L., Willis, R., Choi, H., Wilson, J. G., Hemphill, C., Agyei-Mensah, S., Spengler, J. D. and Ezzati, M.: Characterizing air pollution in two low-income neighborhoods in Accra, Ghana, *Sci. Total Environ.*, 402(2), 217–231, 2008.
- Baek, S.-O., Choi, J.-S. and Hwang, S.-M.: A quantitative estimation of source contributions to the concentrations of atmospheric suspended particulate matter in urban, suburban, and industrial areas of Korea, *Environ. Int.*, 23(2), 205–213, doi:10.1016/S0160-4120(97)00006-8, 1997.
- Bahino, J., Yoboué, V., Galy-Lacaux, C., Adon, M., Akpo, A., Keita, S., Lioussé, C., Gardrat, E., Chiron, C. and Osohou, M.: 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 Chem. Phys.*, 18(7), 5173–5198, 2018.
- Bard, D.: Agir localement sur la pollution de l'air, *Environ. Risques Santé*, 16(4), 332–333, 2017.
- Barnston, A. G.: Correspondence among the correlation, RMSE, and Heidke forecast verification measures; refinement of the Heidke score, *Weather Forecast.*, 7(4), 699–709, 1992.
- Bates, T. S., Lamb, B. K., Guenther, A., Dignon, J. and Stoiber, R. E.: Sulfur emissions to the atmosphere from natural sources, *J. Atmospheric Chem.*, 14(1–4), 315–337, 1992.
- Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P. and Balasubramanian, R.: Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20(11), 8092–8131, doi:10.1007/s11356-013-2051-9, 2013.
- BEI ERE: Analyse en composantes principales (ACP) | Bureau d'Etudes Industrielles "Energies renouvelables et Environnement," [online] Available from: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe5/node/81> (Accessed 29 January 2018), 2018.
- Bessardon, G., Brooks, B., Smith, V., Aryee, J., Fosu-Amankwah, K., Cayle-Aethelhard, F., Amekudzi, L. and Danuor, S.: Nocturnal boundary layer observations in Kumasi during the DACCIWA field campaign, in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 19, p. 10575., 2017.
- Bey, I.: Contribution des processus nocturnes à la chimie troposphérique: modélisation des flux de radicaux et transformation des précurseurs d'ozone (COV, NO<sub>x</sub>), PhD Thesis, Université Paris-Est Créteil Val de Marne (UPEC)., 1997. 253p.
- Bouwman, A. F. and Van Der Hoek, K. W.: Scenarios of animal waste production and fertilizer use and associated ammonia emission for the developing countries, *Atmos. Environ.*, 31(24), 4095–4102, 1997.
- Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M. and Batjes, N. H.: Estimation of global NH<sub>3</sub> volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 16(2), 1024, doi:10.1029/2000GB001389, 2002.
- Brocchi, V., Krysztofiak, G., Catoire, V., Stratmann, G., Zaki, M., Moser, M. and Schlager, H.: Regional Air Pollution from Oil Rigs and Shipping Emissions Observed During the Airborne APSOWA-DACCIWA Campaign, in *AGU Fall Meeting Abstracts.*, 2016.
- Brook, R. D., Franklin, B., Cascio, W., Hong, Y. L., Howard, G., Lipsett, M., Luepker, R., Mittleman, M., Samet, J., Smith, S. C. and Tager, I.: Air pollution and cardiovascular disease - A statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American Heart Association, *Circulation*, 109(21), 2655–2671, doi:10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8, 2004.
- Bruno, P., Caselli, M., de Gennaro, G. and Traini, A.: Source apportionment of gaseous atmospheric pollutants by means of an absolute principal component scores (APCS) receptor model, *Fresenius J. Anal. Chem.*, 371(8), 1119–1123, doi:10.1007/s002160101084, 2001.
- Burnett, R. T., Stieb, D., Brook, J. R., Cakmak, S., Dales, R., Raizenne, M., Vincent, R. and Dann, T.: Associations between short-term changes in nitrogen dioxide and mortality in Canadian cities, *Arch. Environ. Health*, 59(5), 228–236, doi:10.3200/AEOH.59.5.228-236, 2004.
- Camredon, M. and Aumont, B.: I – L'ozone troposphérique : production/consommation et régimes chimiques, *Pollut. Atmos.*, (N°193), doi:10.4267/pollution-atmospherique.1404, 2007.

- Cape, J. N.: The Use of Passive Diffusion Tubes for Measuring Concentrations of Nitrogen Dioxide in Air, *Crit. Rev. Anal. Chem.*, 39(4), 289–310, doi:10.1080/10408340903001375, 2009.
- Carmichael, G. R., Ferm, M., Thongboonchoo, N., Woo, J. H., Chan, L. Y., Murano, K., Viet, P. H., Mossberg, C., Bala, R., Boonjawat, J., Upatum, P., Mohan, M., Adhikary, S. P., Shrestha, A. B., Pienaar, J. J., Brunke, E. B., Chen, T., Jie, T., Guoan, D., Peng, L. C., Dhiharto, S., Harjanto, H., Jose, A. M., Kimani, W., Kirouane, A., Lacaux, J. P., Richard, S., Barturen, O., Cerda, J. C., Athayde, A., Tavares, T., Cotrina, J. S. and Bilici, E.: Measurements of sulfur dioxide, ozone and ammonia concentrations in Asia, Africa, and South America using passive samplers, *Atmos. Environ.*, 37(9–10), 1293–1308, doi:10.1016/S1352-2310(02)01009-9, 2003.
- CCAC and UNEP: Cleaning up the global on road-diesel fleet: A global strategy to introduce low-sulfur fuel and cleaner diesel vehicles. [online] Available from: <https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwia0Kn3pbPVAhVJQBoKHQw9A3UQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ccacoalition.org%2Fru%2Ffile%2F2277%2Fdownload%3Ftoken%3DrRKxI5PN&usq=AFQjCNFP6dg9NtwghPscdhA67v-jTaXXuw> (Accessed 31 July 2017), 2016.
- Chaaban, F. B.: Air quality, *Arab Environ. Future Chall.*, 1, 45–62, 2008.
- Chai, T. and Draxler, R. R.: Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geosci. Model Dev.*, 7(3), 1247–1250, doi:10.5194/gmd-7-1247-2014, 2014.
- Chauhan, A. J., Krishna, M. T., Frew, A. J. and Holgate, S. T.: Exposure to nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) and respiratory disease risk., *Rev. Environ. Health*, 13(1–2), 73–90, 1998.
- Chazette, P., Totems, J., Flamant, C., Shang, X., Denjean, C., Meynadier, R., Perrin, T. and Laurens, M.: A mini backscatter lidar for airborne measurements in the framework of DACCIIWA, in EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 19, p. 18151., 2017.
- Chiu, J. C., Blanchard, Y., Hill, P., Gregory, L. and Wagener, R.: DACCIIWA Cloud-Aerosol Observations in West Africa Field Campaign Report, DOE Office of Science Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program (United States)., 2017.
- Cibois, P.: *L'analyse factorielle*, Puf., 2000. 128p.
- Cogbill, C. V. and Likens, G. E.: Acid precipitation in the northeastern United States, *Water Resour. Res.*, 10(6), 1133–1137, doi:10.1029/WR010i006p01133, 1974.
- Colin, C., Gallardo, Y., Chuchla, R. and Cissoko, S.: Environnements climatique et océanographique sur le plateau continental de Côte d'Ivoire, [online] Available from: <https://www.mysciencework.com/publication/show/7f0255b92d8385a1b2e07c7e4e2bb4a7> (Accessed 6 February 2017), 1993.
- Commandré, J.-M.: Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de coques de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT. [online] Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00443942/> (Accessed 1 February 2017), 2002.
- Conradie, E. H., Van Zyl, P. G., Pienaar, J. J., Beukes, J. P., Galy-Lacaux, C., Venter, A. D. and Mkhathshwa, G. V.: The chemical composition and fluxes of atmospheric wet deposition at four sites in South Africa, *Atmos. Environ.*, 146(Supplement C), 113–131, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.07.033, 2016.
- Country Economy: Ivory Coast GDP - Gross Domestic Product 2016, [countryeconomy.com](http://countryeconomy.com) [online] Available from: <https://countryeconomy.com/gdp/ivory-coast> (Accessed 11 April 2018), 2016.

- Cox, R. M.: The use of passive sampling to monitor forest exposure to O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>: a review and some case studies., *Environ. Pollut.*, 126(3), 301–311, 2003.
- Cruz, L. P. S., Campos, V. P., Silva, A. M. C. and Tavares, T. M.: A field evaluation of a SO<sub>2</sub> passive sampler in tropical industrial and urban air, *Atmos. Environ.*, 38(37), 6425–6429, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.07.022, 2004.
- Cumbane, J. J., Naran, A. U., Queface, A. J., Uthui, R. J., Liljeberg, M., Ferm, M., Iverfeldt, A., João, L. M., Macamo, A. J. and Magaia, S. J.: Rapid Urban Air Quality Assessment (RUA): A Cost-effective Tool for Air Quality Management in Less Developed Countries, [online] Available from: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38772220/Rapid\\_urban\\_air\\_quality\\_assessment\\_a\\_cost-effective\\_tool\\_for\\_air\\_quality\\_management.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1522779891&Signature=o7S3LP%2BHDvj36YKXSDoNHfAaPq0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DRapid\\_Urban\\_Air\\_Quality\\_Assessment\\_RUA\\_A.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38772220/Rapid_urban_air_quality_assessment_a_cost-effective_tool_for_air_quality_management.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1522779891&Signature=o7S3LP%2BHDvj36YKXSDoNHfAaPq0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DRapid_Urban_Air_Quality_Assessment_RUA_A.pdf) (Accessed 2 March 2018), 2008.
- CUY: Elaboration du plan de déplacement Urbain de la ville de Yaoundé, Rapport Diagnostique, République du Cameroun., 2010. 21p.
- Degobert, P.: Automobile et pollution, Editions OPHRYS. [online] Available from: [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=y-1scFy3JL0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=le+dioxyde+d%27azote+polluant+majeur+de+l%27air&ots=zrkVvLG3JD&sig=fW54le3QBQspfuStrB\\_ghg3kMHY](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=y-1scFy3JL0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=le+dioxyde+d%27azote+polluant+majeur+de+l%27air&ots=zrkVvLG3JD&sig=fW54le3QBQspfuStrB_ghg3kMHY) (Accessed 6 February 2017), 1995.
- Degré, A., Verhève, D. and Debouche, C.: Emissions gazeuses en élevage porcin et modes de réduction : revue bibliographique, *Biotechnol. Agron. Société Environ.*, 5(3), 135–143, 2001.
- Deletraz, G.: Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne: Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Biriadou (Pyrénées), PhD Thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour. [online] Available from: [https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/45506/filename/these\\_deletraz\\_p1.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/45506/filename/these_deletraz_p1.pdf), 2002.
- Demay, C., Richard, Y. and Diop, M.: La pollution de l'air à Dakar, Univ. Bourgogne [online] Available from: [http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses\\_master/2011/Demay\\_2011.pdf](http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses_master/2011/Demay_2011.pdf) (Accessed 2 March 2018), 2011.
- Denis, E. and Moriconi-Ebrard, F.: La croissance urbaine en Afrique de l'Ouest, *Chron. CEPED*, (57), 1–5, 2009.
- Denison, S. M., Maslin, M. A., Boot, C., Pancost, R. D. and Ettwein, V. J.: Precession-forced changes in south west African vegetation during marine isotope stages 101–100 ( 2.56–2.51 Ma), *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 220(3), 375–386, 2005.
- Denjean, C., Bourriane, T., Burnet, F., Deroubaix, A., Brito, J., Dupuy, R., Colomb, A., Schwarzenboeck, A., Sellegri, K. and Chazette, P.: Impact of long-range transport pollution on aerosol properties over West Africa: observations during the DACCIWA airborne campaign, in EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 19, p. 13404., 2017.
- Diaf, N., Bouchaour, M., Merad, L. and Benyoucef, B.: Paramètres influençant la dispersion des polluants gazeux, *REV ENERG REN ICPWE*, 139–142, 2003.
- Djossou, J., Akpo, A., Afféwé, J., Donnou, V., Liousse, C., Léon, J.-F., Nonfodji, F. and Awanou, C.: Dynamics of the Inter Tropical Front and Rainy Season Onset in Benin, *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, 24(2), 1–15, doi:10.9734/CJAST/2017/36832, 2017a.

- Djossou, J., Léon, J.-F., Lioussé, C., Akpo, A., 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. and Awanou, C. N.: Mass concentration, optical depth and carbon composition of particulate matter in the major Southwestern Africa cities of Cotonou (Benin) and Abidjan (Côte d'Ivoire), *Atmos Chem Phys Discuss*, 2017, 1–29, doi:10.5194/acp-2017-973, 2017b.
- Djossou, J., Léon, J.-F., Akpo, A. B., Lioussé, C., Yoboué, V., Bedou, M., Bodjrenou, M., Chiron, C., Galy-Lacaux, C. and Gardrat, E.: Mass concentration, optical depth and carbon composition of particulate matter in the major southern West African cities of Cotonou (Benin) and Abidjan (Côte d'Ivoire), *Atmospheric Chem. Phys.*, 18(9), 6275–6291, 2018.
- Dongo, K., Kouamé, F. K., Koné, B., Biém, J., Tanner, M. and Cissé, G.: Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain de Yopougon a Abidjan, Côte d'Ivoire, *VertigO - Rev. Électronique En Sci. Environ.*, (Volume 8 Numéro 3), doi:10.4000/vertigo.6252, 2009.
- Doumbia, E. H. T., Lioussé, C., Galy-Lacaux, C., Ndiaye, S. A., Diop, B., Ouafou, M., Assamoi, E. M., Gardrat, E., Castera, P., Rosset, R., Akpo, A. and Sigha, L.: Real time black carbon measurements in West and Central Africa urban sites, *Atmos. Environ.*, 54, 529–537, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.02.005, 2012.
- Duan, J., Tan, J., Yang, L., Wu, S. and Hao, J.: Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing, *Atmospheric Res.*, 88(1), 25–35, doi:10.1016/j.atmosres.2007.09.004, 2008.
- Emery, J.: La qualité de l'air liée au transport routier en milieu urbain, [online] Available from: [http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses\\_master/2012/M2\\_Emery.pdf](http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses_master/2012/M2_Emery.pdf) (Accessed 18 September 2017), 2012.
- Ernest, A. K., Nagnin, S., Gbombélé, S., Théophile, L., Solange, O. M. and Pacôme, Z. S.: Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire), *Editor. Advis. Board E*, 20(2), 302–316, 2005.
- Fattore, F., Bertolini, T., Materia, S., Gualdi, S., Thongo M'Bou, A., Nicolini, G., Valentini, R., De Grandcourt, A., Tedesco, D. and Castaldi, S.: Seasonal trends of dry and bulk concentration of nitrogen compounds over a rain forest in Ghana, *Biogeosciences*, 11(11), 3069–3081, 2014.
- Fayiga, A. O., Ipinmoroti, M. O. and Chirenje, T.: Environmental pollution in Africa, *Environ. Dev. Sustain.*, 20(1), 41–73, doi:10.1007/s10668-016-9894-4, 2018.
- Ferm, M.: A Sensitive Diffusional Sampler, Swedish Environmental Research Institute, Sweden. [online] Available from: <https://books.google.fr/books?id=cmZgMgAACAAJ>, 1991.
- Ferm, M., Lindskog, A., Svanberg, P. A. and Boström, C. A.: New measurement technique for air pollutants, *Kem. Tidskr.*, 1, 30–32, 1994.
- Fink, A. H., Maranan, M., Knippertz, P., Ngamini, J.-B. and Francis, S.: The DACCIWA 2016 radiosonde campaign in southern West Africa, in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 19, p. 12121., 2017.
- Fourn, L. and Fayomi, E. B.: Pollution atmosphérique en milieu urbain à Cotonou et à Lokossa, Bénin., *Bull Soc Pathol Exot*, 99(4), 264–268, 2006.
- Fousséni, T. R.: Les inégalités écologiques à l'aune du choléra : étude dans la ville de Cotonou au Bénin, *Carnets Géographes*, (10) [online] Available from: <http://journals.openedition.org/cdg/1198> (Accessed 20 February 2018), 2017.

- Gac, A., Béline, F. and Bioteau, T.: Inventaire national des émissions gazeuses (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>) liées à la gestion des déjections : les données bibliographiques et les résultats pour l'élevage avicole, MyScienceWork [online] Available from: <https://www.mysciencework.com/publication/show/c5e969954ec97a49e2e97fe290413044> (Accessed 14 November 2016), 2007.
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B. and Cosby, B. J.: The nitrogen cascade, *AIBS Bull.*, 53(4), 341–356, 2003.
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., Martinelli, L. A., Seitzinger, S. P. and Sutton, M. A.: Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions, *Science*, 320(5878), 889–892, 2008.
- Galy-Lacaux, C. and Modi, A. : Precipitation chemistry in the Sahelian savanna of Niger, Africa, *J. Atmospheric Chem.*, 30(3), 319–343, doi:10.1023/A:1006027730377, 1998.
- Goldemberg, J., Martinez-Gomez, J., Sagar, A. and Smith, K.: Household air pollution, health, and climate change—clearing the air, *Environ. Res. Lett.*, 2018.
- Golly, A.-R. N. and Koffi-Didia, A. M.: Logique de dispersion des espaces d'élevage dans la sous-préfecture de Songon, *Syllabus Rev.*, 6(1), 175–200, 2015.
- Goore Bi, H.: Actualité Auto.ci | Transport terrestre en Côte d'Ivoire : Un parc national de plus de 423500 véhicules, Auto.ci [online] Available from: [http://www.auto.ci/news/transport-terrestre-en-cote-d-ivoire-un-parc-national-de-plus-de-423500-vehicules\\_266.html](http://www.auto.ci/news/transport-terrestre-en-cote-d-ivoire-un-parc-national-de-plus-de-423500-vehicules_266.html) (Accessed 9 August 2017), 2011.
- Gorecki, T. and Namiesnik, J.: Passive sampling, *Trac-Trends Anal. Chem.*, 21(4), 276–291, doi:10.1016/S0165-9936(02)00407-7, 2002.
- Guo, H., Wang, T. and Louie, P. K. K.: Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong, *Environ. Pollut.*, 129(3), 489–498, doi:10.1016/j.envpol.2003.11.006, 2004.
- Gupta, A. K., Karar, K., Ayoob, S. and John, K.: Spatio-temporal characteristics of gaseous and particulate pollutants in an urban region of Kolkata, India, *Atmospheric Res.*, 87(2), 103–115, doi:10.1016/j.atmosres.2007.07.008, 2008.
- Hagenbjörk, A., Malmqvist, E., Mattisson, K., Sommar, N. J. and Modig, L.: The spatial variation of O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> and the relation between them in two Swedish cities, *Environ. Monit. Assess.*, 189(4), 161, doi:10.1007/s10661-017-5872-z, 2017.
- Hanke, M., Umann, B., Uecker, J., Arnold, F. and Bunz, H.: Atmospheric measurements of gas-phase HNO<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> using chemical ionization mass spectrometry during the MINATROC field campaign 2000 on Monte Cimone, *Atmospheric Chem. Phys.*, 3(2), 417–436, 2003.
- Harris, G. W., Mackay, G. I., Iguchi, T., Schiff, H. I. and Schuetzle, D.: Measurement of NO<sub>2</sub> and HNO<sub>3</sub> in diesel exhaust gas by tunable diode laser absorption spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, 21(3), 299–304, 1987.
- Hassan, S. K., El-Abssawy, A. A. and Khoder, M. I.: Characteristics of gas-phase nitric acid and ammonium-nitrate-sulfate aerosol, and their gas-phase precursors in a suburban area in Cairo, Egypt, *Atmospheric Pollut. Res.*, 4(1), 117–129, doi:10.5094/APR.2013.012, 2013.
- He, J., Xu, H., Balasubramanian, R., Chan, C. Y. and Wang, C.: Comparison of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> Measurements Using Different Passive Samplers in Tropical Environment, *Aerosol Air Qual. Res.*, 14(1), 355–363, doi:10.4209/aaqr.2013.02.0055, 2014.
- Hodgkins, R. E., Grzywacz, C. M. and Garrell, R. L.: An improved ion chromatography method for analysis of acetic and formic acid vapours, *E-Preserv. Sci. E-PS*, 8, 74–80, 2011.

- Ibe, F. C., Njoku, P. C., Alinnor, J. I. and Opara, A. I.: Spatial variation of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in the ambient environment of Imo State, Nigeria, *Int. J. Sci. Environ. Technol.*, 5, 33–46, 2016.
- Ibrahim, M. Z., Ismail, M. and Hwang, Y. K.: Mapping the Spatial Distribution of Criteria Air Pollutants in Peninsular Malaysia Using Geographical Information System (GIS), *Tech*, doi:10.5772/32902, 2012.
- ICI: Investir en Côte d'Ivoire: Réhabilitation des zones industrielles d'Abidjan, [ici2014.com](http://ici2014.com) [online] Available from: <http://ici2014.com/projets/rehabilitation-des-zones-industrielles-dabidjan/> (Accessed 9 August 2017), 2014.
- IMF: World Economic Outlook Update, July 2017: A Firming Recovery, [online] Available from: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/07/07/world-economic-outlook-update-july-2017> (Accessed 20 December 2017), 2017.
- Inchaouh, M., Tahiri, M. and Abboubi, B. E. J. R.: State of ambient air quality in Marrakech city (Morocco) over the period 2009–2012, *Int. J.*, 12(29), 99–106, 2017.
- INS, (Institut Nationale de la Statistique): Principaux résultats du RGPH 2014, [online] Available from: <http://www.ins.ci/n/RGPH2014.pdf> (Accessed 1 August 2017), 2015.
- Istrate, I. A., Oprea, T., Rada, E. C. and Torretta, V.: Noise and air pollution from urban traffic, *WIT Trans. Ecol. Environ.*, 191, 1381–1389, 2014.
- Jackson, M. M.: Air pollution in southern Africa: The case of motor vehicle exhaust contribution in Dar Es Salaam city, *J. Build. Land Dev.*, 12(1–3), 1–19, 2005.
- Jacob, D. J., Heikes, E. G., Fan, S.-M., Logan, J. A., Mauzerall, D. L., Bradshaw, J. D., Singh, H. B., Gregory, G. L., Talbot, R. W. and Blake, D. R.: Origin of ozone and NO<sub>x</sub> in the tropical troposphere: A photochemical analysis of aircraft observations over the South Atlantic basin, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 101(D19), 24235–24250, 1996.
- Jha, D. K., Sabesan, M., Das, A., Vinithkumar, N. V. and Kirubakaran, R.: Evaluation of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India., *Univers. J. Environ. Res. Technol.*, 1(3) [online] Available from: <http://www.environmentaljournal.org/1-3/ujert-1-3-10.pdf> (Accessed 8 August 2017), 2011.
- Josipovic, M., Annegarn, H. J., Kneen, M. A., Pienaar, J. J. and Piketh, S. J.: Concentrations, distributions and critical level exceedance assessment of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in South Africa, *Environ. Monit. Assess.*, 171(1–4), 181–196, doi:10.1007/s10661-009-1270-5, 2010.
- Kaboro, B. M.: Assessment of levels of Urban Air Pollutants and Trace Elements in Roadside Soils; A case Study in Eastleigh Area, Nairobi, [online] Available from: <http://uonlibrary.uonbi.ac.ke/content/assessment-levels-urban-air-pollutants-and-trace-elements-roadside-soils-case-study-eastleigh> (Accessed 8 August 2017), 2006.
- Kaiser, H. F.: The Application of Electronic Computers to Factor Analysis, *Educ. Psychol. Meas.*, 20(1), 141–151, doi:10.1177/001316446002000116, 1960.
- Kampa, M. and Castanas, E.: Human health effects of air pollution, *Environ. Pollut.*, 151(2), 362–367, doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012, 2008.
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H. and Amann, M.: Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level, *Atmos. Environ.*, 120, 475–483, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.087, 2015.

- Kchih, H. and Cherif, S.: Distribution spatiale des O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> et évaluation des interactions troposphériques sur la ville de Tunis (Tunisie), 2268-3798, doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.4804>, 2015.
- Khafaie, M. A., Yajnik, C. S., Salvi, S. S. and Ojha, A.: Critical review of air pollution health effects with special concern on respiratory health, *J. Air Pollut. Health*, 1(2), 123–136, 2016.
- Khogali, H. A. M.: Impact Of Khartoum Refinery Gaseous By-Products On The Environment, [online] Available from: [https://www.researchgate.net/profile/Hind\\_Abdel\\_moneim/publication/292152169\\_Pinnacle\\_Educational\\_Research\\_Development\\_Impact\\_Of\\_Khartoum\\_Refinery\\_Gaseous\\_By-Products\\_On\\_The\\_Environment/links/56ab4d3f08aed814bde96695.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hind_Abdel_moneim/publication/292152169_Pinnacle_Educational_Research_Development_Impact_Of_Khartoum_Refinery_Gaseous_By-Products_On_The_Environment/links/56ab4d3f08aed814bde96695.pdf) (Accessed 29 June 2017), 2016.
- Kirenga, B. J., Meng, Q., Van Gemert, F., Aanyu-Tukamuhebwa, H., Chavannes, N., Katamba, A., Obai, G., Molen, T. van der, Schwander, S. and Mohsenin, V.: The state of ambient air quality in two Ugandan cities: a pilot cross-sectional spatial assessment, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12(7), 8075–8091, 2015.
- Knippertz, P., Coe, H., Chiu, J. C., Evans, M. J., Fink, A. H., Kalthoff, N., Liousse, C., Mari, C., Allan, R. P., Brooks, B., Danour, S., Flamant, C., Jegede, O. O., Lohou, F. and Marsham, J. H.: The DACCWA Project Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 96(9), 1451–1460, doi:10.1175/BAMS-D-14-00108.1, 2015.
- Konate, L., Kouadio, B. H., Djè, B. K., Ake, G. E., Bi, V. H. N., Gnagne, L., Kouame, E. K. and Biemi, J.: Caractérisation des pluies journalières intenses et récurrences des inondations: apport des totaux glissants trois (3) jours à la détermination d'une quantité seuil d'inondation (District d'Abidjan au Sud-Est de la Côte d'Ivoire)/[Heavy daily rainfall characterization and flooding repeating: contribution of three (3) days sliding total to the purposefulness of threshold amount rainfall inducing flooding (Abidjan district, South-est of Ivory Coast)], *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 17(3), 990, 2016.
- Kouadio, C.: Abidjan: plus de 300 000 véhicules en circulation | Actualité | Acturoutes.info, Acturoutes.info [online] Available from: <https://www.acturoutes.info/page.php?p=1&id=4279> (Accessed 9 August 2017), 2014.
- Kouame, I. K., Gone, D. L., Savane, I., Kouassi, E. A., Koffi, K., Goula, B. T. A. and Diallo, M.: Mobilité relative des métaux lourds issus de la décharge d'Akouédo et risque de contamination de la nappe du Continental Terminall (Abidjan - Côte d'Ivoire), *Afr. Sci. Rev. Int. Sci. Technol.*, 2(1) [online] Available from: <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/61133> (Accessed 8 August 2017), 2006.
- Kryzstofiak-Tong, G., Brocchi, V., Catoire, V., Stratmann, G., Sauer, D., Deroubaix, A., Deetz, K. and Schlager, H.: Atmospheric Pollution from Shipping and Oil platforms of West Africa (APSOVA) observed during the airborne DACCWA campaign, in EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 19, p. 7901., 2017.
- Krzyzanowski, M. and Cohen, A.: Update of WHO air quality guidelines, *Air Qual. Atmosphere Health*, 1(1), 7–13, doi:10.1007/s11869-008-0008-9, 2008.
- Kumar, R., Gupta, A., Kumari, K. M. and Srivastava, S. S.: Simultaneous measurements of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> and NH<sub>3</sub>: seasonal and spatial variations, *Curr. Sci.*, 87(8), 1108–1115, 2004.
- Lanz, V. A., Alfarra, M. R., Baltensperger, U., Buchmann, B., Hueglin, C. and Prévôt, A. S. H.: Source apportionment of submicron organic aerosols at an urban site by factor analytical modelling of aerosol mass spectra, *Atmospheric Chem. Phys.*, 7(6), 1503–1522, 2007.

- Laouali, D., Galy-Lacaux, C., Diop, B., Delon, C., Orange, D., Lacaux, J. P., Akpo, A., Lavenu, F., Gardrat, E. and Castera, P.: Long term monitoring of the chemical composition of precipitation and wet deposition fluxes over three Sahelian savannas, *Atmos. Environ.*, 50, 314–327, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.12.004, 2012.
- Liousse, C. and Galy-Lacaux, C.: Pollution urbaine en Afrique de l’Ouest, *La Météorologie*, (71), 45–49, doi:10.4267/2042/37377, 2010.
- Liousse, C., Assamoi, E., Criqui, P., Granier, C. and Rosset, R.: Explosive growth in African combustion emissions from 2005 to 2030, *Environ. Res. Lett.*, 9(3), 035003, doi:10.1088/1748-9326/9/3/035003, 2014.
- Lohou, F., Kalthoff, N., Brooks, B., Jegede, G., Adler, B., Ajao, A., Ayoola, M., Babic, K., Bessardon, G. and Delon, C.: Overview of the DACCIWA ground-based field campaign in southern West Africa, in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 19, p. 14418., 2017.
- Longhurst, A. R.: Review of oceanography of Gulf of Guinea. *Bull. IFAN*, 24, 3, pp. 633-663, 1962.
- Lourens, A. S., Beukes, J. P., van Zyl, P. G., Fourie, G. D., Burger, J. W., Pienaar, J. J., Read, C. E. and Jordaan, J. H.: Spatial and temporal assessment of gaseous pollutants in the Highveld of South Africa, *South Afr. J. Sci.*, 107(1–2), 1–8, doi:10.4102/sajs.v107i1/2.269, 2011.
- Mama, D., Dimon, B., Aina, M., Adoukpe, J., Ahomadegbe, M., Youssao, A., Kouazounde, J., Kouanda, S. P. and Moudachirou, M.: Transport urbain au Bénin et pollution atmosphérique: évaluation quantitative de certains polluants chimiques de Cotonou, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 7(1), 377–386, 2013.
- Marais, E. A., Jacob, D. J., Guenther, A., Chance, K., Kurosu, T. P., Murphy, J. G., Reeves, C. E. and Pye, H. O. T.: Improved model of isoprene emissions in Africa using Ozone Monitoring Instrument (OMI) satellite observations of formaldehyde: implications for oxidants and particulate matter, *Atmospheric Chem. Phys.*, 14(15), 7693–7703, 2014.
- Martins, J. J., Dhammapala, R. S., Lachmann, G., Galy-Lacaux, C. and Pienaar, J. J.: Long-term measurements of sulphur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in southern Africa using passive samplers, *South Afr. J. Sci.*, 103(7–8), 336–342, 2007.
- Messou, A., Coulibaly, L., Doumbia, L. and Gourene, G.: Plants diversity and phytoaccumulators identification on the Akouedo landfill (Abidjan, Côte d’Ivoire), *Afr. J. Biotechnol.*, 12(3), doi:10.5897/AJB12.1664, 2013.
- MI: Site officiel - Ministère de l’Industrie et des Mines - République de Côte d’Ivoire, [online] Available from: [http://www.industrie.gouv.ci/?page=zone\\_industrielle](http://www.industrie.gouv.ci/?page=zone_industrielle) (Accessed 9 April 2018), 2015.
- Ministry of Transport: Ministère des Transports - République de Côte d’Ivoire, [online] Available from: <http://www.transports.gouv.ci/projetsuite.php?rd=2> (Accessed 9 August 2017), 2012.
- Modi, A. I., Kouadio, G., Yoboue, V. and Lacaux, J.-P.: Emissions atmosphériques de composés gazeux carbonés et azotés par les feux de bois du Sahel, *Sci. Chang. Planétaires Sécher.*, 13(3), 145–54, 2002.
- Morlière, A. and Rebert, J.-P.: Etude hydrologique du plateau continental ivoirien, *Doc. Sci. Cent. Rech. Océan. Abidj.*, 3(2), 1–30, 1972.
- Morris, E. and Evans, M.: Simulation of West African air pollution during the DACCIWA experiment with the GEOS-Chem West African regional model., in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 19, p. 16091., 2017.

- Murray, F.: Air pollution and respiratory disease, World Health Organ. [online] Available from: <https://www.mysciencework.com/publication/show/0988aea7674f5ae032549c69b0fc8e75> (Accessed 8 August 2017), 2001.
- Nanaa, B., Sanogob, O., Savadogo, P., Dahoa, T., Boudad, M. and Koulidiatia, J.: Air Quality Study in Urban Centers: Case Study of Ouagadougou, Burkina Faso, *FUTY J. Environ.*, 7(1), doi:10.4314/fje.v7i1.1, 2012.
- Newell, K., Kartsonaki, C., Lam, K. B. H. and Kurmi, O. P.: Cardiorespiratory health effects of particulate ambient air pollution exposure in low-income and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis, *Lancet Planet. Health*, 1(9), e368–e380, 2017.
- Norman, R., Barnes, B., Mathee, A. and Bradshaw, D.: Estimating the burden of disease attributable to indoor air pollution from household use of solid fuels in South Africa in 2000, *S. Afr. Med. J.*, 97(8), 764–771, 2007.
- Obanijesu, E. O., Adebisi, F. M., Sonibare, J. A. and Okelana, O. A.: Air-borne SO<sub>2</sub> pollution monitoring in the upstream petroleum operation areas of Niger-Delta, Nigeria, *Energy Sources Part A*, 31(3), 223–231, 2009.
- Okamoto, W. K., Gorse, R. A. and Pierson, W. R.: Nitric Acid in Diesel Exhaust, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 33(11), 1098–1100, doi:10.1080/00022470.1983.10465703, 1983.
- Olahan, A.: Agriculture urbaine et stratégies de survie des ménages pauvres dans le complexe spatial du district d'Abidjan, *Vertigo- Rev. Électronique En Sci. Environ.*, 10(2) [online] Available from: <https://vertigo.revues.org/10005> (Accessed 16 February 2017), 2010.
- Oliver, M. A. and Webster, R.: Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 4(3), 313–332, doi:10.1080/02693799008941549, 1990.
- Paulot, F., Paynter, D., Ginoux, P., Naik, V., Whitburn, S., Van Damme, M., Clarisse, L., Coheur, P.-F. and Horowitz, L. W.: Gas-aerosol partitioning of ammonia in biomass burning plumes: Implications for the interpretation of spaceborne observations of ammonia and the radiative forcing of ammonium nitrate, *Geophys. Res. Lett.*, 44(15), 2017GL074215, doi:10.1002/2017GL074215, 2017.
- Perrino, C., Catrambone, M., Di Menno Di Buchianico, A. and Allegrini, I.: Gaseous ammonia in the urban area of Rome, Italy and its relationship with traffic emissions, *Atmos. Environ.*, 36(34), 5385–5394, doi:10.1016/S1352-2310(02)00469-7, 2002.
- Petkova, E. P., Jack, D. W., Volavka-Close, N. H. and Kinney, P. L.: Particulate matter pollution in African cities, *Air Qual. Atmosphere Health*, 6(3), 603–614, doi:10.1007/s11869-013-0199-6, 2013.
- Pope III, C. A. and Dockery, D. W.: Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 56(6), 709–742, doi:10.1080/10473289.2006.10464485, 2006.
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K. and Thurston, G. D.: Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution, *JAMA*, 287(9), 1132–1141, doi:10.1001/jama.287.9.1132, 2002.
- Prevot, A. S. H., Elser, M., El Haddad, I., Maasikmets, M., Bozzetti, C., Robert, W., Richter, R., Slowik, J., Teinmaa, E., Hueglin, C. and Baltensperger, U.: Spatial variability and sources of ammonia in three European cities, vol. 19, p. 11902. [online] Available from: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1911902P> (Accessed 8 October 2017), 2017.
- Raheem, A. M. O. A., Adekola, F. A. and Obioh, I. O.: The Seasonal Variation of the Concentrations of Ozone, Sulfur Dioxide, and Nitrogen Oxides in Two Nigerian Cities, *Environ. Model. Assess.*, 14(4), 497–509, doi:10.1007/s10666-008-9142-x, 2009.

- Rivera-Gonzalez, L. O., Zhang, Z., Sanchez, B. N., Zhang, K., Brown, D. G., Rojas-Bracho, L., Osornio-Vargas, A., Vadillo-Ortega, F. and O'Neill, M. S.: An assessment of air pollutant exposure methods in Mexico City, Mexico, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 65(5), 581–591, doi:10.1080/10962247.2015.1020974, 2015.
- Rodriguez, J. A. and Hrbek, J.: Interaction of sulfur with well-defined metal and oxide surfaces: Unraveling the mysteries behind catalyst poisoning and desulfurization, *Acc. Chem. Res.*, 32(9), 719–728, doi:10.1021/ar9801191, 1999.
- Roy Rana: “The cost of air pollution in Africa”, OECD Development Centre Working Papers, OECD Publ. Paris, (333), 56, doi:10.1787/18151049, 2016.
- Sadanaga, Y., Sengen, M., Takenaka, N. and Bandow, H.: Analyses of the Ozone Weekend Effect in Tokyo, Japan: Regime of Oxidant (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) Production, *Aerosol Air Qual. Res.*, 12(2), 161–168, doi:10.4209/aaqr.2011.07.0102, 2012.
- Salem, A. A., Soliman, A. A. and El-Haty, I. A.: Determination of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone, and ammonia in ambient air using the passive sampling method associated with ion chromatographic and potentiometric analyses, *Air Qual. Atmosphere Health*, 2(3), 133–145, doi:10.1007/s11869-009-0040-4, 2009.
- Saly-Giocanti, F.: Philippe Cibois, Les méthodes d'analyse d'enquêtes. Paris, puf, « Que sais-je ? », n° 3782, 2007, 128 p., *Hist. Mes.*, XXII(XXII-1), 192–194, 2007.
- Sapek, A.: Ammonia Emissions from Non-Agricultural Sources, *Pol. J. Environ. Stud.*, 22(1), 63–70, 2013.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N.: Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, John Wiley & Sons. [online] Available from: [https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=n\\_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR23&dq=From+air+pollution+to+climate+change&ots=gRF8EOocbI&sig=4IGHk8PQHENUjWhfU3Vn-AQ4DFc](https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=n_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR23&dq=From+air+pollution+to+climate+change&ots=gRF8EOocbI&sig=4IGHk8PQHENUjWhfU3Vn-AQ4DFc) (Accessed 9 August 2017), 2016.
- Sleiman, H.: Pollution atmosphérique: plombémie et trafic routier à Beyrouth, 2268-3798, 2016.
- SOLTYS, N.: Procédés de traitement des COV ou composés organiques volatils, *Tech. L'Ingénieur J*, 3, 928, 1998.
- Soro, N., Lasm, T., Kouadio, B. H., Soro, G. and Ahoussi, K. E.: Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan, [online] Available from: <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/30375> (Accessed 6 February 2017), 2006.
- Speizer, F. E., Ferris Jr, B., Bishop, Y. M. and Spengler, J.: Respiratory disease rates and pulmonary function in children associated with NO<sub>2</sub> exposure, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 121(1), 3–10, 1980.
- Stratmann, G., Schlager, H., Sauer, D., Brocchi, V., Catoire, V. and Baumann, R.: Anthropogenic plumes from metropolitan areas and biomass burning emissions in West Africa during DACCIWA-airborne measurements on board the DLR Falcon 20, in EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 19, p. 17272., 2017.
- Suk, W. A., Ahanchian, H., Asante, K. A., Carpenter, D. O., Diaz-Barriga, F., Ha, E.-H., Huo, X., King, M., Ruchirawat, M. and da Silva, E. R.: Environmental pollution: an under-recognized threat to children's health, especially in low-and middle-income countries, *Environ. Health Perspect.*, 124(3), A41, 2016.
- Sultan, B. and Janicot, S.: The West African monsoon dynamics. Part II: The “preonset” and “onset” of the summer monsoon, *J. Clim.*, 16(21), 3407–3427, 2003.

- Sun, K., Tao, L., Miller, D. J., Pan, D., Golston, L. M., Zondlo, M. A., Griffin, R. J., Wallace, H. W., Leong, Y. J., Yang, M. M., Zhang, Y., Mauzerall, D. L. and Zhu, T.: Vehicle Emissions as an Important Urban Ammonia Source in the United States and China, *Environ. Sci. Technol.*, 51(4), 2472–2481, doi:10.1021/acs.est.6b02805, 2017.
- Sutton, M. A., Dragosits, U., Tang, Y. S. and Fowler, D.: Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK, *Atmos. Environ.*, 34(6), 855–869, doi:10.1016/S1352-2310(99)00362-3, 2000.
- Tam, P. S., Kittrell, J. R. and Eldridge, J. W.: Desulfurization of fuel oil by oxidation and extraction. 1. Enhancement of extraction oil yield, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29(3), 321–324, doi:10.1021/ie00099a002, 1990.
- Taylor, J., Bower, K., Flynn, M., Haslett, S., Crawford, I., Dorsey, J., Choularton, T., Coe, H., Rosenberg, P. and Lee, J.: Properties of low-level clouds during the DACCIWA aircraft campaign derived from remote sensing and airborne measurements, in EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 19, p. 6615., 2017.
- Teng, X., Hu, Q., Zhang, L., Qi, J., Shi, J., Xie, H., Gao, H. and Yao, X.: Identification of major sources of atmospheric NH<sub>3</sub> in an urban environment in northern China during wintertime, *Environ. Sci. Technol.* [online] Available from: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b00328> (Accessed 8 October 2017), 2017.
- Thorncroft, C. D. and Blackburn, M.: Maintenance of the African easterly jet, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125(555), 763–786, 1999.
- Tocquer, F., Mari, C., Leriche, M. and Team, D.: Study of the mixing and ageing of polluted plumes from major West Africa cities, in EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 19, p. 6999., 2017.
- UNDP: United Nations development Programme: Etude NAMA (Nationally Appropriate Mitigation Action) sur le charbon de bois durable en Côte d'Ivoire, [online] Available from: <http://www.uncclern.org/sites/default/files/inventory/undp02022015.pdf> (Accessed 9 August 2017), 2015.
- Val, S., Liousse, C., Doumbia, E. H. T., Galy-Lacaux, C., Cachier, H., Marchand, N., Badel, A., Gardrat, E., Sylvestre, A. and Baeza-Squiban, A.: 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, *Part. Fibre Toxicol.*, 10, UNSP 10, doi:10.1186/1743-8977-10-10, 2013.
- Van der A, R. J., Eskes, H. J., Boersma, K. F., van Noije, T. P. C., Van Roozendaal, M., De Smedt, I., Peters, D. H. M. U. and Meijer, E. W.: Trends, seasonal variability and dominant NO<sub>x</sub> source derived from a ten year record of NO<sub>2</sub> measured from space, *J. Geophys. Res.*, 113(D4), doi:10.1029/2007JD009021, 2008.
- Van Dingenen, R., Dentener, F. J., Raes, F., Krol, M. C., Emberson, L. and Cofala, J.: The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation, *Atmos. Environ.*, 43(3), 604–618, 2009.
- Vienne, F. and Eyer, W.: La combustion du bois et de la matière organique, *Serv. Forêts Faune SFF* [online] Available from: [https://www.fr.ch/sff/files/pdf21/fiche\\_technique\\_feux.pdf](https://www.fr.ch/sff/files/pdf21/fiche_technique_feux.pdf) (Accessed 30 August 2017), 2007.
- Whitburn, S., Van Damme, M., Kaiser, J. W., van der Werf, G. R., Turquety, S., Hurtmans, D., Clarisse, L., Clerbaux, C. and Coheur, P.-F.: Ammonia emissions in tropical biomass burning regions: Comparison between satellite-derived emissions and bottom-up fire inventories, *Atmos. Environ.*, 121(Supplement C), 42–54, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.015, 2015.

- Whitehead, J. D., Longley, I. D. and Gallagher, M. W.: Seasonal and diurnal variation in atmospheric ammonia in an urban environment measured using a quantum cascade laser absorption spectrometer, *Water, Air, Soil Pollut.*, 183(1–4), 317–329, doi:10.1007/s11270-007-9381-5, 2007.
- WHO, Ed.: *Air quality guidelines: global update 2005 : particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark., 2006.
- WHO: *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*, [online] Available from: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/250141/1/9789241511353-eng.pdf?ua=1>, 2016.
- Wong, D. W., Yuan, L. and Perlin, S. A.: Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 14(5), 404–415, doi:10.1038/sj.jea.7500338, 2004.
- Yao-Kouassi, Q. C.: *A la recherche d'une synergie pour la gestion des déchets ménagers en Côte d'Ivoire: cas du district d'Abidjan, Le Mans.* [online] Available from: <http://www.theses.fr/2010LEMA3006> (Accessed 9 August 2017), 2010.
- Yapi-Diahou, A., KOFFI-DIDIA, A., KOFFI, B. and others: *Les périphéries abidjanaises: territoires de redistribution et de relégation*, *Métrop. Sud Vues Leurs Périphéries Graf.*, (34), 107–122, 2011.
- Zanou, B.: *Recensement Général de la Population et de l'Habitation de 1998 (RGPH–98), Vol IV Anal. Résultats, 2* [online] Available from: [http://www.ceped.org/ireda/inventaire/ressources/civ-1998-rec-o13\\_t13\\_urbanisation.pdf](http://www.ceped.org/ireda/inventaire/ressources/civ-1998-rec-o13_t13_urbanisation.pdf) (Accessed 19 June 2017), 2001.
- Zoro, E.-G.: *Apport de l'information géographique dans l'élaboration d'un indicateur de développement urbain: Abidjan et l'Île de Montréal.* [online] Available from: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001PhDT.....93Z> (Accessed 1 August 2017), 2001.

**ARTICLE TIRÉ DE LA THÈSE**

**Publication: A pilot study of gaseous pollutants' measurement (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>) in Abidjan, Côte d'Ivoire: contribution to an overview of gaseous pollution in African cities (Bahino et al., 2018).**

Tous les résultats issus de la première campagne intensive d'Abidjan discutés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans la session spéciale DACCIWA/ACP/AMT (*Atmospheric Measurement Techniques*) du journal à comité de lecture ACP (*Atmospheric Chemistry and Physics*). Cet article présente les premières cartes de distribution spatiale des polluants gazeux dans la ville d'Abidjan. Il évalue aussi les concentrations moyennes des polluants par type de source de pollution. Ces résultats ont été placés dans un contexte international à travers une comparaison des concentrations moyennes obtenues sur des sites trafic, industriels et suburbains à Abidjan avec des concentrations moyennes obtenues dans d'autres villes d'Afrique et d'Asie. Une attention particulière a été accordée aux deux polluants gazeux majeurs issus du trafic en Afrique à travers un aperçu général des études scientifiques et des publications menées sur NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>. L'intégralité de cet article est présentée dans les pages qui suivent.

Les résultats de cet article ont été présentés lors de communications orales que j'ai effectué aux conférences DACCIWA de Toulouse (France) en Octobre 2015 et de Karlsruhe (Allemagne) en Octobre 2017 grâce à des financements des programmes AMRUGE et DACCIWA WP2. J'ai également participé du 26 au 30 Septembre 2016 au congrès international de chimie atmosphérique IGAC (International Global Atmospheric Chemistry) à Breckenridge (Colorado, États-Unis) grâce à un financement WMO (World Meteorological Organization) où j'ai présenté un poster résumant les points forts de ce travail dans la session 1 intitulée « Chimie atmosphérique et urbanisation ».

Atmos. Chem. Phys., 18, 5173–5198, 2018  
https://doi.org/10.5194/acp-18-5173-2018  
© Author(s) 2018. This work is distributed under  
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



## 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

Julien Bahino<sup>1</sup>, Véronique Yoboué<sup>1</sup>, Corinne Galy-Lacaux<sup>2</sup>, Marcellin Adon<sup>1</sup>, Aristide Akpo<sup>3</sup>, Sékou Keita<sup>1</sup>, Cathy Liousse<sup>2</sup>, Eric Gardrat<sup>2</sup>, Christelle Chiron<sup>2</sup>, Money Ossouhou<sup>1</sup>, Sylvain Gnamien<sup>1</sup>, and Julien Djossou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, BPV 34, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Laboratoire d'Aérodologie, UMR 5560, Université Toulouse III Paul Sabatier and CNRS, 31400, Toulouse, France

<sup>3</sup>Laboratoire de Physique du Rayonnement, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

**Correspondence:** Julien Bahino (julienbahino@gmail.com)

Received: 10 August 2017 – Discussion started: 23 August 2017

Revised: 6 March 2018 – Accepted: 13 March 2018 – Published: 17 April 2018

**Abstract.** This work is part of the DACCIWA FP7 project (Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa) in the framework of the Work Package 2 “Air Pollution and Health”. This study aims to characterize urban air pollution levels through the measurement of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub> in Abidjan, the economic capital of Côte d'Ivoire. Measurements of inorganic gaseous pollutants, i.e. NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub> were performed in Abidjan during an intensive campaign within the dry season (15 December 2015 to 16 February 2016), using INDAAF (International Network to study Deposition and Atmospheric chemistry in Africa) passive samplers exposed in duplicate for 2-week periods. Twenty-one sites were selected in the district of Abidjan to be representative of various anthropogenic and natural sources of air pollution in the city. Results from this intensive campaign show that gas concentrations are strongly linked to surrounding pollution sources and show a high spatial variability. Also, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> gases were present at relatively higher concentrations at all the sites. NH<sub>3</sub> average concentrations varied between 9.1 ± 1.7 ppb at a suburban site and 102.1 ± 9.1 ppb at a domestic fires site. NO<sub>2</sub> mean concentration varied from 2.7 ± 0.1 ppb at a suburban site to 25.0 ± 1.7 ppb at an industrial site. Moreover, we measured the highest O<sub>3</sub> concentration at the two coastal sites of Gonzagueville and Félix-Houphouët-Boigny International Airport located in the southeast of the city, with average concentrations of 19.1 ± 1.7 and 18.8 ± 3.0 ppb, respectively. The SO<sub>2</sub> average concentration never exceeded 7.2 ± 1.2 ppb over all the sites, with 71.5 % of the sampling sites showing

concentrations ranging between 0.4 and 1.9 ppb. The HNO<sub>3</sub> average concentration ranged between 0.2 and 1.4 ppb. All these results were combined with meteorological parameters to provide the first mapping of gaseous pollutants on the scale of the district of Abidjan using geostatistical analysis (ArcGIS software). Spatial distribution results emphasize the importance of the domestic fires source and the significant impact of the traffic emissions on the scale of the city. In addition, in this work we propose a first overview of gaseous SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations on the scale of several African cities by comparing literature to our values. The daily SO<sub>2</sub> standard of World Health Organization (WHO) is exceeded in most of the cities reported in the overview, with concentrations ranging from 0.2 to 3662 µg m<sup>-3</sup>. Annual NO<sub>2</sub> concentrations ranged from 2 to 175 µg m<sup>-3</sup>, which are lower than the WHO threshold. As a conclusion, this study constitutes an original database to characterize urban air pollution and a first attempt towards presenting a spatial distribution of the pollution levels at the scale of the metropolis of Abidjan. This work should draw the attention of the African public authorities to the necessity of building an air quality monitoring network in order to (1) to define national standards and to better control the pollutants emissions and (2) to investigate the impact on the health of the growing population in developing African countries.

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

## 1 Introduction

For several years, urban areas have experienced a deterioration in air quality and an increase in health and environmental impacts. Several scientific studies have shown that a large number of premature deaths, as well as respiratory and cardiovascular diseases, are related to air pollution (Brook et al., 2004; Pope III et al., 2002; Pope III and Dockery, 2006; WHO, 2006). According to the World Health Organization (WHO) estimation in 2012, 11.6 % of the deaths in the world were associated with outdoor and indoor air pollution. It represents nearly 6.5 million of deaths per year, among which 3 million deaths were attributable only to ambient air pollution. A total of 88 % of these deaths occurred in low- and middle-income countries (WHO, 2016). Also, according to the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Centre, 700 000 premature deaths were linked to air pollution in Africa in 2013 (Roy Rana, 2016).

Anthropogenic activities are considered to be responsible for the main sources of gaseous and particulate pollutants emissions into the air and their concentrations measured in the urban atmosphere (Kampa and Castanas, 2008). Several studies have been carried out in major cities of Europe, Asia and northern America. These studies underlined the emergency of taking action to reduce the emission of pollutants into the atmosphere in order to mitigate health and environmental impacts. Air quality networks have been set up in major cities of the United States and Europe with the purpose of informing the public authorities as well as the population in real time. However, in Africa, where researchers have found that air pollution causes more premature deaths per year than either unsafe drinking water or malnutrition, an air quality monitoring network is almost non-existent (Roy Rana, 2016). Very few studies on air pollution have been carried out over the African continent; this is particularly true for the western African region (Norman et al., 2007).

The western African region has experienced an economic upturn during the last few years characterized by an economic growth estimated at 2.7 % in 2017 with a prospect of 3.5 % in 2018 (IMF, 2017). Most of the economic activities of African countries (e.g. industries, trade, transport and real estate) are concentrated in cities. Therefore, this favoured a strong population explosion in cities due to a massive rural exodus and significant migration of western African populations (Denis and Moriconi-Ebrard, 2009). This intense economic activity, associated with a rapid population growth, strong urbanization and the perpetual uncontrolled expansion of cities, causes increasingly significant anthropogenic emissions of gaseous and particulate pollutants. This causes a significant deterioration of general air quality that may alter the health of populations and damage ecosystems (Fourn and Fayomi, 2006; Norman et al., 2007).

Very few qualified datasets related to the levels of pollutants' concentrations are available for African cities. Through some research programs and projects such as

AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis), IN-DAAF (International Network to study Deposition and Atmospheric chemistry in Africa) and POLCA (POLLution des Capitales Africaines), some experimental studies have been carried out in certain African capitals and rural areas such as in Bamako, Dakar, Yaoundé, and Amersfoort (Adon et al., 2016; Conradie et al., 2016; Liousse and Galy-Lacaux, 2010; Lourens et al., 2011; Val et al., 2013). The DAC-CIWA (Dynamics-Aerosols-Chemistry-Clouds Interactions in West Africa) European program follows the framework of the above-mentioned programs. The measurements implemented within the framework of DACCIWA are mainly focused on the Southern western African (SWA) region. DAC-CIWA has conducted extensive fieldwork in the SWA to collect high-quality observations, spanning the entire process chain from surface-based natural and anthropogenic emissions to impacts on health, ecosystems and climate (Knipertz et al., 2015). Work Package 2 (WP2) of the DAC-CIWA program aims to link emission sources, air pollution and health impacts in terms of lung inflammation and related diseases over representative differentiated urban sources in SWA (i.e. traffic, domestic fires and waste burning in Abidjan, Côte d'Ivoire, and two-wheel vehicle traffic in Cotonou, Benin). The strategy in WP2 is based on a multidisciplinary approach (e.g. physics, chemistry, toxicology, epidemiology, modelling). Experimental results from WP2 rely both on intensive short campaigns and also on mid-term monitoring measurements at the different selected urban sites. Three urban supersites to represent the major urban sources mentioned above have been selected for the mid-term monitoring from December 2014 to March 2017.

Abidjan is located close to the Ebrié Lagoon along the Gulf of Guinea on the south-east coast of Côte d'Ivoire. Abidjan, the economic capital of Côte d'Ivoire is a cosmopolitan city in sub-Saharan Africa and the second most populated western African city. According to the National Institute of Statistics, the population of Abidjan was estimated to be 4.7 million in 2014, with an average annual population growth of 2.6 % (INS, 2015). The autonomous district of Abidjan is composed of 10 municipalities in the city (Abobo, Adjamé, Attécoubé, Cocody, Koumassi, Marcory, Plateau, Port-Bouët, Treichville and Yopougon) and three neighbouring municipalities (Anyama, Bingerville and Songon). The cumulative area of these municipalities is 2119 km<sup>2</sup> (i.e. 0.66 % of the country) (Yao-Kouassi, 2010) compared to 580 km<sup>2</sup> in 1990 (Kopieu, 1996). Abidjan is a port city and a dynamic economic centre, not only for the country, but also for the entire western African subregion. The port of Abidjan is of the first rank in western Africa in terms of merchandise traffic, with 21.5 million tons in 2013 and a prospect of 27 million tons in 2018. Abidjan hosts 70 % of the country's industries and constitutes the main maritime facade for the hinterland countries such as Burkina Faso, Niger and Mali. In addition, Abidjan represents 60 % of the gross domestic product (GDP) of Côte d'Ivoire, which is estimated

to be USD 31.76 billion (Country Economy, 2016). The annual growth rate of GDP in Côte d'Ivoire is expected to be 9 % at the end of the third quarter of 2017. The main sectors that support the economic growth of Côte d'Ivoire are real estate, road transport, road building, manufacturing and mining industries. Abidjan has experienced strong economic growth in recent years that contributes to different environmental issues such as air pollution. This is one of the main issues in western African capitals, driven by explosive unplanned growth of urban conglomerations and contributing to unregulated emissions.

This study presents results of an intensive measurement campaign performed from 15 December 2015 to 16 February 2016. This work, part of the WP2, aims to characterize urban air pollution in Abidjan through the measurement of the concentrations of gaseous pollutants ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  and  $\text{O}_3$ ). Twenty-one sampling sites distributed throughout the district of Abidjan were selected to be instrumented with gaseous passive samplers in order to obtain the spatial distribution of each gaseous pollutant. This study allows the contribution of each source of pollution to be established as well as the concentrations of inorganic gaseous species in Abidjan to be compared with those of other cities in Africa and other developing countries.

## 2 Experimental design

### 2.1 Sampling sites

For air pollution assessment in a city, it is important to consider most of the anthropogenic activities that may constitute sources of pollution. For the purpose of obtaining a good spatial coverage of the Abidjan district, several measurement sites have chosen across the different municipalities.

In this work, a network of experimental measurement sites was built. Measurement sites were chosen based on criteria of land use, orographic effects and the objectives of the DAC-CIWA program (i.e. (1) population density of each municipality is considered as a factor highly impacting gaseous pollutants' sources, (2) spatial coverage of the 13 municipalities of the district of Abidjan and (3) documentation of identified air pollution main sources). Figure 1 presents the mapping of the 21 selected sites referenced from  $A_1$  to  $A_{21}$  and their identified major sources of pollution nearby in the district of Abidjan, while Table 1 presents details of each site. So, 10 sampling sites are classified as traffic sites ( $A_1$ – $A_8$ ,  $A_{10}$ ,  $A_{14}$ ) of which 5 of these sites present a combination of traffic and another pollution source ( $A_4$ ,  $A_7$ ,  $A_8$ ,  $A_{10}$ ,  $A_{14}$ ).  $A_1$  is also the DACCIWA supersite representative of traffic. Three sites are considered to be representative of industrial areas ( $A_9$  to  $A_{11}$ ). Industrial sites are often influenced by traffic. Four sites are representative of the residential district ( $A_7$ ,  $A_8$ ,  $A_{12}$  and  $A_{13}$ ). Four sites (A) have been selected as suburban and one as a green area ( $A_{17}$  to  $A_{21}$ ). Finally, two DAC-

CIWA supersites studied over a 28-month period (December 2014–March 2017) in terms of local emission sources were considered in this study to be representative of domestic fires ( $A_{16}$ ) and waste burning ( $A_{15}$ ). These two supersites as well as  $A_1$  (traffic site) and  $A_6$  (Airport FHB) are shown in Fig. 2. Mid-term measurement sites are operational. The seasonal variation of gaseous pollutants showed that the highest concentrations are measured during the dry season (December–February). This information led to the choice of the study period.

## 2.2 Sampling and analysis

### 2.2.1 Sampling procedure

Ambient concentrations of gaseous pollutants ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  and  $\text{O}_3$ ) were determined using the INDAAF (<http://indaaf.obs-mip.fr>, last access: 3 April 2018) passive sampler method. These passive samplers developed by the Laboratory of Aerology (LA) in Toulouse (France) using the work of Ferm (1991) were tested and qualified in the framework of the INDAAF project for major African ecosystems over the past 15 years (Adon et al., 2010). Validation and inter-comparison studies have been performed according to comparisons with active analysers. Results presented in Adon et al. (2010) assure the quality and the accuracy of the measurements. Passive samplers have also been used for the measurement of gaseous pollutants' concentration in urban areas during the POLCA program (Adon et al., 2016). Passive samplers can be used for indoor and outdoor pollution monitoring in all environments (Salem et al., 2009) and provide good results (Gorecki and Namiesnik, 2002). Moreover, they are suitable to investigate the spatial distribution of gaseous pollutants in an air quality monitoring network (Carmichael et al., 2003; Cox, 2003; Cruz et al., 2004). Also, INDAAF passive samplers have the advantage of being small, silent and reliable, and they do not need electricity. The sampling technique is based on the molecular diffusion of gas molecules into the passive sampler, where they are quantitatively collected on an impregnated filter (He, 2014; Galy-Lacaux et al., 2001). The calculation of gaseous pollutants' concentrations in the air depends on the physical characteristics of the passive samplers, the duration of exposure and the meteorological parameters. We calculate the gaseous pollutant average concentration in ppb using the following formula given by Adon et al. (2010) Eq. (1):

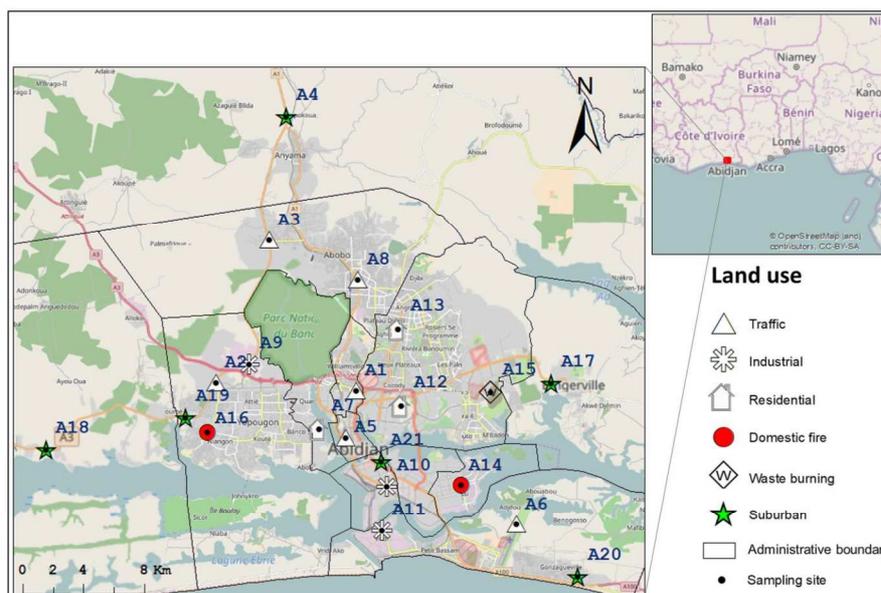
$$C_{\text{amb}} (\text{ppb}) = \frac{(L/A) \cdot X \cdot R \cdot T}{t \cdot D \cdot P}, \quad (1)$$

where  $C_{\text{amb}}$  (ppb) represents the concentration of the considered gaseous pollutant in ppb,  $X$  is the number of gas molecules trapped on the cellulose filter ( $\mu\text{mol}$ ) and  $R$  (constant gas) =  $0.08206 \text{ L atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .  $T$  is the average temperature during the sampling period (K),  $P$  is the mean atmospheric pressure during the sampling period,  $D$  is the

**Table 1.** Geographical coordinates of sampling sites and majors source of air pollution nearby.

ID code	Site name	Municipality	Latitude	Longitude	Land use	Observations
A1*	220 Lgts Liberté	Adjamé	5°21'14" N	4°01'04" W	Traffic	Mid-term measurement site near a transport station; regular traffic jams; obsolete public transport vehicles (gbaka, shared taxis and buses); human activities
A2	Gesco	Yopougon	5°21'31" N	4°06'03" W	Traffic	Very large intersection at the junction of an exit of the municipality of Yopougon, the North Highway and Dabou Road; heavy goods vehicles; minibuses (gbaka); buses; personal vehicles; regular traffic jams
A3	N'Dotré	Abobo	5°26'41" N	4°04'10" W	Traffic	Crossroads at the east exit of the city; traffic of heavy goods vehicles and buses; human activities
A4	Corridor Anyama	Anyama	5°31'8" N	4°03'34" W	Suburban/traffic	Far from the city centre; surrounded by forests; human activities
A5	Pharmacy Cadre Blvd	Plateau	5°19'33" N	4°01'26" W	Traffic/administrative centre	City centre; crossroad; traffic jams; personal vehicles; train station
A6	Airport FHB	Port-Bouët	5°16'26" N	3°55'21" W	Traffic	Airport weather station; open space; a lot of wind; air traffic
A7	Town hall Attécoubé	Attécoubé	5°19'52" N	4°02'23" W	Residential district/traffic	Town hall; near traffic lanes; old shared taxis; low income population; use of wood and charcoal
A8	Town hall Abobo	Abobo	5°25'15" N	4°01'00" W	Traffic/residential	Town hall; near a big crossroads and the big market of Abobo; old communal taxis and minibuses (gbaka); low income population; human activities
A9	Yopougon industrial area	Yopougon	5°22'12" N	4°04'52" W	Industrial	Heavy industries (cement plants) and light industries (agro-industries, plastic and iron processing, pharmaceutical and cosmetics industries); heavy goods vehicles, traffic jams
A10	Zone 3	Marcory	5°17'48" N	3°59'57" W	Industrial/traffic	Mixture of residential, commercial and industrial land uses; wood industries, tire retreading, paint manufacturing, chemical fertilizer preparation
A11	Tri Postal Vridi	Port-Bouët	5°16'12" N	4°00'07" W	Industrial/harbour	Heavy industry (oil refinery, hydrocarbon depot, oil terminal, thermal power station); light industry (port activities, coffee and cocoa production, metal and plastic processing, fertilizer preparation, paint, soap and oil manufacture)
A12	University FHB	Cocody	5°20'42" N	3°59'27" W	Residential district	University residences; electric vehicles; new personal vehicles; use of liquefied petroleum gas (LPG) for cooking
A13	Angré	Cocody	5°23'27" N	3°59'34" W	Residential district	New personal vehicles; use of LPG for cooking
A14	Place Inch'allah	Koumassi	5°17'52" N	3°57'20" W	Domestic fires/traffic	Residential site mainly influenced by domestic activities; firewood and charcoal; old vehicles
A15*	Akouédo	Cocody	5°21'12" N	3°56'16" W	Waste burning	Uncontrolled landfill; continuous burning of all types of waste
A16*	Niangon Bracodi	Yopougon	5°19'44" N	4°06'21" W	Domestic fires	Site for smoking meat and fish using firewood
A17	Scientific pole CNRI-UFHB	Bingerville	5°21'30" N	3°54'07" W	Suburban background	Far from traffic; near to Ebrié Lagoon; university residence
A18	Songon health centre	Songon	5°19'6" N	4°12'06" W	Suburban background	Far from city centre; hospital
A19	Niangon Adjamé	Yopougon	5°20'15" N	4°07'08" W	Suburban background	Human activities; firewood, charcoal
A20	Gonzagueville	Port-Bouët	5°14'31" N	3°53'09" W	Suburban	Near to Atlantic Ocean, human activities
A21	Ecological research centre	Treichville	5°18'41" N	4°00'10" W	Green area	Near to Ebrié Lagoon; a lot of wind;

\* Mid-term measurement sites (December 2014–April 2017).



**Figure 1.** Spatial distribution of the 21 sampling sites (A<sub>1</sub>–A<sub>21</sub>) and major sources of air pollution nearby in the district of Abidjan.

molecular diffusion coefficient of the specific gas in the atmosphere,  $t$  is the exposure duration time (s) and the ratio  $L/A = 47.5 \text{ m}^{-1}$  is the air resistance coefficient for the INDAAF passive sampler (Adon et al., 2010).

The passive samplers were prepared by the LA in Toulouse and dispatched in Abidjan (Côte d'Ivoire) from 15 December 2015 to 16 February 2016 during the dry season. For each set of passive samplers, blank samples were kept sealed in the laboratory and others sent to the sites. Passive samplers were exposed bi-monthly at the 21 measurement sites of the Abidjan district to represent integrated 2-week periods over the 2-month study period. Passive samplers were mounted on stainless steel rails in duplicate and placed at a height of at least 2.5 m above the ground, corresponding to the height of human exposure. On each rail, we installed duplicate passive samplers for each gaseous species measured (Fig. 2). Passive samplers were then exposed for 2 weeks before being replaced by new ones. Once removed, passive samplers were kept refrigerated before being shipped to the LA for analysis. Over the study period, 672 passive samplers were exposed and 2 were damaged. A total of 670 samples and 48 blanks (12 for each gas) were analysed (24 blanks kept in the laboratory and 24 other blanks sent in the same condition with exposed passive samplers).

### 2.2.2 Chemical analysis

To determine and calculate the concentration of studied gaseous pollutants, ionic concentrations of ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) and nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) are

determined by ion chromatography (IC) after desorption of the filters in 10 mL (5 mL for the  $\text{NH}_3$ ) of 18 M $\Omega$  deionized water by ultrasonic stirring (15 min). The IC system used for this study has been extensively described in previous studies (Adon et al., 2010; Galy-Lacaux and Modi, 1998; Hodgkins et al., 2011). The reliability of the IC analytical results are assessed by the chemistry laboratory of the LA in Toulouse by performing a quality control inter-comparison program organized by the World Meteorological Organization/Global Atmospheric Watch (WMO/GAW) twice a year (Laouali et al., 2012). Results of the WMO/GAW quality assurance program for the year 2016 show that analytical precision is estimated to be  $\pm 5\%$  for all ions (<http://www.qasac-americas.org/>). The reproducibility of the INDAAF passive samplers was found to be 20, 9.8, 14.3, 16.6 and 10% for  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{O}_3$  respectively. Detection limits for each trace gas were calculated from field blanks' filters and found to be  $0.07 \pm 0.03$  ppb for  $\text{HNO}_3$ ,  $0.2 \pm 0.1$  ppb for  $\text{NO}_2$ ,  $0.7 \pm 0.2$  ppb for  $\text{NH}_3$ ,  $0.05 \pm 0.03$  ppb for  $\text{SO}_2$  and  $0.1 \pm 0.1$  ppb for  $\text{O}_3$  (Adon et al., 2010). For our present study, the detection limit was found to be  $0.09 \pm 0.00$  ppb for  $\text{HNO}_3$ ,  $0.37 \pm 0.02$  ppb for  $\text{NO}_2$ ,  $1.4 \pm 0.18$  ppb for  $\text{NH}_3$ ,  $0.01 \pm 0.00$  ppb for  $\text{SO}_2$  and  $0.08 \pm 0.04$  ppb for  $\text{O}_3$ . Potential interference between  $\text{HNO}_3$  and  $\text{NO}_2$  passive samplers was estimated and found to be negligible. For the traffic site A<sub>1</sub>, our results presented in Supplement Table S1 show that nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) concentrations are very low compared to nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) ions, with a ratio around 2%. Other  $\text{NO}_y$  species such as peroxyacetyl nitrate (PAN) and nitrous acid (HONO), which can be deposited as nitrite and oxidize to nitrate, may



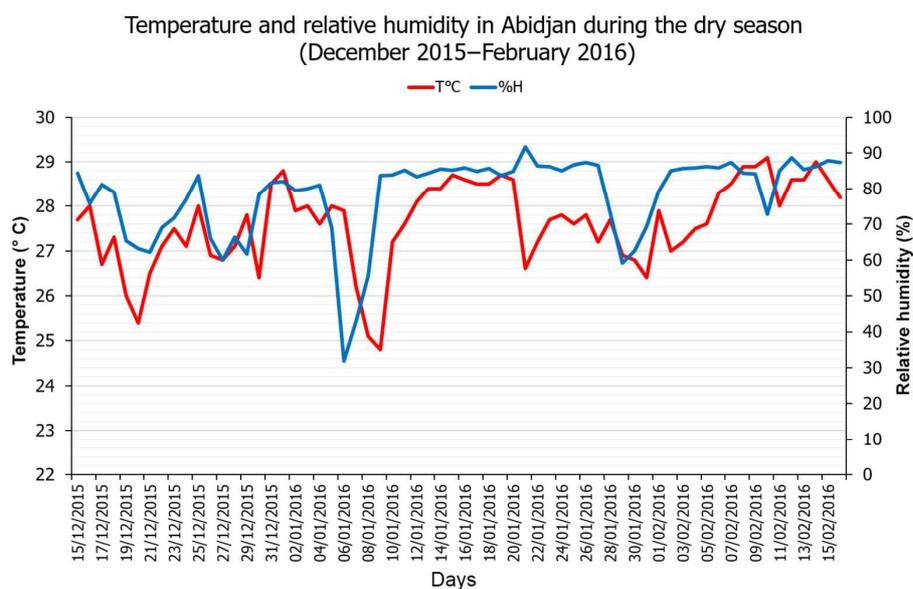
**Figure 2.** Photos of different sampling sites using INDAAF passive samplers installed in duplicate: traffic ( $A_1$ ), domestic fires ( $A_{16}$ ) waste burning ( $A_{15}$ ) and airport FHB ( $A_6$ ).

interfere with the determination of  $\text{NO}_2$  and  $\text{HNO}_3$  concentration (Cape, 2009). The choice of the coating solution in the INDAAF passive sampler aims to reduce this interference. The average concentration of two samples is used in all the cases except when contamination of one sample is suspected and when the average concentration is under the detection limit. Thus, for the present work, 4 samples (0.6 %) were removed from the whole database for contamination and/or detection threshold, making a database of 666 samples representing about 99.4 % of the total analysed samples.

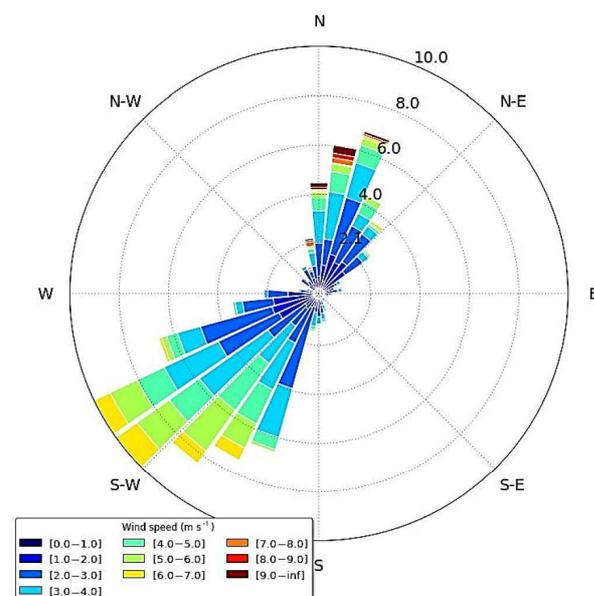
### 2.3 Meteorological data

Meteorological parameters used for this study were collected at the site ( $A_6$ ), which is located at the weather station of the Félix Houphouët-Boigny International Airport (Airport FHB, Fig. 2). This weather station is managed by ASECNA (Agency for Safety of Air Navigation in Africa and Mada-

gascar) and provides meteorological data for air navigation in the district of Abidjan. The meteorological data used in this study included wind direction and velocity, temperature and relative humidity. Daily variations in temperature and relative humidity during the study period (15 December 2015 to 16 February 2016) are presented in Fig. 3. Daily average temperature ranged between 25 and 29 °C, while mean relative humidity was about 78 %, with a maximum of 92 % during the study period. In addition, this period was particularly dry with only two rainy days and a total cumulative rainfall of 32 mm. The wind rose presented in Fig. 4 shows the predominance of southwest (SW) and north–northeast (NNE) wind directions. Wind velocity presents values ranging between 1 and 9  $\text{m s}^{-1}$ , with an average of  $2.75 \pm 0.6 \text{ m s}^{-1}$ . These observed meteorological parameters are characteristic of the major dry season in Côte d'Ivoire (Konate et al., 2016).



**Figure 3.** Temperature and relative humidity measured by ASECNA in Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016).



**Figure 4.** Hourly wind rose diagram of Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016).

## 2.4 Spatial analysis

In this study, we interpolated the inorganic gaseous species' concentrations measured at the 21 sites to obtain the spatial distribution of gaseous concentrations of the entire city

of Abidjan using geostatistical analysis (GIS). The mapping tool used was ArcGIS software version 10.2.2. The features were projected using World Geodetic System (WGS\_1984) UTM\_Zone\_30N (Universal Transverse Mercator). Two interpolation methods are frequently used to study spatial distribution of pollutants. These are inverse distance weighting (IDW) and kriging. The general formula for both interpolators is formed as a weighted sum of the data Eq. (2):

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i), \quad (2)$$

where  $\hat{Z}(S_0)$  is the predicted concentration at  $S_0$  location and is calculated as a linear weighted sum of  $N$  observations surrounding the predicted location.  $Z(S_i)$  is the measured concentration at the  $S_i$  location,  $\lambda_i$  is an unknown weight for measured concentration at the  $S_i$  location,  $S_0$  is the prediction location and  $N$  is the number of measured concentration.

In IDW, the weight  $\lambda_i$  only depends on the distance between the measurement points and the prediction location. IDW computes predicted concentrations at the location as a weighted average of neighbouring measured concentrations (Ibrahim et al., 2012; Rivera-Gonzalez et al., 2015). This method provides a spatial distribution of pollutants much closer to reality. The IDW method showed better similarity between measured and interpolated concentrations of sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) and nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) (Jha et al., 2011).

For the kriging method, the weight  $\lambda_i$  is not only based on the distance but also on the overall spatial arrangement of the sampling sites. Kriging is the method of interpolation derived

**Table 2.** Parameters of empirical semivariogram for each pollutant.

	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>
Nugget Co (ppb) <sup>2</sup>	30.90	1.93	0.07	6.93
Partial sill Cs (ppb) <sup>2</sup>	24.46	5.66	0.16	31.68
Major range (km)	29.44	40.41	30.39	46.51

from regionalized variable theory. It depends on expressing spatial variation of the property in terms of the variogram, and it minimizes the prediction errors which are themselves estimated (Oliver and Webster, 1990).

#### 2.4.1 Data analysis

The empirical semivariograms provide information on the spatial autocorrelation of datasets. The semivariograms necessary for kriging were estimated for each pollutant and are presented in Fig. 5. The results for NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub> show that the Gaussian semivariogram model is fitted to empirical values. The parameters of the empirical semivariogram are presented in Table 2. The empirical semivariogram of NH<sub>3</sub> shows a nugget model. It represents the discontinuity at the origin due to small-scale variation and the lack of spatial autocorrelation of NH<sub>3</sub> concentration.

#### 2.4.2 Cross-validation

Ordinary kriging with a Gaussian semivariogram model and IDW was used to perform the spatial interpolation. To validate the interpolation model, error analysis was carried out between measured and interpolated values. The free statistical software R was used to determine the mean absolute error (MAE), the root mean square error (RMSE) and the coefficient of correlation ( $R^2$ ). The RMSE and MAE are regularly employed in model evaluation studies (Chai and Draxler, 2014). Lower MAE and RMSE values and a higher value of  $R^2$  are used for better comparison (Jha et al., 2011; Rivera-Gonzalez et al., 2015). The critical value of the Pearson's correlation coefficient at the threshold of 5 % is  $R^2 = 0.42$ . Regression between interpolated data and observed data using IDW and the kriging method is presented in Fig. 6, while statistical parameters calculated for each interpolation method are presented in Table 3. Results indicate that the lowest MAE and RMSE values and the highest  $R^2$  value are always obtained for the IDW interpolation method. Thus, the IDW was chosen to interpolate data and represent the spatial distribution of all gaseous pollutants.

### 3 Results and discussion

The average concentration measured every 2 weeks for each gaseous pollutant is shown in Table S2. The average concentrations calculated from the four 2-week periods were used to

**Table 3.** Statistical parameters calculated for each interpolation method.

Parameters	MAE		RMSE		$R^2$	
	IDW	Kriging	IDW	Kriging	IDW	Kriging
NO <sub>2</sub>	0.010	3.419	0.031	4.064	0.999	0.738
NH <sub>3</sub>	0.029	13.016	0.062	19.945	0.999	0.016
SO <sub>2</sub>	0.003	0.437	0.006	0.621	0.999	0.916
HNO <sub>3</sub>	0.000	0.093	0.000	0.127	0.999	0.916
O <sub>3</sub>	0.007	0.609	0.009	0.815	0.999	0.965

provide pollutants' spatial distribution maps. The minimum, maximum and average concentrations of gaseous pollutants at each site are presented in Table 4. The differences in the spatial distribution of the sites are examined in the following discussion.

#### 3.1 Spatial distribution of gaseous pollutants in Abidjan

In order to present the spatial distribution of gaseous pollutants investigated in this work, the centre of the district of Abidjan is divided into a rectangle of 35 km × 30 km between 5°14' and 5°31' N, and 3°53' and 4°12' W. Maps of each pollutant are presented using a colour scale from blue (low concentration in ppb) to red (high concentration in ppb) (Figs. 7 to 11). Black lines present administrative boundaries. Sampling sites are represented by green points and referenced with an ID code from A<sub>1</sub> to A<sub>21</sub>. Green lines on the spatial distribution map of NO<sub>2</sub> represent the main road network.

##### 3.1.1 Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>)

The spatial distribution of NO<sub>2</sub> concentrations in the district of Abidjan is represented in Fig. 7. This map reveals that NO<sub>2</sub> average concentrations vary between 2.7 and 25 ppb during this dry season. The highest values (25 ppb) were obtained at the Tri Postal site (A<sub>11</sub>), while lowest values are recorded at the suburban sites A<sub>19</sub> and A<sub>18</sub>, with concentrations of 5.4 and 2.7 ppb respectively. The highest values at A<sub>11</sub> may be explained by the presence of both the port and industrial areas around this site. Also, high concentrations were found at the A<sub>5</sub> site, characterized by traffic, with a mean concentration of 23.9 ppb. This site, located in the administrative centre of Abidjan, is characterized by traffic jams every working day. Sites A<sub>1</sub> and A<sub>8</sub>, representative of traffic sites, and A<sub>9</sub>, representative of industrial sites, present comparable mean concentrations ranging between 19.9 and 21 ppb. Moreover, the highest NO<sub>2</sub> average concentrations measured in Abidjan are usually found for sampling sites located close to an important road, confirming NO<sub>2</sub> as a tracer of the presence of traffic (Istrate et al., 2014). Therefore, traffic appears to be one of the main sources of NO<sub>2</sub> emission in Abidjan. For example, in 2014, more than 82 % of vehicles in

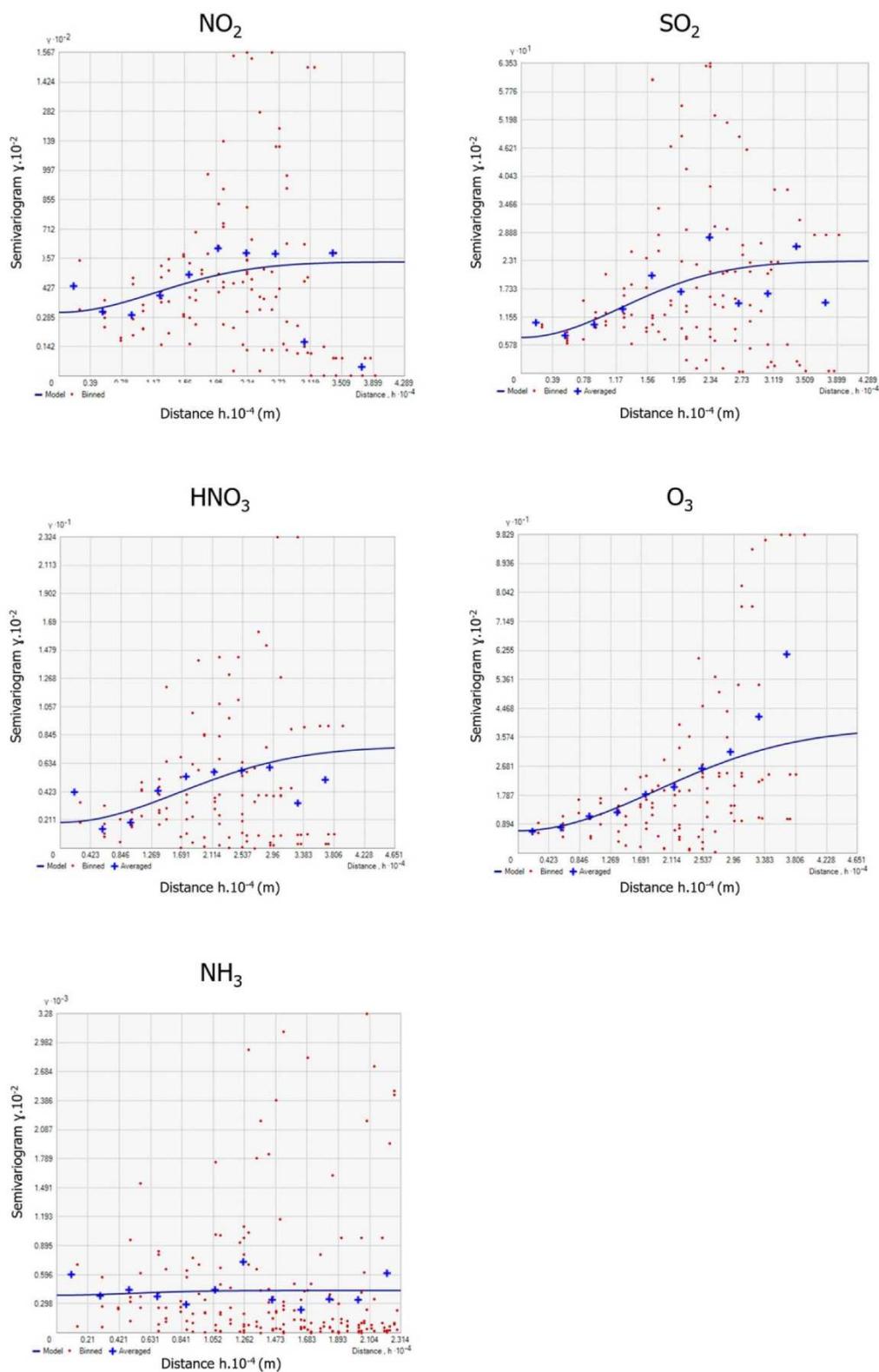


Figure 5. Empirical semivariogram for each pollutant.

[www.atmos-chem-phys.net/18/5173/2018/](http://www.atmos-chem-phys.net/18/5173/2018/)

Atmos. Chem. Phys., 18, 5173–5198, 2018

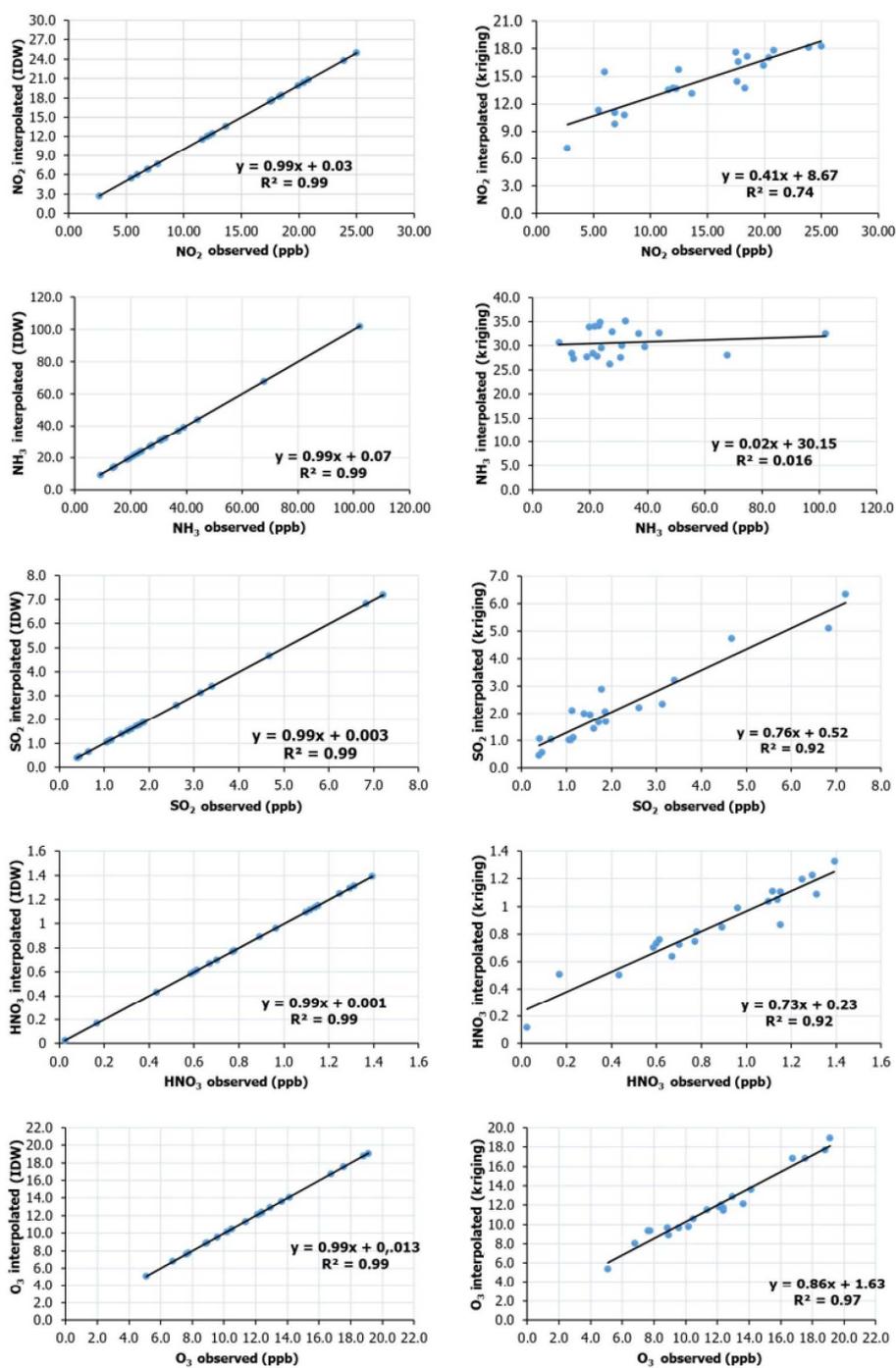
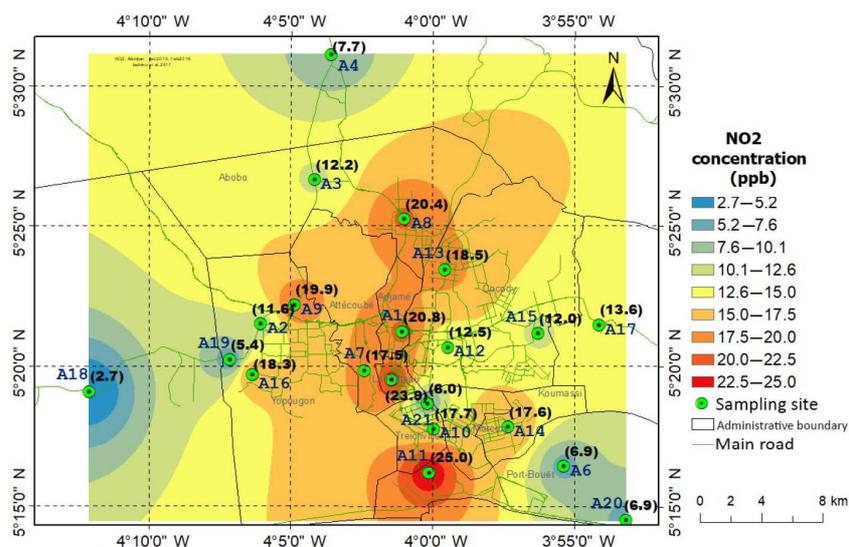


Figure 6. Regression between interpolated data and observed data using IDW and the kriging method.



**Figure 7.** Spatial distribution of  $\text{NO}_2$  in the district of Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016). Measured concentrations in ppb are in brackets.

Côte d'Ivoire were in the district of Abidjan (Kouadio, 2014). The national agencies of urban transport (AGETU (AGence des Transports Urbains) and SONATT (Société Nationale des Transports Terrestres)) counted 423 587 vehicles in 2010 (Goore Bi, 2011). Most of these vehicles are second-hand and are more than 20 years old (Ministry of Transport, 2012). These vehicles do not comply with European Union (EU) air quality standards and are mostly used because of their moderate price.

Besides the road traffic, the industrial sector seems to be another great contributor to the highest measured  $\text{NO}_2$  concentration. Significant concentration levels around 20.9 ppb are measured over the three industrial sites ( $A_{11}$ ,  $A_9$  and  $A_{10}$ ). Abidjan currently has three industrial zones covering 885 ha, and the fourth is under construction. The biggest one is located in the municipality of Yopougon (645 ha), followed by the industrial areas of Vridi in the municipality of Port-Bouët (120 ha) and of Koumassi (120 ha) (MI, 2015). The industrial area of Vridi ( $A_{11}$ ), where the highest  $\text{NO}_2$  concentrations were measured (25 ppb), includes several activities related to the harbour area, shipyards, oil terminals, chimneys, a thermal power station and the processing and storage of petroleum product factories. With the exception of oil and shipping industries, most of these activities are also found in the other industrial areas. Other activities such as cement manufacturing, chemical industries and plastic production are also present. These industrial activities are well known to be the main source of anthropogenic nitrogen oxide emissions into the atmosphere (Krzyzanowski and Cohen, 2008).

### 3.1.2 Sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ )

Figure 8 shows the spatial distribution of the  $\text{SO}_2$  concentrations in Abidjan.  $\text{SO}_2$  concentrations varied from a minimum of 0.4 ppb in the suburban site ( $A_{20}$ ) to a maximum of 7.2 ppb measured at the  $A_3$  traffic site (Table 2). The highest concentrations were generally obtained at the five traffic sites ( $A_3$ ,  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $A_{19}$ ,  $A_5$ ) and at the  $A_1$  suburban site, with respective values of 7.2, 6.8, 4.7, 3.4, 3.1 and 2.6 ppb. We notice a decrease of  $\text{SO}_2$  concentrations from the northwest of the city where the main roads (North Highway and East Source Road) and the industrial zone of Yopougon ( $A_9$ ) are located to the southeast of Abidjan near the Atlantic Ocean. The majority of the sampling sites (71.5 %) show concentrations lower than 2 ppb. Similarly to  $\text{NO}_2$ , the highest  $\text{SO}_2$  concentrations are observed in areas of dense traffic and in industrial zones. It should be noted that refining companies located in the industrial zone of Vridi ( $A_{11}$ ) do not yet have desulfurization units. This kind of production unit may constitute an important source of  $\text{SO}_2$  (Rodriguez and Hrbek, 1999; Tam et al., 1990). The sulfur content of the fuel produced and marketed in Côte d'Ivoire is higher than 2000 part per million (ppm) (CCAC and UNEP, 2016). This content is more than 40 times higher than the standards applied in most developed countries (50 ppm or below). There is also intensive charcoal production through biomass burning in the northwest of the city. The large rubber plantations located in this area are regularly reconverted into charcoal using traditional ovens. According to the study NAMA (Nationally Appropriate Mitigation Action) on sustainable charcoal in Côte d'Ivoire, charcoal production increased by 22 % between 2003 (400 850 t) and 2012 (488 128 t). During the same pe-

**Table 4.** Gaseous pollutants' concentrations and standard deviation (SD) at 21 sampling sites in Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016).

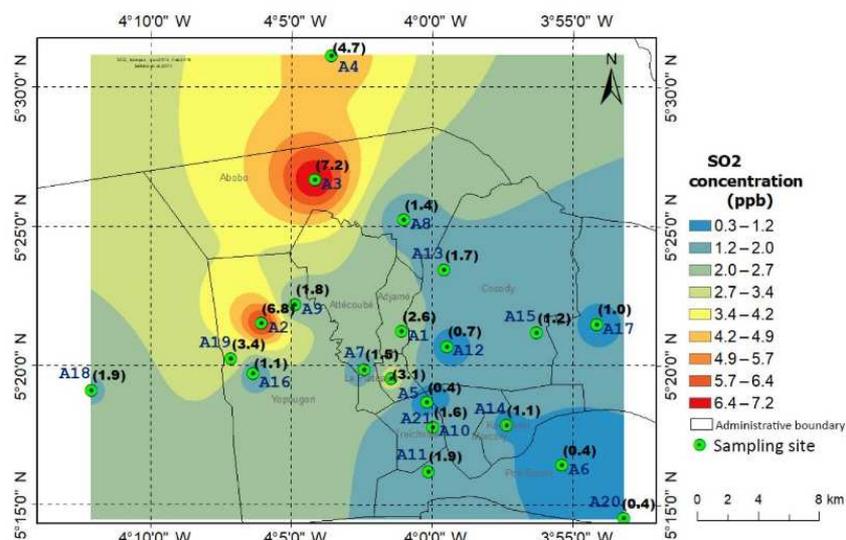
Sampling site		Concentration in ppb														
ID code	Site name	NO <sub>2</sub>			NH <sub>3</sub>			SO <sub>2</sub>			HNO <sub>3</sub>			O <sub>3</sub>		
		Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
A1	220 Lgts Liberté	13.9	30.8	20.8 ± 5.0	23.3	43.3	31.1 ± 6.1	0.9	5.4	2.6 ± 1.4	0.9	1.3	1.1 ± 0.1	10.1	12.6	11.3 ± 1.0
A2	Gesco	10.4	13.1	11.6 ± 1.0	25.1	31.6	27.6 ± 2.3	4.9	8.2	6.8 ± 1.3	0.6	0.7	0.6 ± 0.1	10.4	13.3	12.4 ± 1.0
A3	N'Dotrè	10.9	15.7	12.2 ± 1.8	20.2	28.2	23.5 ± 2.4	5.4	8.8	7.2 ± 1.2	0.3	0.5	0.4 ± 0.1	7.2	10.3	8.9 ± 0.9
A4	Corridor Anyama	7.0	8.7	7.7 ± 0.6	26.2	38.5	32.2 ± 3.8	3.8	6.0	4.7 ± 0.8	0.2	0.3	0.2 ± 0.0	4.0	5.6	5.1 ± 0.6
A5	Pharmacy Cadre Blvd	19.7	33.6	23.9 ± 4.9	19.0	26.7	23.0 ± 2.2	2.0	4.4	3.1 ± 1.1	0.6	1.9	1.1 ± 0.4	6.9	8.2	7.8 ± 0.4
A6	Airport FHB	5.3	8.0	6.9 ± 0.9	16.4	22.5	18.8 ± 1.9	0.2	0.7	0.4 ± 0.2	0.6	1.0	0.9 ± 0.1	14.0	22.4	18.8 ± 3.0
A7	Town hall Attécoubé	13.9	23.4	17.5 ± 2.9	28.2	58.8	37.0 ± 10.9	0.9	2.5	1.5 ± 0.5	0.6	1.8	1.2 ± 0.5	8.7	15.9	12.4 ± 2.0
A8	Town hall Abobo	18.0	24.6	20.4 ± 2.1	24.7	37.0	30.6 ± 3.6	0.7	2.6	1.4 ± 0.6	0.7	1.6	1.1 ± 0.3	7.4	13.3	10.5 ± 1.9
A9	Yopougon industrial area	15.7	26.7	19.9 ± 3.4	16.7	26.5	21.6 ± 2.8	0.5	2.5	1.8 ± 0.7	0.9	1.7	1.3 ± 0.2	10.9	14.8	12.2 ± 1.3
A10	Zone 3	16.2	19.7	17.7 ± 1.0	15.5	24.5	20.9 ± 2.9	0.9	2.3	1.6 ± 0.4	0.6	0.9	0.8 ± 0.1	7.0	11.6	8.8 ± 1.5
A11	Tri Postal Vridi	22.7	27.6	25.0 ± 1.7	16.9	21.8	19.6 ± 1.6	1.2	2.9	1.9 ± 0.5	0.5	1.0	0.7 ± 0.2	5.8	11.9	9.6 ± 1.9
A12	University FHB	8.4	17.3	12.5 ± 2.4	18.4	33.5	23.9 ± 5.0	0.5	0.8	0.7 ± 0.1	0.6	1.5	1.0 ± 0.4	13.4	15.1	14.1 ± 0.4
A13	Angré	15.8	22.8	18.5 ± 2.2	24.4	29.6	26.9 ± 2.4	1.5	1.9	1.7 ± 0.1	0.8	1.8	1.2 ± 0.3	9.1	16.1	12.9 ± 1.9
A14	Place Inch'allah	15.8	21.5	17.6 ± 1.9	57.6	80.5	67.7 ± 8.3	0.6	1.6	1.1 ± 0.3	0.4	0.8	0.6 ± 0.1	5.3	12.4	7.6 ± 2.4
A15	Akouédo	9.9	13.6	12.0 ± 1.4	36.9	43.3	39.1 ± 2.1	0.4	2.5	1.2 ± 0.7	0.9	1.8	1.3 ± 0.2	15.2	19.6	17.6 ± 1.9
A16	Niangon Braçodi	17.6	18.9	18.3 ± 0.6	83.9	109.4	102.1 ± 9.1	0.8	1.4	1.1 ± 0.2	1.0	1.6	1.2 ± 0.2	7.7	12.8	10.2 ± 1.4
A17	Scientific pole CNRI-UFHB	9.4	21.0	13.6 ± 3.7	16.0	31.5	22.5 ± 6.1	0.7	1.7	1.0 ± 0.3	1.0	2.0	1.4 ± 0.3	11.2	20.4	16.8 ± 3.0
A18	Songon health centre	2.5	2.9	2.7 ± 0.1	7.5	12.4	9.1 ± 1.7	1.4	2.1	1.9 ± 0.2	0.4	0.9	0.7 ± 0.2	10.1	13.7	12.1 ± 1.3
A19	Niangon Adjamé	4.9	5.7	5.4 ± 0.3	41.7	47.2	44.0 ± 2.2	2.3	4.9	3.4 ± 1.0	0.2	0.2	0.2 ± 0.0	5.4	7.8	6.8 ± 0.7
A20	Gonzagueville	6.0	7.7	6.9 ± 0.5	11.0	18.8	14.3 ± 2.6	0.3	0.5	0.4 ± 0.1	0.1	1.5	0.8 ± 0.4	15.9	21.4	19.1 ± 1.7
A21	Ecological research centre	5.1	7.4	6.0 ± 0.7	9.9	17.5	13.6 ± 2.9	0.3	0.6	0.4 ± 0.1	0.4	0.8	0.6 ± 0.2	10.9	15.3	13.6 ± 1.4

riod, firewood production increased from 8 699 979 m<sup>3</sup> to 9 034 617 m<sup>3</sup> (UNDP, 2015). Charcoal (47 %) and firewood (35 %) are the main sources of energy for households in urban areas in Côte d'Ivoire, making biomass burning a significant source of SO<sub>2</sub> (Bates et al., 1992; Andreae, 1991). The northeastern gradient could be also attributed to air masses' circulation in the dry season, with north–northeast harmattan winds shown by the wind diagram (Fig. 4).

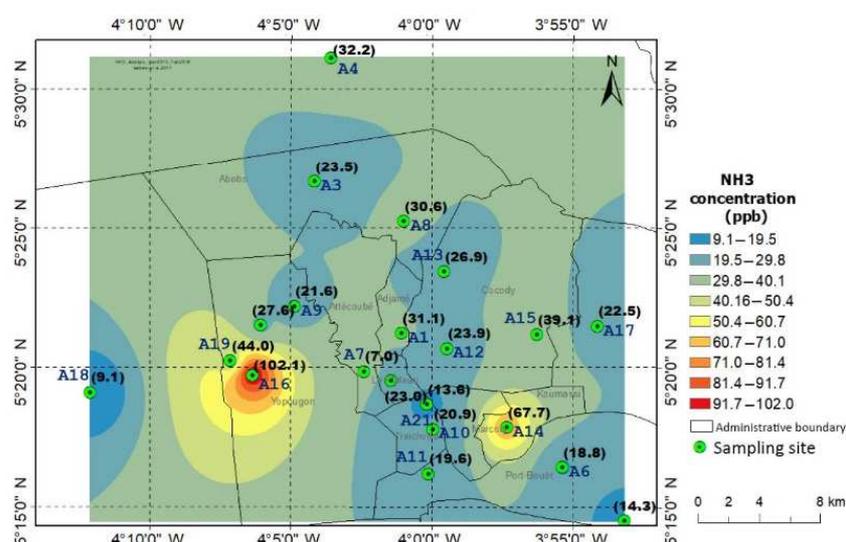
### 3.1.3 Ammonia (NH<sub>3</sub>)

The main source of NH<sub>3</sub> emissions is biomass burning including biofuel combustion, agriculture, animal husbandry, NH<sub>3</sub>-based fertilizer, industrial processes and vehicular emission (Paulot et al., 2017; Whitburn et al., 2015; Behera et al., 2013; Akagi et al., 2011). In urban areas, domestic fires, traffic and industrial activity are generally considered as major sources of NH<sub>3</sub> (Sun et al., 2017; Teng et al.,

2017; Perrino et al., 2002; Sapek, 2013; Sutton et al., 2000; Whitehead et al., 2007). In western African capitals, domestic fires and biomass burning are the main source of NH<sub>3</sub> emission (Lioussé et al., 2014; Adon et al., 2010). Anthropogenic emissions of NH<sub>3</sub> from domestic fires in Bamako (Mali) and Dakar (Senegal) have been estimated for 2005 to be  $1.6 \times 10^{-3}$  and  $7.0 \times 10^{-4}$  TgNH<sub>3</sub> yr<sup>-1</sup> respectively (Adon et al., 2016). In Abidjan, NH<sub>3</sub> concentrations were much higher compared to other gaseous pollutants. Figure 9 shows the spatial distribution of NH<sub>3</sub> in Abidjan. The domestic fires site (A<sub>16</sub>) has the highest concentration of NH<sub>3</sub> (102.1 ± 9.1 ppb). This site is a mid-term instrumented monitoring site of the DACCIWA project located near a traditional smokehouse of food products. It was selected to investigate the concentrations of pollutants emitted by domestic fires and their contributions to this source. The second most significant concentration of NH<sub>3</sub> was measured at the site A<sub>14</sub> located on the east of the city and characterized by domestic



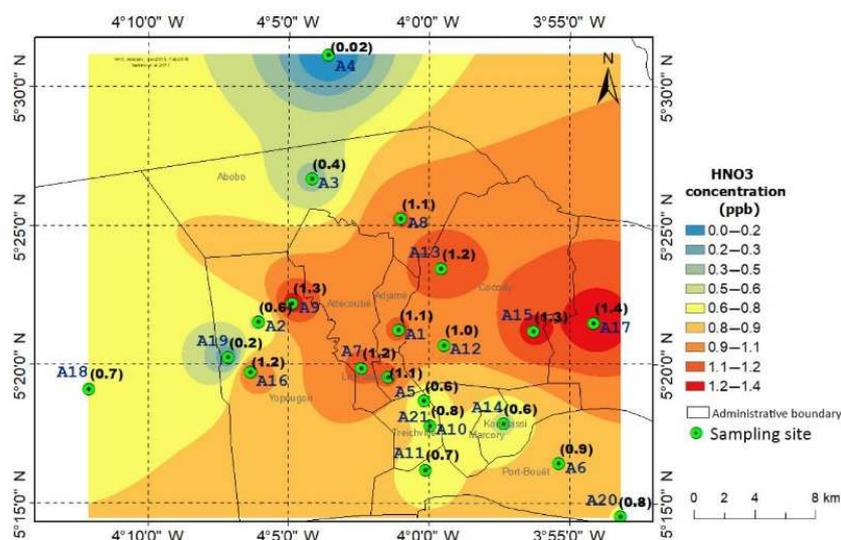
**Figure 8.** Spatial distribution of SO<sub>2</sub> in the district of Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016). Measured concentrations in ppb are in brackets.



**Figure 9.** Spatial distribution of NH<sub>3</sub> in the district of Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016). Measured concentrations in ppb are in brackets.

fires and the residential sector ( $67.7 \pm 8.3$  ppb). It should be noted that these two sites presenting very high concentrations correspond to measurements performed less than 5 m from the source of pollution. NH<sub>3</sub> concentrations at the other sites ranged from  $9.1 \pm 1.7$  to  $44.0 \pm 2.2$  ppb. High concentrations about  $36.6 \pm 4.1$  ppb are measured in the west and the north-east of the city where most of the domestic fires, residential sector and suburban sites are located. One part of the Songon municipality located in the south-west of Abidjan between

sites A<sub>18</sub> and A<sub>19</sub> regrouped a set of poultry and pig farms because of the availability of space and its rural character (Yapi-Diahou et al., 2011). Golly and Koffi-Didia (2015) showed the existence of 63 modern poultry farms and 9 modern pig farms in this area. Also, the liquid manure resulting from this breeding is one of the main sources of NH<sub>3</sub> and nitrogenous compounds' emission (Degré et al., 2001; Bouwman and Van Der Hoek, 1997). Total NH<sub>3</sub> emissions in France in 2007 were estimated at 382 kt, with 15 % of these emissions due



**Figure 10.** Spatial distribution of  $\text{HNO}_3$  in the district of Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016). Measured concentrations in ppb are in brackets.

to poultry dejections (Gac et al., 2007). In the global  $\text{NH}_3$  anthropogenic source budget, Bouwman et al. (2002) indicated that the animal excreta source represents  $21.7 \text{ Mt yr}^{-1}$  of the total  $53.6 \text{ Mt yr}^{-1}$ . In addition to breeding, this urban area combines large industrial and individual plantations of hevea and banana. These plantations often make excessive use of chemical fertilizers rich in urea, which therefore lead to ammonia emissions (Degré et al., 2001). A high  $\text{NH}_3$  concentration was also measured at the waste burning site ( $A_{15}$ ). This site is located in the village of Akouedo and classified as an uncontrolled dump site of garbage (Kouame et al., 2006). With a size of 153 ha, it has received all the vegetable, animal and industrial waste of the city of Abidjan since 1965. This huge waste is estimated at about 550 000 t per year (Kouame et al., 2006). Human waste and its management is a problem in Abidjan that can also explain the concentration levels obtained. To summarize,  $\text{NH}_3$  concentrations are very high, which can be attributed to domestic fires, as well as bacterial decomposition associated with agriculture (pig and poultry farming) and waste dumps.

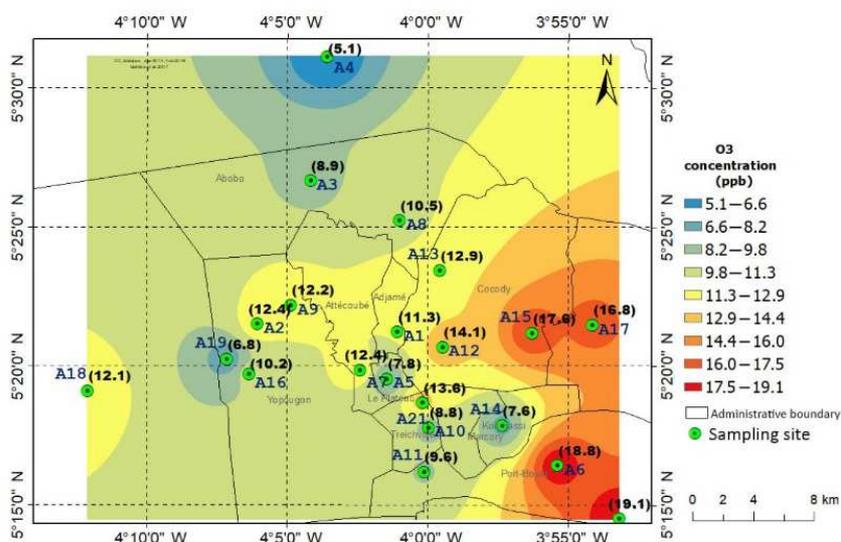
### 3.1.4 Nitric acid ( $\text{HNO}_3$ )

$\text{HNO}_3$  is believed to be a major end product in the oxidation of gaseous nitrogen compounds. It is one of the mineral acid contributors to acid rain (Cogbill and Likens, 1974). Figure 10 shows the spatial distribution of  $\text{HNO}_3$  in Abidjan during the dry season. The study of the spatial distribution of  $\text{HNO}_3$  in Abidjan showed that the concentrations ranged between  $0.2 \pm 0.0$  and  $1.4 \pm 0.3$  ppb. Approximately half of the sampling sites have concentrations between  $1.1 \pm 0.3$  and  $1.4 \pm 0.3$  ppb. These sites are mainly lo-

cated in the centre and in the west of the city. The highest concentrations of  $\text{HNO}_3$  were measured at a suburban site,  $A_{17}$  ( $1.4 \pm 0.3$  ppb), a waste burning site,  $A_{15}$ , and an industrial area,  $A_9$  ( $1.3 \pm 0.2$  ppb), a residential site,  $A_{13}$ , a domestic fires site,  $A_{16}$ , and a residential district,  $A_7$  ( $1.2 \pm 0.3$ ). Most of these sites are located in the east of the city. This could be explained by the fact that gaseous  $\text{HNO}_3$  is the result of several chemical transformation processes of  $\text{NH}_3$  and  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_2 + \text{NO}$ ) guided by the presence of oxidants such as  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$  and OH radicals (Seinfeld and Pandis, 2016; Kumar et al., 2004; Hanke et al., 2003). The prevailing SW winds can also transport the precursor pollutants from the city centre in an easterly direction, and ageing in the air masses leads to the production of  $\text{HNO}_3$  far from their source.

### 3.1.5 Ozone ( $\text{O}_3$ )

$\text{O}_3$  is often associated in urban areas with adverse effects on human health and natural environment (Hagenbjörk et al., 2017). It is well known that this secondary pollutant depends on photochemical interactions of gaseous precursors composed of nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) and volatile organic compounds (VOCs) (Duan et al., 2008; WHO, 2006). At a specific location, the level of  $\text{O}_3$  concentration depends on emission of its precursors (VOCs and  $\text{NO}_x$ ), the long-range transport of  $\text{O}_3$  and meteorological parameters (Hagenbjörk et al., 2017). Two chemical regimes are associated with the rate of ozone production, the  $\text{NO}_x$ -saturated (or VOC-limited) regime and the  $\text{NO}_x$ -limited regime. In urban areas with high  $\text{NO}_x$  concentrations ( $\text{NO}_x$ -saturated) and a low ratio of VOCs/ $\text{NO}_x$ , the ozone production rate is generally low and



**Figure 11.** Spatial distribution of O<sub>3</sub> in the district of Abidjan during the dry season (15 December 2015–16 February 2016). Measured concentrations in ppb are in brackets.

concentrations are on the order of a few ppb. In some places, high concentrations can be observed, due to the recirculation of atmospheric air mass and specific meteorological conditions. When we leave the city centre, in the peri-urban areas, we notice an increase of the VOC / NO<sub>x</sub> ratio and a high O<sub>3</sub> production because of the absence of major sources of NO<sub>x</sub>, the dilution of air mass and the presence of biogenic VOCs. We measured O<sub>3</sub> concentration at different locations in the district of Abidjan. Figure 11 shows the spatial distribution of ozone in the district of Abidjan during the dry season. Generally, we notice the presence of O<sub>3</sub> throughout the city. The levels of concentration increase considerably from the west to the east of Abidjan. The highest O<sub>3</sub> concentrations were observed in the two coastal sampling sites A<sub>6</sub> (Gonzagueville) and A<sub>20</sub> (Airport FHB) located in the southeast of the city, with 19.1 and 18.8 ppb respectively. These two sites on the eastern outskirts of the city are characterized by monthly sunshine ranging between 117 and 224 h (Messou et al., 2013) and by a high relative humidity in the air due to the presence of water vapour from the marine spray. OH radicals are the major oxidant of the atmosphere. OH directly controls the lifetime of VOCs and NO<sub>x</sub> (Sadanaga et al., 2012). It ensures the conversion of NO to NO<sub>2</sub> and is therefore responsible for the net production of ozone (Camredon and Aumont, 2007). We also measured significant concentrations at two other peri-urban sites in the east of the city: the waste burning site of the village of Akouedo (A<sub>15</sub>) and the suburban site of Bingerville (A<sub>17</sub>), with O<sub>3</sub> concentrations of 17.55 and 16.76 ppb respectively. As in the case of HNO<sub>3</sub>, the highest concentrations measured in the east of the city may be due to the ageing of precursor pollutants transported in an easterly direction by SW prevailing winds. At the traffic sites (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>,

A<sub>7</sub>, A<sub>9</sub>) located near the Banco forest, ozone concentration was found to be between 11.3 and 12.9 ppb. The lowest O<sub>3</sub> concentration in Abidjan was measured in the north of the city at the site A<sub>4</sub> (5.09 ppb).

### 3.2 Mean gaseous concentrations of the main anthropogenic activities in Abidjan and comparison with other cities of developing countries

The study of the spatial distribution of gaseous pollutants in Abidjan reveals different anthropogenic contributions to the measured levels of pollution. Therefore, we have tried to investigate the relation between the concentration levels measured for each primary pollutant (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) and the potential emission of each anthropogenic activity. Sampling sites were grouped by the activity sectors' source of pollution. Six different groups were formed. The main activities' sources of pollution have been identified in Sect. 3.1 to be traffic, industrial, residential, domestic fires, waste burning and suburban. We calculated the mean concentration of each gaseous pollutant associated with each sector (Fig. 12).

#### 3.2.1 Average concentration of primary gaseous pollutants associated with anthropogenic activities

##### Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>)

The analysis shows that the industrial sector and traffic mainly explain the highest measured NO<sub>2</sub> concentrations, with an average concentration of  $20.9 \pm 2.8$  and  $17.8 \pm 4.7$  ppb respectively. However, domestic fires and res-

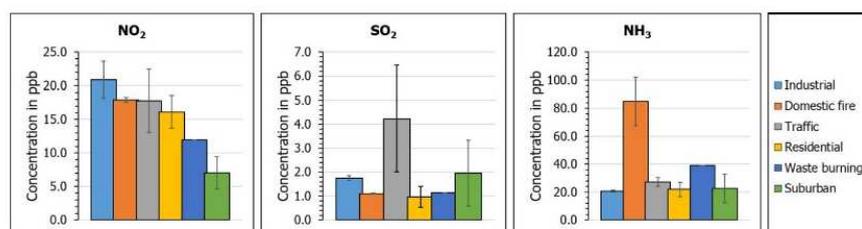


Figure 12. Concentration of gaseous pollutants by anthropogenic sectors of activity in the district of Abidjan.

idential sites present very comparable levels of NO<sub>2</sub> concentrations of  $17.9 \pm 0.3$  and  $16.1 \pm 2.4$  ppb respectively compared to industrial and traffic sites. It should be noted that residential and domestic fires sites are strongly influenced by road traffic in Abidjan. The identified residential and domestic fires sites are never more than 10 m far from roadways. This could explain the near-similar concentration levels observed between traffic, domestic fires and residential sites. Waste burning ( $12.0 \pm 0.0$  ppb) and suburban ( $7 \pm 2.4$  ppb) sites present lower concentrations of NO<sub>2</sub>. Nevertheless, these concentrations are not negligible and can be due, on the one hand, to the limited traffic of the garbage collection vehicles and also on the other hand to the circulation of minibuses called “gbaka”, which connect the city centre to the suburbs.

#### Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>)

The road traffic sector is the main contributor to the SO<sub>2</sub> pollution levels measured in Abidjan ( $4.2 \pm 2.2$  ppb). This result seems to be a good indicator of the quality of fuels used in Abidjan. In countries without stringent fuel policies such as Côte d'Ivoire, diesel sulphur content is generally significant. The average concentration of SO<sub>2</sub> in suburban and industrial sites is  $2.0 \pm 1.4$  and  $1.7 \pm 0.1$  ppb, respectively.

#### Ammonia (NH<sub>3</sub>)

NH<sub>3</sub> concentrations are significantly higher at domestic fires sites, with an average concentration 2 to 4 times higher than for other sites ( $84.9 \pm 17.2$  ppb). This very high value highlights the use of biomass burning (firewood and charcoal) as a source of energy by most households of Abidjan. The high standard deviation is due to the location of two of the domestic fires sites near the source, while the other domestic fires sites are much further away from the source. The other groups of sites representative of waste burning (39.1 ppb) and traffic sources ( $27.2 \pm 3.1$  ppb) present NH<sub>3</sub> concentrations lower than 40 ppb. Peri-urban agriculture and intensive livestock in the Abidjan suburbs are mainly responsible for the suburban areas' NH<sub>3</sub> concentration ( $22.6 \pm 10.3$  ppb). This value is close to concentrations measured at residential ( $21.9 \pm 5.2$  ppb) and industrial ( $20.7 \pm 0.7$  ppb) sites. Ammonia concentrations measured in Abidjan are very high compared to the concentrations measured in rural African

environments, where concentrations range from 1 to 9 ppb (Adon et al., 2010; Carmichael et al., 2003; Fattore et al., 2014; Martins et al., 2007), and are similar to concentrations found near agriculture sources.

#### 3.2.2 Average concentrations of gases compared with other urban sites

In order to contextualize the gaseous pollution measured in Abidjan in a subregional and international context, in Table 5 we have listed some experimental studies using passive samplers to obtain a comparable measurement technique and also comparable temporal integration. Table 5 presents a comparison between gas concentrations measured in Abidjan with literature data, with a focus on primary pollutants (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub>)

##### Traffic and urban sites

The average concentration of NO<sub>2</sub> in Abidjan (17.8 ppb) is more than 3 times higher than that measured in St John's in India (4.8 ppb) (Kumar et al., 2004). This concentration in Abidjan is comparable to those measured in Bamako (16.2 ppb) and Shenzhen (20.7 ppb) reported by Adon et al. (2016) and Xia et al. (2017). However, it remains lower than the concentrations obtained in Dakar (31.7 ppb) and Al Ain in the Middle East (31.5 ppb) and reported respectively by Adon et al. (2016) and Salem et al. (2009).

The average concentration of NH<sub>3</sub> measured at the Abidjan traffic site (27.2 ppb) in this study is higher than those obtained in Dakar (21.1 ppb), Al Ain (17.1 ppb) and St John's (9.5 ppb), respectively reported by Adon et al. (2016), Salem et al. (2009) and Kumar et al. (2004). Adon et al. (2016) also reported a concentration of NH<sub>3</sub> in Bamako (46.7 ppb) 2 times higher than that obtained in Abidjan.

The average SO<sub>2</sub> concentrations at the traffic and urban sites range from 1.56 to 15.9 ppb. In comparison with the Abidjan traffic site (4.2 ppb), the average SO<sub>2</sub> concentrations in Bamako (3.6 ppb) and St John's (1.56 ppb) are much lower. The concentration of SO<sub>2</sub> in Abidjan is comparable to those measured at the polluted urban sites of Shenzhen (4.9 ppb) in China and Al Ain (5.8 ppb) in the United Arab Emirates. The SO<sub>2</sub> level in Dakar is the highest, with a concentration of 15.9 ppb (Adon et al., 2016).

**Table 5.** Gaseous pollutants' concentrations (ppb) at different sites of Abidjan and in other cities of developing countries.

Sites	Type	Period	NO <sub>2</sub> (ppb)	NH <sub>3</sub> (ppb)	SO <sub>2</sub> (ppb)	References
Abidjan, Côte d'Ivoire	Traffic	Dec 2015–Feb 2016	17.8	27.2	4.2	This study
	Suburban	Dec 2015–Feb 2016	7.0	22.6	2.0	This study
Dakar, Senegal	Traffic	Jan 2008–Dec 2009	31.7	21.1	15.9	Adon et al. (2016)
Bamako, Mali	Traffic	Jun 2008–Dec 2009	16.2	46.7	3.6	Adon et al. (2016)
Cairo, Egypt	Suburban	Winter of 2009–2010	35.5	50.9	13.0	Hassan et al. (2013)
Amersfoort, SA*	Suburban, industrialized	Aug 2007–Jul 2008	2.9	–	5.5	Lourens et al. (2011)
Amersfoort, SA*	Suburban, industrialized	1995–2005	2.5	1.2	2.8	Martins et al. (2007)
Singapore	Urban	Sept 2007–Aug 2008	23.8–28.1	–	12.5–14.9	He et al. (2014)
Al Ain, UAE**	Traffic	Feb 2005–Feb 2006	31.5	17.1	5.8	Salem et al. (2009)
Shenzhen, China	Urban	Mar 2013–Feb 2014	20.7	–	4.9	Xia et al. (2016)
St. John's, India	Urban	Jul 1999–Jun 2001	4.8	9.5	1.56	Kumar et al. (2004)

\* SA: South Africa. \*\* UAE: United Arab Emirates.

It highlights significant differences in the sources of gaseous pollutants and their level of concentrations in western African and other African cities and those in developing countries.

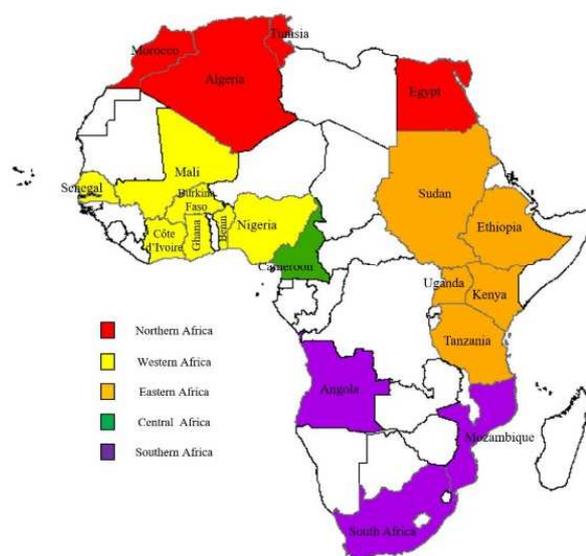
### Suburban sites

The average concentration of NO<sub>2</sub> at the Abidjan suburban site (7 ppb) is more than 2 times higher in comparison with that measured at the Amersfoort suburban site (2.5 and 2.9 ppb), respectively reported by Martins et al. (2007) and Lourens et al. (2011). The concentrations of SO<sub>2</sub> in Abidjan (2.2 ppb) are lower than those measured at Amersfoort suburban site in South Africa (2.8–5.5 ppb). The concentration of NH<sub>3</sub> in Abidjan is the highest, at 22.6 ppb.

### 3.3 Overview of urban NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> monitoring studies in African cities

Air quality monitoring networks are very important in assessing the health risk associated with exposure to gaseous pollutants. They also help governments to take measures of mitigation of the levels of pollutant concentrations and to define air quality indices adapted to each country. If some synthesis of air quality measurements for particulate matter concentrations exists in the literature at the scale of Africa (Petkova et al., 2013), there is no overview for gaseous pollutants. Nowadays, it is quite difficult to provide an overview of air quality results for gaseous pollution over Africa because of the availability of only some non-perennial studies carried out within the framework of scientific research programs. The available results are also not always communicated publicly or found in the literature. As this study shows, one of the main gaseous sources of air pollution in African cities is traffic roads emitting NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>.

This section aims to report the main studies on NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> conducted at different timescales (hourly, daily, weekly,



**Figure 13.** African countries coloured by UN subregion for which NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> studies were identified and included in this publication.

monthly and annually) in African urban and industrial environments. This is the result of literature searches based on studies conducted in Africa between 2005 and 2017. Publications in which methodology or data reports were clearly described were selected and listed in Tables S3 and S4 respectively for NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>. Recent and unpublished studies have also been presented for comparison. Figure 13 presents the African countries, coloured by UN subregion, for which NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> monitoring studies were identified and included in this work.

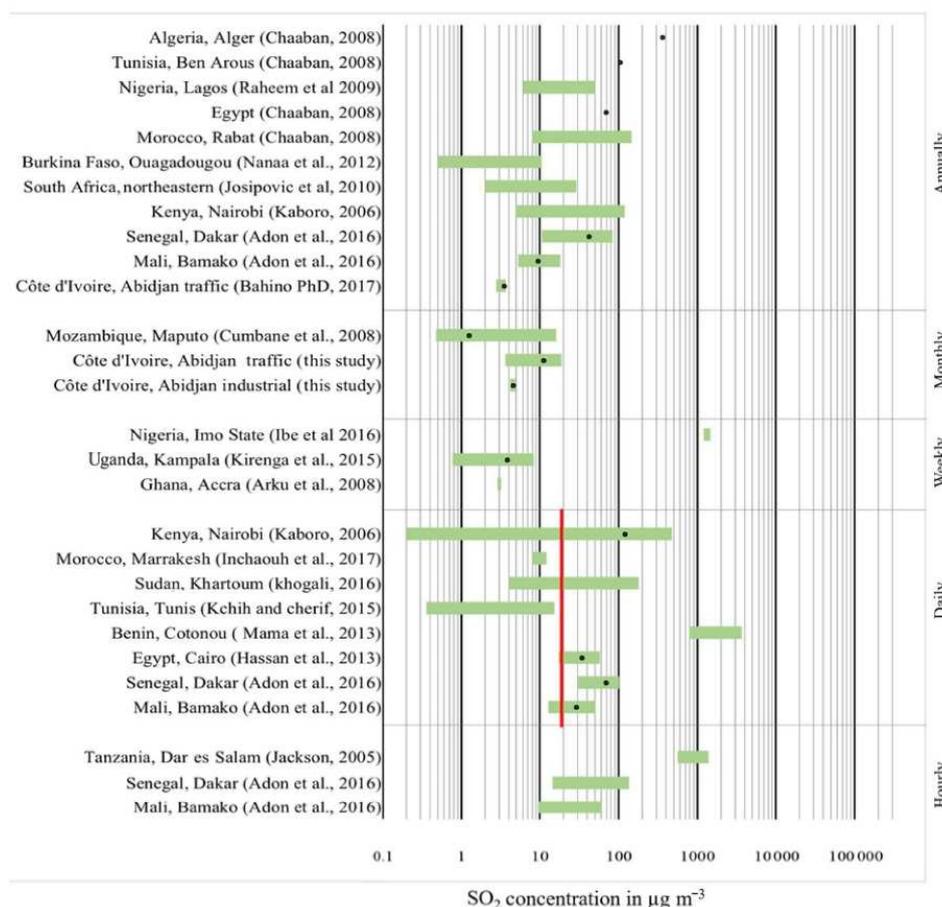


**Figure 14.** NO<sub>2</sub> concentration levels in µg m<sup>-3</sup> in African capitals at different timescales (hourly, daily, weekly, monthly and annually) as reported in literature. Green bars represent lower and upper range of means if reported. Black points represent average concentration of NO<sub>2</sub>. Red vertical lines illustrate current WHO guidelines at different timescales.

We found NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> measurements conducted in at least 20 African countries. Most of those measurements were located in seven western African countries (Senegal, Mali, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Nigeria, Ghana and Benin) and in five eastern African countries (Sudan, Kenya, Ethiopia, Uganda and Tanzania). Studies were also identified for four countries (Algeria, Tunisia, Morocco and Egypt) in northern Africa and three countries (South Africa, Angola and Mozambique) in southern Africa. Only one study was identified in central Africa (Cameroon). To compare the levels of gaseous concentration in Africa with WHO air quality guidelines, we present the concentration level of each pollutant for each country using the mean, the minimum and the

maximum values when available. Figures 14 and 15 represent NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> levels in African cities as reported in the various studies. Daily or hourly routine NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> do not exist in most of the African cities. In most of the studies we found, monitoring campaigns were carried out with different methods (passive sampling, real time analysers or satellites) and over short periods. Thus, only few studies allow the comparison with WHO standards.

Nevertheless, this section represents, to the best of our knowledge, the state of the art of urban NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> concentrations measured in African cities and leads to a contextualization of our results in Abidjan.



**Figure 15.** SO<sub>2</sub> concentration levels in µg m<sup>-3</sup> in African capitals at different timescales (hourly, daily, weekly, monthly and annually) as reported in literature. Green bars represent lower and upper range of means if reported. Black points represent average concentration of SO<sub>2</sub>. Red vertical lines illustrate current WHO guidelines at different timescales.

### 3.3.1 Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>)

Short time exposure (1 h) at a concentration of 200 µg m<sup>-3</sup> of NO<sub>2</sub> is toxic and has significant health effects. The three studies at this timescale performed by Jackson (2005) in Tanzania and Adon et al. (2016) in Senegal and Mali show that hourly NO<sub>2</sub> concentration range from 18 to 53 µg m<sup>-3</sup>, 9.4 to 150 µg m<sup>-3</sup> and 15.8 to 135 µg m<sup>-3</sup> in Dar es Salam, Dakar and Bamako respectively (Fig. 14). These levels of concentration are below the WHO threshold.

The WHO air quality guideline value for annual exposure to NO<sub>2</sub> concentration is 40 µg m<sup>-3</sup>. Seven studies were carried out during at least 1 year in Dakar (Senegal), Ouagadougou (Burkina Faso), Bamako (Mali), Abidjan (Côte d'Ivoire), South Africa and Ben Arous (Tunisia) (Julien Bahino, personal communication, 2017; Chaaban, 2008; Demay et al., 2011; Josipovic et al., 2010; Nanaa et al., 2012).

The average annual concentrations of NO<sub>2</sub> in Ben Arous, Tunisia (178 µg m<sup>-3</sup>), and in Dakar, Senegal (59.6 µg m<sup>-3</sup>), exceed the WHO threshold value (40 µg m<sup>-3</sup>). Annual average concentrations measured in Dakar, Ouagadougou and South Africa are lower and ranged from 3.5 to 19.6 µg m<sup>-3</sup>, 22 to 27 µg m<sup>-3</sup> and 2 to 7 µg m<sup>-3</sup> respectively.

Almost 19 studies were conducted at daily, weekly and monthly scales. Eight studies were conducted on a daily basis. Average 24 h concentrations ranged from 0.1 µg m<sup>-3</sup> along Juja Road in Nairobi (Kaboro, 2006) to 752 µg m<sup>-3</sup> on the traffic site of Dantokpa market in Cotonou (Mama et al., 2013). Only three studies measuring NO<sub>2</sub> on a weekly scale were identified. The maximum concentration (1015.34 µg m<sup>-3</sup>) was measured in the city of Oweri, the capital of the oil-rich region of Imo State in Nigeria (Ibe et al., 2016). Except this extreme value, concentrations range

from  $9.32 \mu\text{g m}^{-3}$  in urban sites of Kampala (Uganda) to  $60 \mu\text{g m}^{-3}$  in low-income areas of Accra (Ghana).

Average monthly concentration ranges from 2.6 to  $87.2 \mu\text{g m}^{-3}$  for eight studied sites. The lowest values were measured in Maputo (Mozambique) in a residential site and in a green area. The monthly average concentration in Maputo is  $9.13 \mu\text{g m}^{-3}$  and varies between 2.6 and  $21 \mu\text{g m}^{-3}$  (Cumbane et al., 2008). The highest monthly average concentration of  $\text{NO}_2$  was measured in Bamako.

In our study, concentrations measured at traffic and industrial sites in Abidjan ( $33.5$  and  $39.3 \mu\text{g m}^{-3}$  respectively) are of the same order of magnitude as the values obtained by Lioussé and Galy-Lacaux (2010) at urban sites in Abidjan ( $29.8 \mu\text{g m}^{-3}$ ) and Yaoundé ( $33.3 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Similarly, annual  $\text{NO}_2$  concentrations measured in Abidjan (Bahino, 2017) in the DACCIWA mid-term experiment (2015–2017) present values about  $25 \mu\text{g m}^{-3}$  for the traffic site ( $A_1$ ) that are in the same range of other African capitals studied. However, the table emphasizes the lack of  $\text{NO}_2$  measurements in Abidjan at hourly and annual scales allowing the comparison with WHO thresholds. It would therefore be wise for public authorities in Abidjan as well as in other African cities to carry out regular studies at comparable timescales and with recommended methods to obtain reliable results.

### 3.3.2 Sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ )

WHO indicates that changes in pulmonary function and respiratory symptoms appear after a 10 min exposure period to  $\text{SO}_2$  at a concentration of  $500 \mu\text{g m}^{-3}$ . No study carried out with a minimum time interval of 10 min was reported in the literature.

Twenty-four hour  $\text{SO}_2$  levels are significantly associated with daily mortality rates (Burnett et al., 2004). The WHO 24 h guideline for  $\text{SO}_2$  is  $20 \mu\text{g m}^{-3}$ . Nine daily (24 h) studies are reported in Fig. 14. Measurements in Cotonou (Benin) have been performed at the crossroads of Dantokpa market, characterized by a large circulation of two-wheeled vehicles. Daily average concentrations range between 784.8 and  $3662.4 \mu\text{g m}^{-3}$  (Mama et al., 2013). These concentrations are 39 to 183 times higher than the threshold value. In Dakar ( $68.54 \mu\text{g m}^{-3}$ ), Cairo ( $34 \mu\text{g m}^{-3}$ ) and Bamako ( $29.03 \mu\text{g m}^{-3}$ ),  $\text{SO}_2$  mean daily concentrations are greater than  $20 \mu\text{g m}^{-3}$ . It is found that only two studies conducted in Marrakesh (Morocco) and Tunis (Tunisia) have concentration ranges lower than the threshold. In Nairobi and Khartoum the maximum concentration can reach and exceed the threshold.

Hourly  $\text{SO}_2$  concentration in African cities ranges from 9.14 to  $1385 \mu\text{g m}^{-3}$ . In western Africa (Mali and Burkina), concentrations are much lower ( $9$ – $136 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

Approximately six studies report weekly and monthly concentrations of  $\text{SO}_2$  (Fig. 14). Generally, weekly and monthly  $\text{SO}_2$  concentrations in Africa range from 0.77 to  $18.9 \mu\text{g m}^{-3}$ . The weekly concentrations measured in the oil-

rich region of Imo State (Nigeria) are not in this range ( $1203$  to  $1465 \mu\text{g m}^{-3}$ ) (Ibe et al., 2016).

The annual average concentrations of  $\text{SO}_2$  are reported for 11 studies. The concentrations measured in northern Africa are the highest. Average levels of  $\text{SO}_2$  range between  $8 \mu\text{g m}^{-3}$  in Rabat (Morocco) and  $325 \mu\text{g m}^{-3}$  in Alger (Algeria). In western Africa, concentrations are lower and range from  $0.5 \mu\text{g m}^{-3}$  in Ouagadougou (Burkina Faso) to  $80 \mu\text{g m}^{-3}$  in Dakar (Senegal). The annual average  $\text{SO}_2$  concentration in Abidjan ( $3.66 \mu\text{g m}^{-3}$ ) is one of the lowest of western African cities reported in this study (Julien Bahino, personal communication, 2017). Measurements of  $\text{SO}_2$  at smaller timescales (i.e. 10 min, 24 h) do not exist in Abidjan or are not published. As for  $\text{NO}_2$ , studies should be carried out regularly and according to WHO standards.

Air pollution from human activities has been a long-standing environmental issue. Human activities have led to an unprecedented increase in atmospheric abundance of key air pollutants. High concentrations of ozone and PM adversely impact human health by increasing the risk of a variety of diseases. The high concentrations of gaseous pollutants measured in Abidjan could be responsible for respiratory diseases, which could result in significant costs to human health and the economic capacity of the local workforce. Environmental changes, including air pollution, have already significantly increased the burden of cancer in western Africa in recent years (Val et al. 2013). Premature death in the world in 2010, resultant of air pollution, leads, according to the World Health Organisation, to a combined estimate of more than 7 million premature deaths.

In addition to health impacts, anthropogenic pollutants that react with biogenic emissions can also lead to increased ozone and acid production outside urban areas (Marais et al., 2014), with adverse effects on precipitation and cloudiness that can affect animals, land area, ecosystems and crops and affect many other important socio-economic factors. The worldwide economic loss associated with these crop losses is estimated to represent an economic value of USD 14–26 billion for the year 2000 (van Dingenen et al., 2009).

Data provided by this kind of study can help as follows:

- to study the expected changes in future air quality in response of various forcings such as changes in the emissions due to urbanization and industrialization, and climate change;
- to estimate the immediate impacts (e.g. human health effects, crop damage) and long-term effects (e.g. chronic health impacts, deposition on the biosphere, climate impacts) of air pollution (Knippertrtz et al., 2015).

#### 4 Conclusion and recommendations

Abidjan is the economic capital of the western African sub-region. The new urban master plan of the city foresees its extension and the construction of many types of infrastructure, which will certainly increase environmental and sanitary problems.

The present study reports the gaseous concentrations' measurements using passive samplers performed during an intensive experimental field campaign in the framework of the Work Package 2 of the European DACCIWA project. This work presents an original database of bi-monthly gaseous concentrations ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ) in the district of Abidjan measured at 21 representative sites. This database allows the levels of gaseous concentration to be characterized and a spatial distribution of gaseous pollution at the scale of the city during the dry season (15 December 2015 to 16 February 2016) to be presented for the first time.

Our results show that there is a great spatial variability of gaseous pollutants in Abidjan. The average concentrations of the main gaseous pollutants range from 2.7 to 25 ppb for  $\text{NO}_2$ , 9.1 to 102.1 ppb for  $\text{NH}_3$ , 0.2 to 1.4 ppb for  $\text{HNO}_3$ , 0.4 to 7.21 ppb for  $\text{SO}_2$  and 5.1 to 19.1 ppb for  $\text{O}_3$ .

The spatial distribution of gaseous pollutants has been studied according to the main potential sources of pollution nearby the measurement sites. Results show that the concentration level of gaseous pollutants such as  $\text{NH}_3$  and  $\text{NO}_2$  is very significant at some sites. On the one hand, it highlights the predominance of the domestic fires source with the use of wood and charcoal that emits a large amount of  $\text{NH}_3$ . On the other hand, it shows the significant impact of traffic roads on  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  emissions.

The average gas concentrations per source of pollution, showed that industrial (20.9 ppb), domestic fires (17.9 ppb) and traffic (17.8 ppb) sites mainly contribute to  $\text{NO}_2$  pollution. Concerning  $\text{NH}_3$ , domestic fires and waste burning sites constitute by far the main sources of pollution, with an average concentration of 84.9 and 39.1 ppb respectively. In addition to the high concentration of  $\text{NO}_2$ , the traffic sites also have the highest  $\text{SO}_2$  average concentration (4.2 ppb).

In this study, for the first time we propose an overview of gaseous  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  pollutants, which allows a global picture of gas concentrations to be given at the scale of several African cities. It includes 22 publications on  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  measurements conducted in 20 African countries during the period 2005–2017. This study indicates that gaseous pollution in Abidjan is comparable to other western and central African cities and also emphasizes the lack of air quality monitoring networks. Only a few studies carried out by research teams within the framework of scientific programs with various objectives give an idea of the state of air quality. These studies used different methods and timescales that do not allow comparison with WHO standards and threshold values. The comparable studies show that the hourly concen-

tration of  $\text{NO}_2$  in African cities ( $9.4\text{--}135\ \mu\text{g m}^{-3}$ ) is lower than the WHO standards. Abidjan annual  $\text{NO}_2$  concentration is  $23.25\ \mu\text{g m}^{-3}$ , with a range on the scale of African cities from 2 to  $175\ \mu\text{g m}^{-3}$ . Annual  $\text{NO}_2$  WHO standards are exceeded in Dakar and Tunis. The daily concentration of  $\text{SO}_2$  in African cities ranges from 0.2 to  $3662\ \mu\text{g m}^{-3}$  and exceeds the daily  $\text{SO}_2$  WHO standard ( $40\ \mu\text{g m}^{-3}$ ) in most of the African cities, except in Marrakesh and Tunis.

These scarce datasets should draw the attention of African public authorities to the urgent need of measuring  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  emissions. The results indicate the need of other studies including VOCs and  $\text{NO}_x$  measurements to better understand the production processes of secondary pollutants such as  $\text{O}_3$ . In the framework of the DACCIWA WP2 (Air Pollution and Health) program, bi-monthly measurements have been ongoing since December 2014 over three supersites. These measurements will make it possible to estimate the impact of pollutants' concentrations on the population's health through the calculation of real dose–response functions. To guarantee the continuity of the work done in the DACCIWA Work Package 2 and to produce health risk maps for the different combustion sources specific to western Africa based on modelling, the university Félix Houphouët-Boigny of Abidjan will manage a new project called PASMU (Pollution de l'Air et Santé en Milieu Urbain), starting in 2018. All the results presented in this work will help in the development of new projects and will serve to develop the experimental strategy of such a network. In addition, meteorological parameters will be included to finally lead to modelling studies to predict air quality for Africa on regional to urban scales.

*Data availability.* The pollution data used in this study are original and are publicly available in Table S2 in the Supplement.

**The Supplement related to this article is available online at <https://doi.org/10.5194/acp-18-5173-2018-supplement>.**

*Competing interests.* The authors declare that they have no conflict of interest.

*Special issue statement.* This article is part of the special issue “Results of the project “Dynamics-aerosol-chemistry-cloud interactions in West Africa” (DACCIWA) (ACP/AMT inter-journal SI)”. It is not associated with a conference.

*Acknowledgements.* This work has received funding from the European Union 7th Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement no. 603502 (EU project DACCIWA: Dynamics-aerosol-chemistry-cloud interactions in West Africa).

The authors wish also to thank the AMRUGE-CI project (Appui à la Modernisation et à la Réforme des Universités et Grandes Ecoles de Côte d'Ivoire).

Edited by: Mathew Evans

Reviewed by: two anonymous referees

## References

- Abera, K.: Air Pollution in Ethiopia: Indoor Air Pollution in a rural Butajira and Traffic Air Pollution in Addis Ababa, School of Public Health Medical Faculty Addis Ababa University, Addis Ababa, June, available at: <http://etd.aau.edu.et/bitstream/123456789/6847/1/8.AberaKumic.pdf> (last access: 2 March 2018), 2009.
- Adon, M., Galy-Lacaux, C., Yoboué, V., Delon, C., Lacaux, J. P., Castera, P., Gardrat, E., Pienaar, J., Al Ourabi, H., Laouali, D., Diop, B., Sigha-Nkamdjou, L., Akpo, A., Tathy, J. P., Lavenu, F., and Mougín, E.: Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7467–7487, <https://doi.org/10.5194/acp-10-7467-2010>, 2010.
- Adon, M., Yoboué, V., Galy-Lacaux, C., Liousse, C., Diop, B., Doumbia, E. H. T., Gardrat, E., Ndiaye, S. A., and Jarnot, C.: 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 environments, *Atmos. Environ.*, 135, 31–40, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.050>, 2016.
- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., Reid, J. S., Karl, T., Crouse, J. D., and Wennberg, P. O.: Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 4039–4072, <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>, 2011.
- Andreae, M. O.: Biomass burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate, *Glob. Biomass Burn. Atmospheric Clim. Biospheric Implic.*, 3–21, 1991.
- Arku, R. E., Vallarino, J., Dionisio, K. L., Willis, R., Choi, H., Wilson, J. G., Hemphill, C., Agyei-Mensah, S., Spengler, J. D., and Ezzati, M.: Characterizing air pollution in two low-income neighborhoods in Accra, Ghana, *Sci. Total Environ.*, 402, 217–231, 2008.
- Bates, T. S., Lamb, B. K., Guenther, A., Dignon, J., and Stoiber, R. E.: Sulfur emissions to the atmosphere from natural sources, *J. Atmos. Chem.*, 14, 315–337, 1992.
- Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., and Balasubramanian, R.: Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20, 8092–8131, <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>, 2013.
- Bouwman, A. F. and Van Der Hoek, K. W.: Scenarios of animal waste production and fertilizer use and associated ammonia emission for the developing countries, *Atmos. Environ.*, 31, 4095–4102, 1997.
- Bouwman, A. F., Boumans, L. J. M., and Batjes, N. H.: Estimation of global NH<sub>3</sub> volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands, *Global Biogeochem. Cy.*, 16, 1024, <https://doi.org/10.1029/2000GB001389>, 2002.
- Brook, R. D., Franklin, B., Cascio, W., Hong, Y. L., Howard, G., Lipsett, M., Luepker, R., Mittleman, M., Samet, J., Smith, S. C., and Tager, I.: Air pollution and cardiovascular disease – A statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American Heart Association, *Circulation*, 109, 2655–2671, <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8>, 2004.
- Burnett, R. T., Stieb, D., Brook, J. R., Cakmak, S., Dales, R., Raizenne, M., Vincent, R., and Dann, T.: Associations between short-term changes in nitrogen dioxide and mortality in Canadian cities, *Arch. Environ. Health*, 59, 228–236, <https://doi.org/10.3200/AEOH.59.5.228-236>, 2004.
- Camredon, M. and Aumont, B.: L'ozone troposphérique?: production/consommation et régimes chimiques, *Pollut. Atmos.*, 193, 51–60, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmosphérique.1404>, 2007.
- Cape, J. N.: The Use of Passive Diffusion Tubes for Measuring Concentrations of Nitrogen Dioxide in Air, *Crit. Rev. Anal. Chem.*, 39, 289–310, <https://doi.org/10.1080/10408340903001375>, 2009.
- Carmichael, G. R., Ferm, M., Thongboonchoo, N., Woo, J. H., Chan, L. Y., Murano, K., Viet, P. H., Mossberg, C., Bala, R., Boonjawat, J., Upatum, P., Mohan, M., Adhikary, S. P., Shrestha, A. B., Pienaar, J. J., Brunke, E. B., Chen, T., Jie, T., Guoan, D., Peng, L. C., Dhiharto, S., Harjanto, H., Jose, A. M., Kimani, W., Kirouane, A., Lacaux, J. P., Richard, S., Barturen, O., Cerda, J. C., Athayde, A., Tavares, T., Cotrina, J. S., and Bilici, E.: Measurements of sulfur dioxide, ozone and ammonia concentrations in Asia, Africa, and South America using passive samplers, *Atmos. Environ.*, 37, 1293–1308, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01009-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01009-9), 2003.
- CCAC and UNEP: Cleaning up the global on road-diesel fleet: A global strategy to introduce low-sulfur fuel and cleaner diesel vehicles, available at: <https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewia0Kn3pbPVAhVJQBOKHQw9A3UQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ccacoalition.org%2Fru%2Ffile%2F2277%2Fdownload%3Ftoken%3DrRkxI5PN&usq=AFQjCNFP6dg9NtwghPscdhA67v-jTaXXuw> (last access: 31 July 2017), 2016.
- Chaaban, F. B.: Air quality, *Arab Environ. Future Chall.*, 1, 45–62, 2008.
- Chai, T. and Draxler, R. R.: Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1247–1250, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>, 2014.
- Cogbill, C. V. and Likens, G. E.: Acid precipitation in the northeastern United States, *Water Resour. Res.*, 10, 1133–1137, <https://doi.org/10.1029/WR010i006p01133>, 1974.
- Conradie, E. H., Van Zyl, P. G., Pienaar, J. J., Beukes, J. P., Galy-Lacaux, C., Venter, A. D., and Mkhathshwa, G. V.: The chemical composition and fluxes of atmospheric wet deposition at four sites in South Africa, *Atmos. Environ.*, 146, 113–131, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.033>, 2016.
- Country Economy: Ivory Coast GDP – Gross Domestic Product 2016, [countryeconomy.com](https://countryeconomy.com/gdp/ivory-coast), available at: <https://countryeconomy.com/gdp/ivory-coast> (last access: 11 April 2018), 2016.

- Cox, R. M.: The use of passive sampling to monitor forest exposure to O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>: a review and some case studies, *Environ. Pollut.*, 126, 301–311, 2003.
- Cruz, L. P. S., Campos, V. P., Silva, A. M. C., and Tavares, T. M.: A field evaluation of a SO<sub>2</sub> passive sampler in tropical industrial and urban air, *Atmos. Environ.*, 38, 6425–6429, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.07.022>, 2004.
- Cumbane, J. J., Naran, A. U., Queface, A. J., Uthui, R. J., Liljeberg, M., Ferm, M., Iverfeldt, A., João, L. M., Macamo, A. J., and Magaia, S. J.: Rapid Urban Air Quality Assessment (RUA): A Cost-effective Tool for Air Quality Management in Less Developed Countries, available at: [https://www.academia.edu/15709522/Rapid\\_Urban\\_Air\\_Quality\\_Assessment\\_RUA\\_A\\_Cost-effective\\_Tool\\_for\\_Air\\_Quality\\_Management\\_in\\_Less\\_Developed\\_Countries?auto=download](https://www.academia.edu/15709522/Rapid_Urban_Air_Quality_Assessment_RUA_A_Cost-effective_Tool_for_Air_Quality_Management_in_Less_Developed_Countries?auto=download) (last access: 11 April 2018), 2008.
- Degré, A., Verhève, D., and Debouche, C.: Emissions gazeuses en élevage porcin et modes de réduction?: revue bibliographique, *Biotechnol. Agron. Société Environ.*, 5, 135–143, 2001.
- Demay, C., Richard, Y., and Diop, M.: La pollution de l'air à Dakar, Univ. Bourgogne, available at: [http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses\\_master/2011/Demay\\_2011.pdf](http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses_master/2011/Demay_2011.pdf) (last access: 2 March 2018), 2011.
- Denis, E. and Moriconi-Ebrard, F.: La croissance urbaine en Afrique de l'Ouest, *Chron. CEPED*, 57, 1–5, 2009.
- Duan, J., Tan, J., Yang, L., Wu, S., and Hao, J.: Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing, *Atmos. Res.*, 88, 25–35, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.09.004>, 2008.
- Fattore, F., Bertolini, T., Materia, S., Gualdi, S., Thongo M'Bou, A., Nicolini, G., Valentini, R., De Grandcourt, A., Tedesco, D., and Castaldi, S.: Seasonal trends of dry and bulk concentration of nitrogen compounds over a rain forest in Ghana, *Biogeosciences*, 11, 3069–3081, <https://doi.org/10.5194/bg-11-3069-2014>, 2014.
- Ferm, M.: A Sensitive Diffusional Sampler, Swedish Environmental Research Institute, Sweden, available at: <https://books.google.fr/books?id=cmZgMgAACAAJ> (last access: 2 March 2018), 1991.
- Fourn, L. and Fayomi, E. B.: Pollution atmosphérique en milieu urbain à Cotonou et à Lokossa, Bénin, *Bull Soc Pathol Exot*, 99, 264–268, 2006.
- Gac, A., Béline, F., and Bioteau, T.: Inventaire national des émissions gazeuses (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>) liées à la gestion des déjections?: les données bibliographiques et les résultats pour l'élevage avicole, MyScienceWork, available at: [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/PDF/EN116\\_GAC-version-def.pdf](http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/PDF/EN116_GAC-version-def.pdf) (last access: 14 November 2016), 2007.
- Galy-Lacaux, C. and Modi, A.: Precipitation chemistry in the Sahelian savanna of Niger, Africa, *J. Atmos. Chem.*, 30, 319–343, <https://doi.org/10.1023/A:1006027730377>, 1998.
- Galy-Lacaux, C., Carmichael, G. R., Song, C. H., Lacaux, J. P., Al Ourabi, H., and Modi, A. I.: Heterogeneous processes involving nitrogenous compounds and Saharan dust inferred from measurements and model calculations, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 12559–12578, <https://doi.org/10.1029/2000JD900778>, 2001.
- Golly, A.-R. N. and Koffi-Didia, A. M.: Logique de dispersion des espaces d'élevage dans la sous-préfecture de Songon, *Syllabus Rev.*, 6, 175–200, 2015.
- Goore Bi, H.: Actualité Auto.ci, Transport terrestre en Côte d'Ivoire?: Un parc national de plus de 423500 véhicules, Auto.ci, available at: <http://www.auto.ci/news/transport-terrestre-en-> (last access: 9 August 2017), 2011.
- Gorecki, T. and Namiesnik, J.: Passive sampling, *Trac-Trends Anal. Chem.*, 21, 276–291, [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)00407-7](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00407-7), 2002.
- Hagenbjörk, A., Malmqvist, E., Mattsson, K., Sommar, N. J., and Modig, L.: The spatial variation of O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> and the relation between them in two Swedish cities, *Environ. Monit. Assess.*, 189, 161, <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5872-z>, 2017.
- Hanke, M., Umann, B., Uecker, J., Arnold, F., and Bunz, H.: Atmospheric measurements of gas-phase HNO<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> using chemical ionization mass spectrometry during the MINATROC field campaign 2000 on Monte Cimone, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 417–436, <https://doi.org/10.5194/acp-3-417-2003>, 2003.
- Hassan, S. K., El-Abssawy, A. A., and Khoder, M. I.: Characteristics of gas-phase nitric acid and ammonium-nitrate-sulfate aerosol, and their gas-phase precursors in a suburban area in Cairo, Egypt, *Atmos. Pollut. Res.*, 4, 117–129, <https://doi.org/10.5094/APR.2013.012>, 2013.
- He, J., Xu, H., Balasubramanian, R., Chan, C. Y., and Wang, C.: Comparison of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> Measurements Using Different Passive Samplers in Tropical Environment, *Aerosol Air Qual. Res.*, 14, 355–363, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.02.0055>, 2014.
- Hodgkins, R. E., Grzywacz, C. M., and Garrell, R. L.: An improved ion chromatography method for analysis of acetic and formic acid vapours, *E-Preserv. Sci. E-PS*, 8, 74–80, 2011.
- Ibe, F. C., Njoku, P. C., Alinnor, J. I., and Opara, A. I.: Spatial variation of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in the ambient environment of Imo State, Nigeria, *Int. J. Sci. Environ. Technol.*, 5, 33–46, 2016.
- Ibrahim, M. Z., Ismail, M., and Hwang, Y. K.: Mapping the Spatial Distribution of Criteria Air Pollutants in Peninsular Malaysia Using Geographical Information System (GIS), *Tech*, <https://doi.org/10.5772/32902>, 2012.
- IMF: World Economic Outlook Update, July 2017: A Firming Recovery, available at: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/07/07/world-economic-outlook-update-july-2017>, last access: 20 December 2017.
- Inchaouh, M., Tahiri, M., and Abboubi, B. E. J. R.: State of ambient air quality in Marrakech city (Morocco) over the period 2009–2012, *Int. J.*, 12, 99–106, 2017.
- INS: Institut National de la Statistique: rgph 2014 Côte d'Ivoire: Résultats Globaux, Inst. Natl. Stat., available at: <http://www.ins.ci/n/RESULTATSGLOBAUX.pdf> (last access: 3 November 2016), 2015.
- Istrate, I. A., Oprea, T., Rada, E. C., and Torretta, V.: Noise and air pollution from urban traffic, *WIT Trans. Ecol. Environ.*, 191, 1381–1389, 2014.
- Jackson, M. M.: Air pollution in southern Africa: The case of motor vehicle exhaust contribution in Dar Es Salaam city, *J. Build. Land Dev.*, 12, 1–19, 2005.
- Jha, D. K., Sabesan, M., Das, A., Vinithkumar, N. V., and Kirubakaran, R.: Evaluation of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India., *Univers. J. Environ. Res. Technol.*, 1, available at: <http://www.environmentaljournal.org/1-3/ujert-1-3-10.pdf> (last access: 8 August 2017), 2011.

- Josipovic, M., Annegarn, H. J., Kneen, M. A., Pienaar, J. J., and Piketh, S. J.: Concentrations, distributions and critical level exceedance assessment of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in South Africa, *Environ. Monit. Assess.*, 171, 181–196, <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1270-5>, 2010.
- Kaboro, B. M.: Assessment of levels of Urban Air Pollutants and Trace Elements in Roadside Soils; A case Study in Eastleigh Area, Nairobi, available at: <http://uonlibrary.uonbi.ac.ke/content/> (last access: 8 August 2017), 2006.
- Kampa, M. and Castanas, E.: Human health effects of air pollution, *Environ. Pollut.*, 151, 362–367, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>, 2008.
- Kchih, H. and Cherif, S.: Distribution spatiale des O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> et évaluation des interactions troposphériques sur la ville de Tunis (Tunisie), 2268–3798, <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.4804>, 2015.
- Khogali, H. A. M.: Impact Of Khartoum Refinery Gaseous By-Products On The Environment, available at: [https://www.researchgate.net/profile/Hind\\_Abdel\\_moneim/publication/292152169\\_Pinnacle\\_Educational\\_Research\\_Development\\_Impact\\_Of\\_Khartoum\\_Refinery\\_Gaseous\\_By-Products\\_On\\_The\\_Environment/links/56ab4d3f08aed814bde96695.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hind_Abdel_moneim/publication/292152169_Pinnacle_Educational_Research_Development_Impact_Of_Khartoum_Refinery_Gaseous_By-Products_On_The_Environment/links/56ab4d3f08aed814bde96695.pdf) (last access: 29 June 2017), 2016.
- Kirenga, B. J., Meng, Q., Van Gemert, F., Aanyu-Tukamuhebwa, H., Chavannes, N., Katamba, A., Obai, G., Molen, T. van der, Schwander, S., and Mohsenin, V.: The state of ambient air quality in two Ugandan cities: a pilot cross-sectional spatial assessment, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 8075–8091, 2015.
- Knippertz, P., Coc, H., Chiu, J. C., Evans, M. J., Fink, A. H., Kalthoff, N., Liousse, C., Mari, C., Allan, R. P., Brooks, B., Danour, S., Flamant, C., Jegede, O. O., Lohou, F., and Marsham, J. H.: The DACCIWA Project Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 96, 1451–1460, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00108.1>, 2015.
- Konate, L., Kouadio, B. H., Djè, B. K., Ake, G. E., Bi, V. H. N., Gnagne, L., Kouame, E. K., and Biemi, J.: Caractérisation des pluies journalières intenses et récurrences des inondations: apport des totaux glissants trois (3) jours à la détermination d'une quantité seuil d'inondation (District d'Abidjan au Sud-Est de la Côte d'Ivoire)/[Heavy daily rainfall characterization and flooding repeating: contribution of three (3) days sliding total to the purposefulness of threshold amount rainfall inducing flooding (Abidjan district, South-east of Ivory Coast)], *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 17, 990–1003, 2016.
- Kopieu, G.: Déchets solides en milieu urbain d'Afrique de l'ouest et centrale, vers une gestion durable, *Serie séminaire PDM-VIII*, 53–58, 1996.
- Kouadio, C.: Abidjan: plus de 300 000 véhicules en circulation, *Actualité, Acturoutes.info, Acturoutes.info*, available at: <https://www.acturoutes.info/page.php?p=1&id=4279> (last access: 9 August 2017), 2014.
- Kouame, I. K., Gone, D. L., Savane, I., Kouassi, E. A., Koffi, K., Goula, B. T. A., and Diallo, M.: Mobilité relative des métaux lourds issus de la décharge d'Akouédo et risque de contamination de la nappe du Continental Terminal (Abidjan – Côte d'Ivoire), *Afr. Sci. Rev. Int. Sci. Technol.*, 2, available at: <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/61133> (last access: 8 August 2017), 2006.
- Krzyzanowski, M. and Cohen, A.: Update of WHO air quality guidelines, *Air Qual. Atmosphere Health*, 1, 7–13, <https://doi.org/10.1007/s11869-008-0008-9>, 2008.
- Kumar, R., Gupta, A., Kumari, K. M., and Srivastava, S. S.: Simultaneous measurements of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> and NH<sub>3</sub>: seasonal and spatial variations, *Curr. Sci.*, 87, 1108–1115, 2004.
- Laouali, D., Galy-Lacaux, C., Diop, B., Delon, C., Orange, D., Lacaux, J. P., Akpo, A., Lavenu, F., Gardrat, E., and Castera, P.: Long term monitoring of the chemical composition of precipitation and wet deposition fluxes over three Sahelian savannas, *Atmos. Environ.*, 50, 314–327, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.004>, 2012.
- Liousse, C. and Galy-Lacaux, C.: Pollution urbaine en Afrique de l'Ouest, *La Météorologie*, 71, 45–49, <https://doi.org/10.4267/2042/37377>, 2010.
- Liousse, C., Assamoi, E., Criqui, P., Granier, C., and Rosset, R.: Explosive growth in African combustion emissions from 2005 to 2030, *Environ. Res. Lett.*, 9, 035003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035003>, 2014.
- Lourens, A. S., Beukes, J. P., van Zyl, P. G., Fourie, G. D., Burger, J. W., Pienaar, J. J., Read, C. E., and Jordaan, J. H.: Spatial and temporal assessment of gaseous pollutants in the Highveld of South Africa, *South Afr. J. Sci.*, 107, 1–8, <https://doi.org/10.4102/sajs.v107i1/2.269>, 2011.
- Mama, D., Dimon, B., Aina, M., Adoukpe, J., Ahomadegbe, M., Youssao, A., Kouazounde, J., Kouanda, S. P., and Moudachirou, M.: Transport urbain au Bénin et pollution atmosphérique: évaluation quantitative de certains polluants chimiques de Cotonou, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 7, 377–386, 2013.
- Marais, E. A., Jacob, D. J., Guenther, A., Chance, K., Kurosu, T. P., Murphy, J. G., Reeves, C. E., and Pye, H. O. T.: Improved model of isoprene emissions in Africa using Ozone Monitoring Instrument (OMI) satellite observations of formaldehyde: implications for oxidants and particulate matter, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 7693–7703, <https://doi.org/10.5194/acp-14-7693-2014>, 2014.
- Martins, J. J., Dhammapala, R. S., Lachmann, G., Galy-Lacaux, C., and Pienaar, J. J.: Long-term measurements of sulphur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in southern Africa using passive samplers, *South Afr. J. Sci.*, 103, 336–342, 2007.
- Messou, A., Coulibaly, L., ÖDombia, L., and Gourene, G.: Plants diversity and phytoaccumulators identification on the Akouédo landfill (Abidjan, Côte d'Ivoire), *Afr. J. Biotechnol.*, 12, 253–264, <https://doi.org/10.5897/AJB12.1664>, 2013.
- MI: Site officiel – Ministère de l'Industrie et des Mines – République de Côte d'Ivoire, available at: [http://www.industrie.gouv.ci/?page=zone\\_industrielle](http://www.industrie.gouv.ci/?page=zone_industrielle) (last access: 9 April 2018), 2015.
- Ministry of Transport: Ministère des Transports – République de Côte d'Ivoire, available at: <http://www.transports.gouv.ci/projetsuite.php?rd=2> (last access: 9 August 2017), 2012.
- Nanaa, B., Sanogob, O., Savadogoa, P., Dahoa, T., Boudad, M., and Koulidiatia, J.: Air Quality Study in Urban Centers: Case Study of Ouagadougou, Burkina Faso, *FUTY J. Environ.*, 7, 1, <https://doi.org/10.4314/fje.v7i1.1>, 2012.
- Norman, R., Barnes, B., Mathee, A., and Bradshaw, D.: Estimating the burden of disease attributable to indoor air pollution from household use of solid fuels in South Africa in 2000, *S. Afr. Med. J.*, 97, 764–771, 2007.

- Obanijesu, E. O., Adebisi, F. M., Sonibare, J. A., and Oke-lana, O. A.: Air-borne SO<sub>2</sub> pollution monitoring in the upstream petroleum operation areas of Niger-Delta, Nigeria, *Energy Sources Part A*, 31, 223–231, 2009.
- Oliver, M. A. and Webster, R.: Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 4, 313–332, <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>, 1990.
- Paulot, F., Paynter, D., Ginoux, P., Naik, V., Whitburn, S., Van Damme, M., Clarisse, L., Coheur, P.-F., and Horowitz, L. W.: Gas-aerosol partitioning of ammonia in biomass burning plumes: Implications for the interpretation of spaceborne observations of ammonia and the radiative forcing of ammonium nitrate, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2017GL074215, <https://doi.org/10.1002/2017GL074215>, 2017.
- Perrino, C., Catrambone, M., Di Menno Di Bucchianico, A., and Allegrini, I.: Gaseous ammonia in the urban area of Rome, Italy and its relationship with traffic emissions, *Atmos. Environ.*, 36, 5385–5394, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00469-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00469-7), 2002.
- Petkova, E. P., Jack, D. W., Volavka-Close, N. H., and Kinney, P. L.: Particulate matter pollution in African cities, *Air Qual. Atmosphere Health*, 6, 603–614, <https://doi.org/10.1007/s11869-013-0199-6>, 2013.
- Pope III, C. A. and Dockery, D. W.: Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 56, 709–742, <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>, 2006.
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., and Thurston, G. D.: Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution, *J. Amer. Med. Assoc.*, 287, 1132–1141, <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>, 2002.
- Raheem, A. M. O. A., Adekola, F. A., and Obioh, I. O.: The Seasonal Variation of the Concentrations of Ozone, Sulfur Dioxide, and Nitrogen Oxides in Two Nigerian Cities, *Environ. Model. Assess.*, 14, 497–509, <https://doi.org/10.1007/s10666-008-9142-x>, 2009.
- Rivera-Gonzalez, L. O., Zhang, Z., Sanchez, B. N., Zhang, K., Brown, D. G., Rojas-Bracho, L., Osornio-Vargas, A., Vadillo-Ortega, F., and O'Neill, M. S.: An assessment of air pollutant exposure methods in Mexico City, Mexico, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 65, 581–591, <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1020974>, 2015.
- Rodriguez, J. A. and Hrbek, J.: Interaction of sulfur with well-defined metal and oxide surfaces: Unraveling the mysteries behind catalyst poisoning and desulfurization, *Acc. Chem. Res.*, 32, 719–728, <https://doi.org/10.1021/ar9801191>, 1999.
- Roy, R.: “The cost of air pollution in Africa”, OECD Development Centre Working Papers, OECD Publ. Paris, 333, 56, <https://doi.org/10.1787/5jlqzq77x6f8-en>, 2016.
- Sadanaga, Y., Sengen, M., Takenaka, N., and Bandow, H.: Analyses of the Ozone Weekend Effect in Tokyo, Japan: Regime of Oxidant (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) Production, *Aerosol Air Qual. Res.*, 12, 161–168, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.07.0102>, 2012.
- Salem, A. A., Soliman, A. A., and El-Haty, I. A.: Determination of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone, and ammonia in ambient air using the passive sampling method associated with ion chromatographic and potentiometric analyses, *Air Qual. Atmosphere Health*, 2, 133–145, <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0040-4>, 2009.
- Sapek, A.: Ammonia Emissions from Non-Agricultural Sources, *Pol. J. Environ. Stud.*, 22, 63–70, 2013.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N.: Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, John Wiley & Sons, available at: [https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=n\\_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR23&dq=From+air+pollution+to+climate+change&ots=gRF8EOocbI&sig=4lGHk8PQHENUjWhfU3Vn-AQ4DFc](https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=n_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR23&dq=From+air+pollution+to+climate+change&ots=gRF8EOocbI&sig=4lGHk8PQHENUjWhfU3Vn-AQ4DFc) (last access: 9 August 2017), 2016.
- Sun, K., Tao, L., Miller, D. J., Pan, D., Golston, L. M., Zondlo, M. A., Griffin, R. J., Wallace, H. W., Leong, Y. J., Yang, M. M., Zhang, Y., Mauzerall, D. L., and Zhu, T.: Vehicle Emissions as an Important Urban Ammonia Source in the United States and China, *Environ. Sci. Technol.*, 51, 2472–2481, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02805>, 2017.
- Sutton, M. A., Dragosits, U., Tang, Y. S., and Fowler, D.: Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK, *Atmos. Environ.*, 34, 855–869, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00362-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00362-3), 2000.
- Tam, P. S., Kittrell, J. R., and Eldridge, J. W.: Desulfurization of fuel oil by oxidation and extraction. 1. Enhancement of extraction oil yield, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29, 321–324, <https://doi.org/10.1021/ie00099a002>, 1990.
- Teng, X., Hu, Q., Zhang, L., Qi, J., Shi, J., Xie, H., Gao, H., and Yao, X.: Identification of major sources of atmospheric NH<sub>3</sub> in an urban environment in northern China during wintertime, *Environ. Sci. Technol.*, 51, 6839–6848, 2017.
- UNDP: United Nations development Programme: Etude NAMA (Nationally Appropriate Mitigation Action) sur le charbon de bois durable en Côte d'Ivoire, available at: <http://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/undp02022015.pdf> (last access: 9 August 2017), 2015.
- Val, S., Lioussé, C., Doumbia, E. H. T., Galy-Lacaux, C., Cachier, H., Marchand, N., Badel, A., Gardrat, E., Sylvestre, A., and Baeza-Squiban, A.: 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, Part. Fibre Toxicol., 10, 10, <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-10>, 2013.
- Van Dingenen, R., Dentener, F. J., Raes, F., Krol, M. C., Emberson, L., and Cofala, J.: The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation, *Atmos. Environ.*, 43, 604–618, 2009.
- Whitburn, S., Van Damme, M., Kaiser, J. W., van der Werf, G. R., Turquety, S., Hurtmans, D., Clarisse, L., Clerbaux, C., and Coheur, P.-F.: Ammonia emissions in tropical biomass burning regions: Comparison between satellite-derived emissions and bottom-up fire inventories, *Atmos. Environ.*, 121, 42–54, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.015>, 2015.
- Whitehead, J. D., Longley, I. D., and Gallagher, M. W.: Seasonal and diurnal variation in atmospheric ammonia in an urban environment measured using a quantum cascade laser absorption spectrometer, *Water, Air, Soil Pollut.*, 183, 317–329, <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9381-5>, 2007.
- WHO (Ed.): Air quality guidelines: global update 2005?: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, World

- Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2006.
- WHO: Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease, available at: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/250141/1/9789241511353-eng.pdf?ua=1> (last access: 2 March 2018), 2016.
- Xia, X., Qi, Q., Liang, H., Zhang, A., Jiang, L., Ye, Y., Liu, C., and Huang, Y.: Pattern of Spatial Distribution and Temporal Variation of Atmospheric Pollutants during 2013 in Shenzhen, China, *Isprs Int. J. Geo-Inf.*, 6, 2, <https://doi.org/10.3390/ijgi6010002>, 2017.
- Yao-Kouassi, Q. C.: A la recherche d'une synergie pour la gestion des déchets ménagers en Côte d'Ivoire: cas du district d'Abidjan, Le Mans, available at: <http://www.theses.fr/2010LEMA3006> (last access: 9 August 2017), 2010.
- Yapi-Diahou, A., Koffi-Didia, M. A., Koffi, E. B., Yassi, G. A., Diby, M. K., and Chaleard, J.-L.: Les périphéries abidjanaises: territoires de redistribution et de relégation, *Métrop. Sud Vues Leurs Périphéries Graf.*, 34, 107–122, 2011.

# **Annexes**

## **Annexe I**

**Document 1 : Feuille de collecte****EXPERIENCE DACCIWA ..... Décembre 2016 - Février 2017****Site :****Mois :**

Latitude. :

Longitude :

Elévation.(m) :

Date d'envoi des capteurs passif à la station :

Capteur	Gaz	Pose		Retrait		Observation
		Date	Heure	Date	Heure	
Noir 1	SO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub>					
Noir 2	SO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub>					
Gris 3	NO <sub>2</sub>					
Gris 4	NO <sub>2</sub>					
Blanc 5	NH <sub>3</sub>					
Blanc 6	NH <sub>3</sub>					
Noir et gris 7	O <sub>3</sub>					
Noir et gris 8	O <sub>3</sub>					

**Température moyenne sur le mois de .....2008 ( t = °C )**

Date d'arrivée des capteurs passifs à la station :

Date de retour des capteurs passifs au laboratoire d'Aérologie :

Combien de temps avez-vous gardé les capteurs passifs au frigo :

Entre leur réception et leur exposition ?

Entre leur exposition et leur réexpédition ?

**Remarque :**Christelle CHIRON - Eric GARDRAT  
LABORATOIRE D'AEROLOGIE

O.M.P. 14 , av. E.Belin

31400 Toulouse – France

Tél. 0033 5 61 33 27 05 – Fax : 0033 5 61 33 27 90

## Document 2 : Script en langage python pour le tracé des roses de vent d'Abidjan

```

1  #!/usr/bin/env python
2
3  #-*- coding: utf-8 -*-
4  #-*- coding: utf-8 -*-
5  """
6  Created on Tue May 24 20:33:51 2016
7
8  @author: ylong
9  """
10 #import arcpy
11
12 # Get the spatial reference from the tool dialog.
13 #spatial_ref = arcpy.GetParameter(0)
14 #
15 ## Display the Spatial Reference properties
16 #arcpy.AddMessage("Name is: {}".format(spatial_ref))
17 #arcpy.AddMessage("Type is: {}".format(spatial_ref.type))
18 #arcpy.AddMessage("Factory code is: {}".format(spatial_ref.factoryCode))
19 import json
20 import datetime
21 import urllib2
22
23 import re
24 import numpy as np
25 from matplotlib import pyplot as plt
26 from windrose import WindroseAxes
27
28 def subsearch(occur,fname):
29     with open(fname) as f: # Open the file (auto-close it too)
30         i=0
31         for line in f: # Go through the lines one at a time
32             m = re.search(occur, line) # Check each line
33             i = i+1
34             if m: # If we have a match...
35                 return i # ...return the value
36
37 def file_len(fname):
38     with open(fname) as f:
39         for i, l in enumerate(f):
40             pass
41         return i + 1
42
43 def CleanWind(windir,windsp,thrdir,thrsp):
44
45     wd_s=['toto']*len(windir)
46     ws_s=['toto']*len(windsp)
47
48     for i in range(len(windir)):
49         if(windir[i]=='M' or windsp[i]=='M'):
50             wd_s[i]='0.00'
51             ws_s[i]='0.00'
52         else:
53             wd_s[i]=windir[i]
54             ws_s[i]=windsp[i]
55     windir = [float(i) for i in wd_s]
56     uspeed = [float(i)*0.51444444 for i in ws_s] #conversion from knots to m/s
57
58     twd = [x if x > thrdir else np.nan for x in windir]
59     tws = [x if x > thrsp else np.nan for x in uspeed]
60
61     CL_dir = [x for x in twd if str(x) != 'nan']
62     CL_sp = [x for x in tws if str(x) != 'nan']
63
64     return CL_dir,CL_sp
65
66 # timestamps in UTC to request data for
67 startts = datetime.datetime(2016, 12, 15)
68 endts = datetime.datetime(2017, 2, 16)
69
70 #station name
71 #STA = "LFAQ"
72 STA = "DIAP" # "DBBB" #
73
74 SERVICE = "http://mesonet.agron.iastate.edu/cgi-bin/request/asos.py?"
75 SERVICE += "data=all&tz=Etc/UTC&format=comma&latlon=yes&"

```

```

77 SERVICE += startts.strftime('year1=%Ymonth1=%mday1=%dc')
78 SERVICE += endts.strftime('year2=%Ymonth2=%mday2=%dc')
79
80 #states = ""AK AL AR AZ CA CO CT DE FL GA HI IA ID IL IN KS KY LA MA MD ME
81 # MI MN MO MS MT NC ND NE NH NJ NM NV NY OH OK OR PA RI SC SD TN TX UT VA VT
82 # WA WI WV WY""
83 states = ""CI"" #""BJ""#
84
85 # IEM quirk to have Iowa AWOS sites in its own labeled network
86 #networks = ['AWOS']
87 networks = ['ASOS']
88 for state in states.split():
89     #networks.append("%s_AWOS" % (state,))
90     networks.append("%s_ASOS" % (state,))
91
92 for network in networks:
93     # Get metadata
94     uri = "http://mesonet.agron.iastate.edu/geolson/network.php?network=%s" % (
95         network,)
96     data = urllib2.urlopen(uri)
97     jdict = json.load(data)
98     for site in jdict['features']:
99         if (site['properties']['sid']!=STA):
100             faaid = site['properties']['sid']
101             sitename = site['properties']['sname']
102             uri = '%sstation=%s' % (SERVICE, faaid)
103             print 'Network: %s Downloading: %s [%s]' % (network, sitename, faaid)
104             data = urllib2.urlopen(uri)
105             outfn = '%s_%s_%s.txt' % (faaid, startts.strftime("%Y%m%d%H%M"),
106                 endts.strftime("%Y%m%d%H%M"))
107             out = open(outfn, 'w')
108             out.write(data.read())
109             out.close()
110
111             dbeg = '%s' % (startts.strftime("%Y/%m/%d"))
112             dend = '%s' % (endts.strftime("%Y/%m/%d"))
113             dbeg2 = '%s' % (startts.strftime("%Y%m%d"))
114             dend2 = '%s' % (endts.strftime("%Y%m%d"))
115
116             STAT=[]
117             date=[]
118             drct=[]
119             sknt=[]
120             fname = outfn
121             header=subsearch(STA,fname)
122             nline = file_len(fname)
123             finp = open(fname, 'r')
124             for i in range(header-1):
125                 messyheader=finp.readline()
126                 istat = messyheader.split(',').index('station')
127                 idate = messyheader.split(',').index('valid')
128                 idrct = messyheader.split(',').index(' drct')
129                 isknt = messyheader.split(',').index(' sknt')
130
131             for zz in range(nline-header):
132                 line=finp.readline()
133                 STAT.append(line.split(',')[istat])
134                 date.append(line.split(',')[idate])
135                 drct.append(str(line.split(',')[idrct]))
136                 sknt.append(line.split(',')[isknt])
137
138             finp.close()
139
140             wd,ws = CleanWind(drct,sknt,0,0)
141
142             fig = plt.figure(figsize=(11,11),dpi=400,facecolor='w',edgecolor='w')
143             rect = [0.1, 0.1, 0.8, 0.8]
144             ax = WindroseAxes(fig,rect,axisbg='w',alpha=0.5)
145             fig.add_axes(ax)
146             ax.bar(wd,ws,normed=True,opening=0.9,edgecolor='white',bins=np.arange(2, 8, 0.5),nsector=36)
147             #ax.set_title('Windrose plot for station: %s' % sitename)
148             ax.legend(loc='lower left', bbox_to_anchor=(-0.12, -0.13),ncol=3, fancybox=True, shadow=True, prop={'size':12},title='Wind speed (m/s)')
149             ax.set_title(dbeg+' to '+dend+' - METAR/SYNOP station: '+sitename,y=1.08,fontsize=18)
150             ax.tick_params(labelsize=14.,pad=0)
151
152             #l = ax.legend()
153             #plt.setp(l.get_texts(),fontsize=14.)
154             plt.savefig(faaid+'-'+dbeg2+'-'+dend2+'.png', bbox_inches='tight',dpi=400) ##### End of windrose plot

```

### Document 3 : Comparaison des capteurs passifs d'ammoniac ALPHA CEH et INDAAF

Le programme DACCIWA nous a donné l'occasion de tester le badge CEH ALPHA d'ammoniac en zone urbaine tropicale ce qui n'a jamais été fait. Les capteurs passifs INDAAF et les badges INRA ont été utilisés simultanément pour réaliser le suivi à moyen terme des concentrations d'ammoniac sur le site feux de décharge d'Abidjan. L'objectif de cette section est de faire une intercomparaison des mesures à l'aide deux capteurs passifs dont la géométrie est différente.

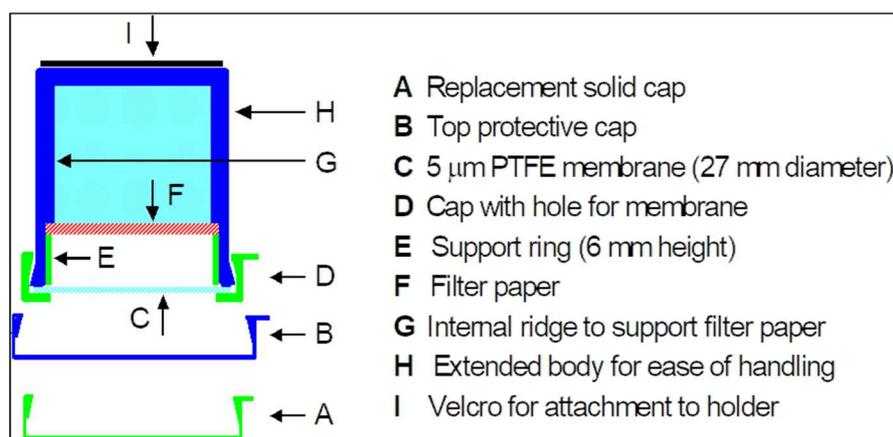
#### I.1. Le badge CEH ALPHA

Le badge CEH ALPHA (Adapted Low-cost Passive High Absorption) est un dispositif élaboré par le Centre pour l'Ecologie et l'Hydrologie (CEH) d'Edinburg en Angleterre. C'est un outil utilisé pour la mesure de la concentration d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) dans l'air. Il est utile en tant que méthode complémentaire pour évaluer les différences spatiales dans les zones sources où les concentrations de  $\text{NH}_3$  peuvent subir de grandes variations. Tout comme les capteurs passifs INDAAF, le badge ALPHA ne nécessite pas d'électricité et est accessible à un cout raisonnable. Ce capteur passif idéal pour un suivi long-terme des concentrations d'ammoniac et pour établir des réseaux de surveillance des concentrations de  $\text{NH}_3$  dans l'air. Les plages de concentration mesurées par le badge ALPHA varient en fonction de la durée de l'exposition.

- Surveillance mensuelle = 0,02 - 100  $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$
- Surveillance hebdomadaire = 0,05 - 400  $\mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$

La figure 2.23 présente les éléments constitutifs du badge ALPHA.

Le badge ALPHA est considéré comme un capteur passif fiable pour la mesure de l'ammoniac et complémentaire de l'analyseur actif de référence CEH DELTA (DENuder for Long term Ammonia) (Sutton et al., 2001). Le biais entre les concentrations mesurées par le badge ALPHA et l'analyseur de référence est de -2,4 % et le coefficient de corrélation entre eux est  $r = 0,89$ . La reproductibilité des duplicates est estimée à 7 % (Puchalski et al., 2011).



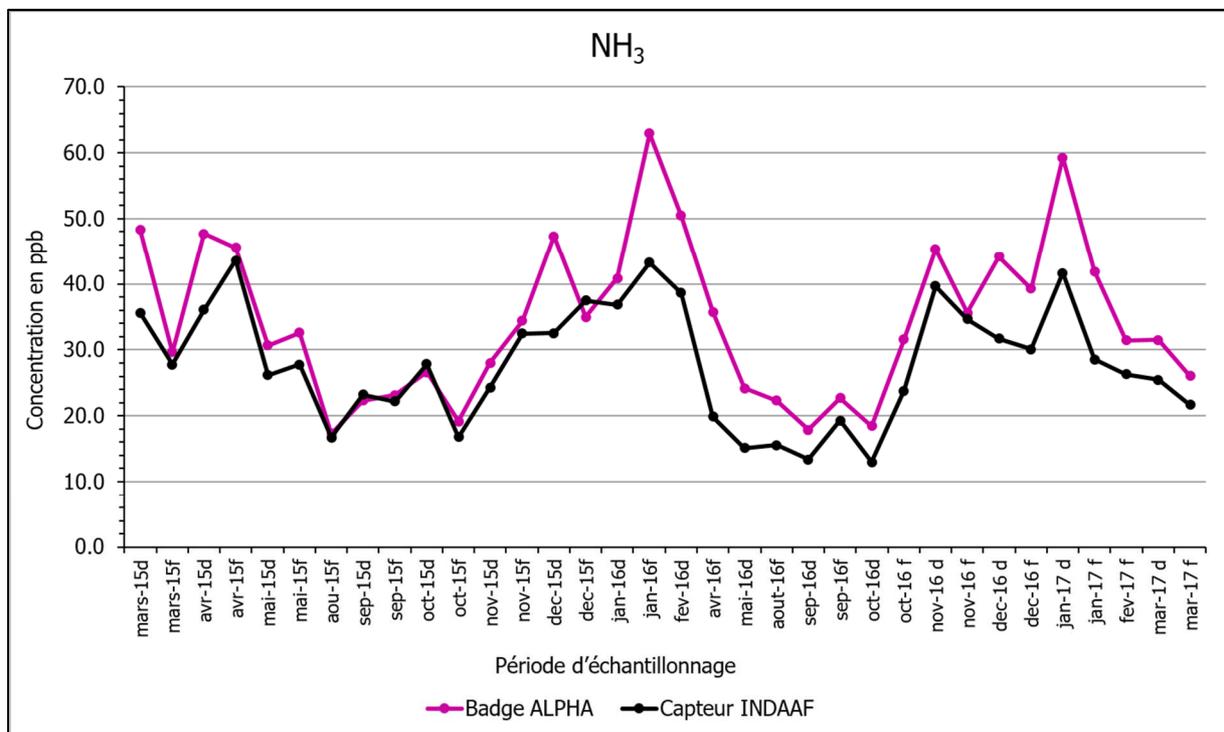
**Figure I. 1:** Schéma de principe d'un badge CEH ALPHA et de ses composants (Tang et al., 2001).

## I.2. Suivi à moyen terme des concentrations de $\text{NH}_3$ à l'aide des 2 types de capteurs.

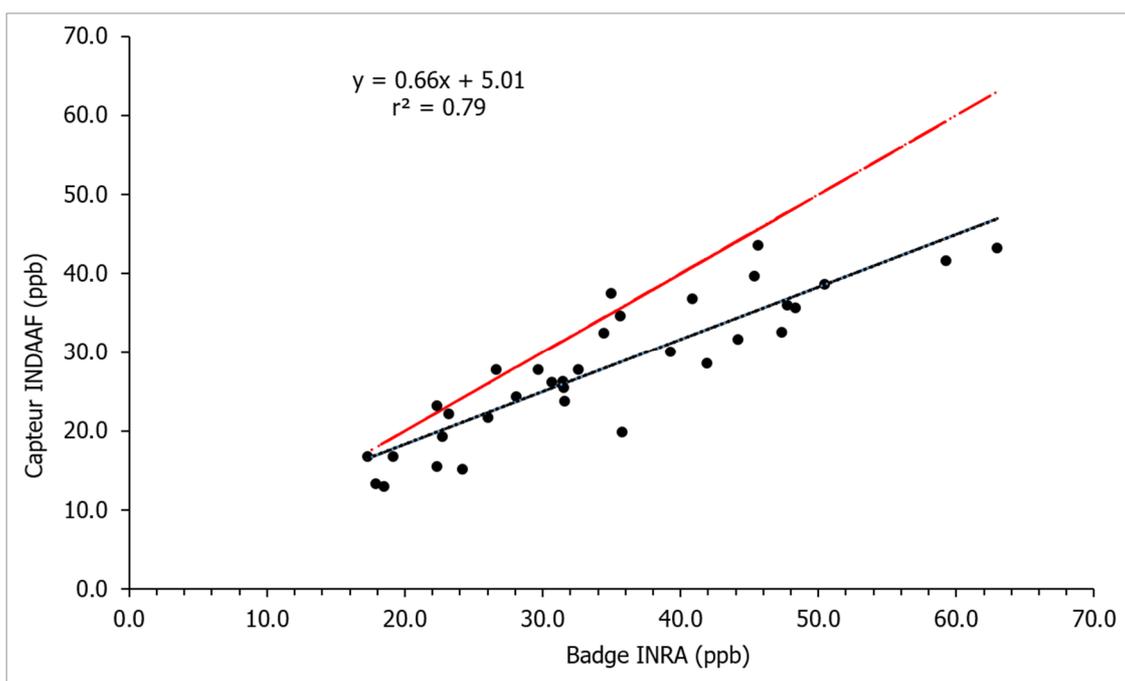
Cette étude nous a donné l'occasion de tester des capteurs d'ammoniac appelés badges CEH ALPHA. Les capteurs passifs INDAAF et CEH ALPHA ont été exposés simultanément en duplicate de Mars 2015 à Mars 2017 sur le site de la décharge d'Akouédo. Au total nous avons collecté 96 échantillons d'ammoniac avec chaque type de capteur. La moyenne de chaque duplicate a été calculé et a permis de réaliser une base de données de 48 échantillons correspondant chacun à une quinzaine (2 semaines d'exposition). Tous les badges ALPHA ayant une reproductibilité supérieure à 10 % n'ont pas été retenus. La base donnée finale est constituée de 34 échantillons soit 71 % de l'échantillonnage. Ce résultat est lié aux difficultés rencontrées dans la mise en œuvre de l'échantillonnage notamment ceux liés à la sécurité des installations.

L'analyse du suivi moyen terme des concentrations de  $\text{NH}_3$  sur le site de la décharge d'Akouédo (figure 2.24) montre de premier abord que les concentrations mesurées par les deux types de capteurs présentent des allures similaires. Les différences les plus visibles sont observées lorsque le badge ALPHA mesure des concentrations supérieures à 50 ppb. C'est le cas en janvier 2016 et en Janvier 2017. On remarque aussi dans 91,2 % des cas que le badge ALPHA mesure des concentrations plus élevées que le capteur INDAAF. Seulement 3 mesures sur 34 effectuées par le capteur INDAAF ont des concentrations supérieures à celle mesurées par le badge INRA. Dans ces rares cas la valeur absolue de l'écart des concentrations n'excède pas 2,5 ppb.

La corrélation entre les mesures effectuées par ces deux types de capteurs a été représentée à la figure 2.25. La courbe en noir représente la droite de régression linéaire entre les concentrations mesurées par les capteurs et la courbe en rouge représente la première bissectrice correspondant aux valeurs identiques que pourraient mesurer les deux capteurs. L'analyse des similitudes a permis de montrer qu'il existe une corrélation linéaire entre les concentrations mesurées par ces deux capteurs. Le coefficient de corrélation obtenu est  $r = 0,79$ . On rappelle que le test de Pearson indique qu'un coefficient de corrélation  $r = 0,35$  pour  $n = 35$  échantillons est significatif au seuil de 5 %. L'étude de l'écart entre la première bissectrice et la droite de régression linéaire permet de constater que les différences entre les deux capteurs augmentent avec la valeur des concentrations mesurées (figure 2.25).



**Figure I. 2:** Suivi des variations des concentrations de  $\text{NH}_3$  à l'aide des capteurs passifs INDAAF et INRA.



**Figure I. 3:** Courbe de régression linéaire (en noir) entre les concentrations en ppb mesurées par le badge ALPHA et le capteur INDAAF. La courbe en rouge représente la première bissectrice.

### 2.4.3. Calcul du biais

Le biais est la différence relative exprimée en pourcentage entre la concentration moyenne mesurée par le capteur passif INDAAF et celle mesurée par le badge ALPHA.

$$Biais (\%) = \frac{(C_{INDAAF} - C_{INRA}) \times 100}{C_{INDAAF}} \quad (I.1)$$

$C_{INDAAF}$  et  $C_{INRA}$  représentent les concentrations moyennes de  $NH_3$  obtenues sur toute la période de l'étude avec respectivement les capteurs passifs INDAAF et INRA. Le biais des capteurs passifs INDAAF par rapport au badge INRA calculé à partir des 34 échantillons retenus est estimé à  $-23,2\%$ .

## **Annexe II**

## Document 1 : Résultats de l'ACP pour le site feux domestiques d'Abidjan

Call:

PCA(X = Feux domestiques Abidjan)

### Eigenvalues (Valeurs propres)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Variance	1,692	1,375	0,968	0,502	0,463
% of var.	33,844	27,504	19,367	10,032	9,253
Cumulative % of var.	33,844	61,348	80,715	90,747	100,000

### Individuals (Prélèvements)

	Dist	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
1	4,512	0,009	0,000	0,000	4,149	23,183	0,846	-1,233	2,906	0,075
2	2,848	-0,341	0,128	0,014	2,806	10,604	0,971	-0,076	0,011	0,001
3	0,815	-0,465	0,236	0,325	-0,286	0,110	0,123	-0,040	0,003	0,002
4	2,147	-0,933	0,952	0,189	1,594	3,421	0,551	-0,250	0,119	0,014
5	2,430	-2,240	5,489	0,850	0,268	0,097	0,012	-0,682	0,889	0,079
6	3,149	-2,802	8,591	0,792	1,343	2,429	0,182	-0,123	0,029	0,002
7	2,850	-2,419	6,405	0,721	-1,413	2,689	0,246	-0,442	0,374	0,024
8	2,525	-2,457	6,606	0,947	-0,164	0,036	0,004	-0,117	0,026	0,002
9	2,778	-2,673	7,820	0,926	-0,586	0,462	0,044	0,263	0,133	0,009
10	2,493	-2,428	6,450	0,948	-0,519	0,363	0,043	0,049	0,005	0,000
11	1,810	-1,124	1,382	0,386	1,280	2,206	0,500	-0,423	0,343	0,055
12	1,847	-0,718	0,564	0,151	0,519	0,363	0,079	-0,944	1,702	0,261
13	2,279	0,887	0,861	0,151	0,328	0,145	0,021	-1,718	5,647	0,568
14	2,144	0,797	0,696	0,138	0,896	1,082	0,175	-1,626	5,058	0,576
15	1,849	1,210	1,603	0,428	0,175	0,041	0,009	-1,019	1,985	0,304
16	4,064	3,010	9,913	0,549	0,454	0,277	0,012	-0,157	0,047	0,001
17	2,851	2,228	5,432	0,610	-1,136	1,737	0,159	-0,884	1,493	0,096
18	1,349	0,950	0,988	0,496	-0,756	0,770	0,314	0,114	0,025	0,007
19	3,326	1,612	2,843	0,235	-1,213	1,981	0,133	-1,986	7,540	0,356
20	2,284	1,499	2,459	0,431	-1,396	2,625	0,374	0,091	0,016	0,002
21	2,086	-1,656	3,002	0,630	-0,908	1,109	0,189	0,516	0,509	0,061
22	1,551	-0,789	0,682	0,259	-1,140	1,751	0,540	-0,584	0,652	0,142
23	1,420	-0,765	0,640	0,290	0,671	0,606	0,223	-0,154	0,045	0,012
24	0,945	-0,557	0,340	0,348	0,295	0,117	0,097	-0,029	0,002	0,001
25	2,135	-0,158	0,027	0,005	1,046	1,473	0,240	0,735	1,033	0,118
26	1,605	0,473	0,245	0,087	0,052	0,004	0,001	0,900	1,550	0,315
27	1,283	-0,635	0,442	0,245	0,308	0,128	0,058	0,799	1,221	0,387
28	1,057	0,323	0,114	0,093	-0,377	0,191	0,127	-0,028	0,002	0,001
29	0,565	0,022	0,001	0,002	0,010	0,000	0,000	-0,164	0,051	0,084
30	0,882	-0,704	0,543	0,637	-0,490	0,324	0,309	-0,198	0,075	0,050
31	1,163	-0,182	0,036	0,025	-0,761	0,780	0,429	-0,397	0,302	0,117
32	1,096	0,274	0,082	0,063	-0,330	0,147	0,091	0,885	1,498	0,652
33	1,976	0,139	0,021	0,005	-0,974	1,276	0,243	1,604	4,922	0,659
34	1,789	0,655	0,469	0,134	-0,289	0,113	0,026	0,716	0,981	0,160
35	0,000	0,000	0,000	0,614	0,000	0,000	0,086	0,000	0,000	0,145
36	1,843	0,731	0,585	0,157	0,707	0,673	0,147	1,210	2,801	0,431
37	1,820	-1,346	1,983	0,547	0,111	0,017	0,004	-1,208	2,791	0,441
38	2,084	0,798	0,697	0,147	-0,026	0,001	0,000	-1,645	5,175	0,623
39	2,270	0,252	0,069	0,012	-2,062	5,727	0,826	0,009	0,000	0,000
40	2,475	1,605	2,821	0,421	-1,837	4,544	0,551	-0,122	0,029	0,002
41	3,866	2,363	6,110	0,374	0,534	0,384	0,019	-1,144	2,504	0,088
42	3,221	-0,606	0,402	0,035	-2,689	9,735	0,697	-1,593	4,851	0,245
43	2,515	-0,347	0,132	0,019	-2,287	7,045	0,827	-0,889	1,510	0,125
44	2,121	-0,397	0,172	0,035	-0,577	0,448	0,074	1,856	6,585	0,766
45	2,544	0,717	0,562	0,079	0,500	0,336	0,039	1,923	7,072	0,571
46	3,048	1,425	2,221	0,218	-0,716	0,690	0,055	2,588	12,812	0,721
47	1,926	-0,004	0,000	0,000	-0,130	0,023	0,005	1,715	5,623	0,792
48	1,561	-0,158	0,027	0,010	-0,075	0,008	0,002	1,498	4,292	0,921
49	1,999	1,233	1,663	0,380	1,269	2,167	0,403	0,654	0,818	0,107
50	1,009	-0,080	0,007	0,006	-0,095	0,012	0,009	0,758	1,099	0,565
51	1,445	0,243	0,064	0,028	1,137	1,740	0,619	0,628	0,755	0,189
52	1,945	0,482	0,255	0,061	1,270	2,170	0,426	0,162	0,050	0,007
53	1,270	0,822	0,739	0,419	0,563	0,427	0,197	0,096	0,017	0,006
54	2,482	2,227	5,428	0,805	0,948	1,211	0,146	0,105	0,021	0,002

### Variables (Polluants)

	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
NO2	0,731	31,616	0,535	-0,218	3,464	0,048	-0,452	21,061	0,204
NH3	0,437	11,278	0,191	-0,078	0,446	0,006	0,868	77,790	0,753
HNO3	0,525	16,303	0,276	0,709	36,521	0,502	0,024	0,057	0,001
SO2	0,828	40,534	0,686	-0,143	1,479	0,020	-0,079	0,648	0,006
O3	-0,067	0,268	0,005	0,894	58,089	0,799	-0,066	0,443	0,004

## Document 2 : Résultats de l'ACP pour le site trafic d'Abidjan

Call:

PCA(X = Trafic\_Abidjan)

### Eigenvalues (valeurs propres)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Variance	2,407	1,262	0,745	0,453	0,133
% of var.	48,143	25,231	14,893	9,065	2,669
Cumulative % of var.	48,143	73,374	88,267	97,331	100,000

### Individuals

	Dist	Dim,1	ctr	cos2	Dim,2	ctr	cos2	Dim,3	ctr	cos2
1	5,874	5,791	25,334	0,972	-0,413	0,245	0,005	0,323	0,255	0,003
2	1,637	-0,084	0,005	0,003	-0,340	0,166	0,043	1,451	5,142	0,786
3	3,190	-1,161	1,018	0,132	0,619	0,552	0,038	2,804	19,192	0,773
4	1,347	-0,492	0,183	0,133	1,096	1,731	0,662	-0,245	0,147	0,033
5	1,865	-0,342	0,088	0,034	1,762	4,477	0,893	0,449	0,493	0,058
6	1,526	0,346	0,090	0,051	0,864	1,077	0,321	-0,891	1,939	0,341
7	1,733	-0,098	0,007	0,003	-1,017	1,492	0,345	1,288	4,050	0,552
8	1,523	-0,206	0,032	0,018	-0,643	0,596	0,178	0,735	1,320	0,233
9	2,741	-1,712	2,214	0,390	-2,080	6,238	0,576	0,393	0,377	0,021
10	2,361	-1,469	1,630	0,387	0,450	0,291	0,036	-1,394	4,742	0,348
11	2,558	2,170	3,556	0,719	-0,401	0,232	0,025	0,181	0,080	0,005
12	3,090	0,190	0,027	0,004	2,204	7,004	0,509	-2,106	10,825	0,464
13	1,656	-1,140	0,982	0,475	0,230	0,076	0,019	-0,808	1,594	0,238
14	1,365	-0,801	0,484	0,344	0,890	1,143	0,426	0,073	0,013	0,003
15	1,749	-0,795	0,477	0,207	0,505	0,368	0,083	-0,903	1,990	0,267
16	1,458	-1,182	1,055	0,657	0,243	0,085	0,028	0,120	0,035	0,007
17	1,227	-0,079	0,005	0,004	-0,037	0,002	0,001	0,361	0,318	0,086
18	1,911	-1,646	2,046	0,742	-0,756	0,824	0,157	0,127	0,039	0,004
19	1,857	-1,476	1,645	0,631	-0,061	0,005	0,001	0,739	1,332	0,158
20	1,346	-0,655	0,324	0,237	-0,758	0,828	0,317	-0,769	1,444	0,326
21	1,626	-0,362	0,099	0,050	-1,330	2,550	0,670	-0,674	1,110	0,172
22	0,817	0,367	0,102	0,201	-0,314	0,142	0,148	-0,352	0,303	0,186
23	3,113	2,833	6,062	0,828	-0,186	0,050	0,004	-0,228	0,127	0,005
24	6,506	6,182	28,868	0,903	-1,516	3,310	0,054	0,141	0,049	0,000
25	1,751	1,705	2,195	0,947	0,125	0,023	0,005	-0,008	0,000	0,000
26	2,157	1,992	2,996	0,852	-0,677	0,660	0,098	0,166	0,067	0,006
27	0,771	0,121	0,011	0,025	0,357	0,184	0,215	0,279	0,191	0,131
28	3,758	0,468	0,165	0,015	2,886	12,002	0,590	2,347	13,449	0,390
29	2,757	-1,792	2,425	0,422	-2,069	6,171	0,563	0,313	0,239	0,013
30	1,325	-0,991	0,742	0,560	-0,707	0,721	0,285	0,468	0,535	0,125
31	2,358	-1,209	1,104	0,263	-1,157	1,928	0,241	-0,963	2,263	0,167
32	1,371	-0,033	0,001	0,001	0,305	0,134	0,050	-0,154	0,058	0,013
33	1,789	0,184	0,026	0,011	-0,176	0,045	0,010	-0,529	0,683	0,087
34	2,295	-0,360	0,098	0,025	0,768	0,850	0,112	-2,114	10,913	0,848
35	0,000	0,000	0,000	0,102	0,000	0,000	0,431	0,000	0,000	0,085
36	2,558	-1,267	1,212	0,245	1,865	5,011	0,532	0,348	0,296	0,019
37	1,505	-1,121	0,950	0,555	0,416	0,250	0,077	0,894	1,952	0,353
38	1,274	-0,824	0,513	0,419	0,439	0,278	0,119	0,633	0,977	0,247
39	2,094	-0,325	0,080	0,024	-1,596	3,673	0,581	0,264	0,170	0,016
40	1,599	-0,479	0,173	0,090	0,498	0,358	0,097	-1,212	3,588	0,575
41	1,216	-0,767	0,445	0,398	-0,700	0,706	0,331	-0,260	0,164	0,046
42	1,521	-0,609	0,280	0,160	-1,368	2,697	0,809	-0,151	0,056	0,010
43	3,437	-2,064	3,219	0,361	-2,714	10,613	0,623	-0,138	0,047	0,002
44	2,060	-0,466	0,164	0,051	-1,792	4,630	0,757	-0,798	1,556	0,150
45	0,635	0,237	0,042	0,139	0,030	0,001	0,002	-0,266	0,173	0,176
46	1,119	0,340	0,087	0,092	-0,730	0,767	0,425	0,582	0,828	0,271
47	2,090	1,200	1,087	0,330	1,132	1,847	0,293	-1,238	3,741	0,351
48	2,293	2,120	3,394	0,855	-0,535	0,413	0,054	-0,258	0,163	0,013
49	1,582	1,072	0,867	0,459	1,014	1,481	0,410	0,065	0,010	0,002
50	1,706	0,128	0,012	0,006	1,679	4,062	0,968	-0,087	0,019	0,003
51	0,857	0,662	0,331	0,597	0,082	0,010	0,009	0,397	0,385	0,215
52	2,095	-0,110	0,009	0,003	1,961	5,545	0,877	0,021	0,001	0,000
53	1,237	-0,820	0,508	0,440	0,767	0,848	0,385	0,241	0,142	0,038
54	1,072	-0,676	0,345	0,398	0,567	0,463	0,280	-0,066	0,011	0,004
55	0,748	-0,492	0,183	0,433	0,318	0,146	0,181	0,409	0,408	0,299

### Variables

	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
NO2	0,956	38,001	0,915	-0,038	0,112	0,001	0,020	0,055	0,000
NH3	0,813	27,451	0,661	-0,163	2,102	0,027	0,323	13,990	0,104
HNO3	0,290	3,493	0,084	0,751	44,739	0,564	-0,551	40,767	0,304
SO2	0,864	31,025	0,747	-0,082	0,538	0,007	-0,158	3,368	0,025
O3	0,027	0,029	0,001	0,814	52,510	0,662	0,558	41,820	0,311

## Document 3 : Résultats de l'ACP pour le site feux de décharge d'Abidjan

Call:

PCA(X = Feux de décharge Abidjan)

### Eigenvalues (Valeurs propres)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Variance	2,234	1,404	0,619	0,413	0,330
% of var.	44,684	28,075	12,385	8,262	6,595
Cumulative % of var.	44,684	72,758	85,143	93,405	100,000

### Individuals (Prélèvements)

	Dist	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
1	3,403	2,453	4,988	0,520	-1,746	4,020	0,263	-1,359	5,521	0,159
2	1,909	1,563	2,024	0,670	-0,340	0,152	0,032	0,897	2,406	0,221
3	2,421	-1,858	2,862	0,589	-1,430	2,697	0,349	0,320	0,306	0,017
4	0,536	0,264	0,058	0,243	-0,215	0,061	0,162	-0,307	0,283	0,329
5	1,242	0,294	0,071	0,056	-0,035	0,002	0,001	-0,119	0,043	0,009
6	1,253	0,157	0,021	0,016	-0,588	0,456	0,220	0,920	2,534	0,540
7	2,191	-1,177	1,149	0,289	-1,698	3,804	0,601	-0,531	0,842	0,059
8	3,026	-1,440	1,719	0,226	-2,544	8,537	0,707	0,175	0,091	0,003
9	2,179	-1,778	2,620	0,666	-1,233	2,005	0,320	-0,172	0,089	0,006
10	2,017	-1,448	1,739	0,515	-1,333	2,344	0,437	0,217	0,141	0,012
11	2,841	1,500	1,864	0,279	-0,842	0,935	0,088	0,590	1,042	0,043
12	2,315	0,788	0,514	0,116	1,072	1,516	0,214	0,373	0,415	0,026
13	1,411	-0,416	0,143	0,087	1,279	2,157	0,821	-0,062	0,011	0,002
14	2,078	0,179	0,027	0,007	1,930	4,914	0,863	0,664	1,319	0,102
15	1,442	-0,520	0,224	0,130	1,172	1,813	0,661	0,449	0,603	0,097
16	1,299	-0,524	0,227	0,163	0,695	0,638	0,287	0,780	1,818	0,360
17	3,181	-0,069	0,004	0,000	1,935	4,937	0,370	2,305	15,888	0,525
18	2,362	-1,217	1,227	0,265	0,934	1,151	0,156	1,710	8,747	0,524
19	1,865	-1,642	2,234	0,775	-0,361	0,172	0,037	0,322	0,311	0,030
20	1,840	-1,644	2,240	0,799	-0,056	0,004	0,001	0,673	1,354	0,134
21	1,150	-1,047	0,908	0,829	-0,411	0,223	0,128	-0,185	0,102	0,026
22	1,533	0,448	0,166	0,085	-0,411	0,223	0,072	0,628	1,178	0,168
23	1,240	-0,214	0,038	0,030	-1,196	1,887	0,931	0,078	0,018	0,004
24	2,629	1,066	0,941	0,164	-1,951	5,023	0,551	0,833	2,075	0,100
25	1,725	0,859	0,612	0,248	-1,329	2,331	0,594	0,032	0,003	0,000
26	1,877	1,347	1,504	0,515	-1,009	1,344	0,289	-0,068	0,014	0,001
27	3,587	3,097	7,950	0,745	1,168	1,799	0,106	1,264	4,775	0,124
28	0,000	0,000	0,000	0,406	0,000	0,000	0,278	0,000	0,000	0,005
29	1,670	1,445	1,732	0,749	0,395	0,206	0,056	-0,097	0,028	0,003
30	1,670	1,445	1,732	0,749	0,395	0,206	0,056	-0,097	0,028	0,003
31	2,503	-2,189	3,970	0,764	0,348	0,160	0,019	0,208	0,129	0,007
32	1,420	-0,601	0,299	0,179	0,678	0,606	0,228	-0,026	0,002	0,000
33	1,844	-0,296	0,073	0,026	1,432	2,704	0,603	0,580	1,007	0,099
34	3,906	-3,812	12,042	0,952	0,224	0,066	0,003	-0,653	1,274	0,028
35	1,624	-0,659	0,360	0,165	0,651	0,559	0,161	-0,710	1,508	0,191
36	2,766	-0,753	0,470	0,074	2,062	5,609	0,556	-1,677	8,408	0,368
37	4,880	4,490	16,712	0,847	1,634	3,521	0,112	-0,700	1,464	0,021
38	1,213	-1,100	1,003	0,822	0,092	0,011	0,006	-0,189	0,107	0,024
39	2,216	0,435	0,157	0,039	2,130	5,985	0,924	0,137	0,056	0,004
40	2,075	-0,249	0,051	0,014	1,767	4,121	0,726	-0,776	1,800	0,140
41	2,868	-0,695	0,401	0,059	2,155	6,125	0,564	-1,404	5,896	0,240
42	1,806	-1,748	2,534	0,937	0,178	0,042	0,010	-0,135	0,055	0,006
43	2,247	-1,992	3,288	0,786	0,951	1,192	0,179	-0,095	0,027	0,002
44	1,815	-1,420	1,671	0,612	-0,832	0,913	0,210	0,435	0,567	0,058
45	1,961	-0,159	0,021	0,007	-1,650	3,590	0,707	-0,938	2,633	0,229
46	1,710	-0,869	0,626	0,258	-1,036	1,417	0,367	-0,540	0,873	0,100
47	1,405	0,989	0,810	0,495	-0,813	0,872	0,335	-0,137	0,056	0,010
48	1,738	0,954	0,754	0,301	-0,768	0,778	0,195	0,531	0,842	0,093
49	3,649	2,784	6,424	0,582	-1,699	3,809	0,217	-0,407	0,496	0,012
50	1,787	1,242	1,279	0,483	-0,189	0,047	0,011	0,262	0,206	0,022
51	3,214	2,451	4,980	0,582	-0,878	1,016	0,075	0,227	0,154	0,005
52	2,496	0,550	0,251	0,049	0,893	1,051	0,128	-2,116	13,394	0,719
53	1,508	0,559	0,259	0,137	0,432	0,246	0,082	-1,315	5,169	0,760
54	0,967	0,176	0,026	0,033	-0,006	0,000	0,000	-0,795	1,890	0,676

### Variables (Polluants)

	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
NO2	0,803	28,847	0,645	-0,079	0,444	0,006	0,461	34,342	0,213
NH3	0,569	14,509	0,324	-0,672	32,196	0,452	0,106	1,809	0,011
HNO3	0,681	20,775	0,464	0,477	16,205	0,227	-0,457	33,744	0,209
SO2	0,274	3,348	0,075	0,838	50,012	0,702	0,350	19,838	0,123
O3	0,852	32,520	0,727	-0,127	1,143	0,016	-0,252	10,266	0,064

## Document 4 : Résultats de l'ACP pour le site trafic de Cotonou

Call:

PCA(X = Trafic Cotonou)

### Eigenvalues (valeurs propres)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Variance	2,301	1,562	0,506	0,346	0,285
% of var.	46,028	31,233	10,116	6,918	5,706
Cumulative % of var.	46,028	77,260	87,376	94,294	100,000

### Individuals (Prélèvements)

	Dist	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
1	2,886	1,403	1,475	0,236	2,509	6,949	0,756	-0,250	0,213	0,008
2	4,702	2,568	4,939	0,298	3,777	15,747	0,645	-0,078	0,020	0,000
3	2,621	1,605	1,930	0,375	1,270	1,782	0,235	0,986	3,316	0,142
4	1,723	-1,122	0,943	0,424	0,128	0,018	0,006	0,905	2,793	0,276
5	1,412	-1,067	0,853	0,571	-0,493	0,269	0,122	0,271	0,250	0,037
6	1,307	-0,031	0,001	0,001	-0,429	0,203	0,108	0,342	0,399	0,069
7	1,616	-0,975	0,712	0,364	0,914	0,922	0,320	0,795	2,152	0,242
8	0,000	0,000	0,000	0,335	0,000	0,000	0,142	0,000	0,000	0,052
9	3,067	-1,720	2,217	0,315	2,042	4,605	0,444	1,166	4,634	0,145
10	2,544	-2,058	3,174	0,655	0,476	0,250	0,035	1,189	4,823	0,219
11	3,452	-1,759	2,318	0,260	2,525	7,038	0,535	1,519	7,861	0,194
12	1,645	-0,157	0,019	0,009	0,913	0,921	0,308	1,325	5,982	0,649
13	3,560	-1,320	1,306	0,138	3,034	10,162	0,726	1,122	4,291	0,099
14	1,004	-0,096	0,007	0,009	0,120	0,016	0,014	-0,917	2,864	0,833
15	1,684	-1,021	0,781	0,368	0,365	0,147	0,047	-0,767	2,004	0,207
16	1,202	-1,021	0,781	0,722	-0,608	0,408	0,256	0,169	0,097	0,020
17	1,914	-1,259	1,187	0,432	-0,467	0,241	0,059	-1,186	4,792	0,384
18	0,828	-0,251	0,047	0,092	-0,709	0,556	0,734	0,340	0,394	0,169
19	1,994	-1,973	2,918	0,980	-0,093	0,009	0,002	-0,222	0,168	0,012
20	1,396	-1,319	1,303	0,893	0,063	0,004	0,002	-0,108	0,040	0,006
21	2,577	-2,262	3,832	0,770	0,117	0,015	0,002	-0,700	1,670	0,074
22	1,173	-0,687	0,354	0,343	0,350	0,135	0,089	-0,625	1,334	0,284
23	1,151	0,791	0,469	0,473	-0,181	0,036	0,025	-0,412	0,579	0,128
24	1,130	-0,420	0,132	0,138	0,822	0,746	0,529	-0,430	0,631	0,145
25	2,439	1,849	2,562	0,575	0,914	0,922	0,140	-1,185	4,783	0,236
26	4,047	2,116	3,353	0,273	2,875	9,129	0,505	-1,216	5,044	0,090
27	3,227	2,781	5,794	0,743	-0,239	0,063	0,005	0,032	0,004	0,000
28	2,836	2,296	3,948	0,655	1,476	2,404	0,271	-0,590	1,187	0,043
29	1,554	0,849	0,540	0,299	-0,395	0,172	0,065	-0,337	0,386	0,047
30	1,494	-1,084	0,880	0,527	-0,119	0,016	0,006	-0,595	1,207	0,159
31	1,708	-1,278	1,224	0,560	-0,378	0,158	0,049	-0,252	0,216	0,022
32	1,791	-1,025	0,786	0,327	-0,969	1,037	0,293	0,117	0,047	0,004
33	1,145	0,514	0,198	0,202	-0,760	0,638	0,440	0,196	0,131	0,029
34	1,323	0,148	0,016	0,013	-0,560	0,346	0,179	0,834	2,368	0,397
35	0,651	0,189	0,027	0,085	0,265	0,077	0,165	0,528	0,949	0,657
36	1,452	1,320	1,305	0,826	-0,013	0,000	0,000	-0,391	0,520	0,072
37	2,332	1,633	1,999	0,491	1,121	1,387	0,231	-0,766	1,999	0,108
38	0,843	-0,029	0,001	0,001	-0,605	0,404	0,515	-0,330	0,371	0,153
39	2,277	-1,409	1,488	0,383	-1,569	2,718	0,475	0,039	0,005	0,000
40	1,958	-0,917	0,630	0,219	-1,541	2,621	0,619	0,240	0,196	0,015
41	2,499	-1,726	2,231	0,477	-1,576	2,744	0,398	-0,520	0,923	0,043
42	1,705	-0,977	0,715	0,328	-1,199	1,587	0,494	-0,642	1,406	0,142
43	1,925	-1,783	2,383	0,858	-0,329	0,120	0,029	-0,410	0,572	0,045
44	1,783	-1,507	1,701	0,714	-0,511	0,288	0,082	-0,500	0,853	0,079
45	2,374	-2,108	3,328	0,788	0,089	0,009	0,001	-1,055	3,792	0,197
46	1,286	-0,560	0,235	0,189	-0,647	0,462	0,253	-0,908	2,809	0,499
47	0,897	0,035	0,001	0,002	-0,251	0,069	0,078	-0,672	1,538	0,560
48	0,681	-0,254	0,048	0,140	-0,515	0,292	0,571	-0,167	0,095	0,060
49	1,529	0,868	0,565	0,323	-0,841	0,781	0,303	0,571	1,112	0,140
50	2,078	1,841	2,540	0,785	0,100	0,011	0,002	-0,145	0,072	0,005
51	4,120	3,689	10,193	0,801	-1,204	1,600	0,085	-0,517	0,912	0,016
52	3,068	2,088	3,266	0,463	-1,689	3,151	0,303	1,213	5,018	0,156
53	0,747	0,599	0,269	0,644	-0,112	0,014	0,022	-0,188	0,121	0,063
54	4,080	3,009	6,783	0,544	-2,371	6,205	0,338	1,385	6,540	0,115
55	2,644	1,748	2,288	0,437	-1,750	3,381	0,438	0,205	0,143	0,006
56	1,752	1,099	0,906	0,394	-0,938	0,972	0,287	0,802	2,190	0,209
57	3,442	2,085	3,257	0,367	-2,136	5,039	0,385	0,527	0,945	0,023
58	2,235	-1,948	2,843	0,760	-0,066	0,005	0,001	0,263	0,236	0,014

### Variables (Polluants)

	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
NO2	0,682	20,207	0,465	0,594	22,588	0,353	-0,192	7,270	0,037
NH3	0,403	7,072	0,163	0,766	37,529	0,586	0,449	39,822	0,201
HNO3	0,712	22,014	0,507	-0,539	18,623	0,291	-0,024	0,113	0,001
SO2	0,871	32,929	0,758	0,043	0,119	0,002	-0,330	21,561	0,109
O3	0,640	17,777	0,409	-0,575	21,141	0,330	0,397	31,234	0,158

**Tableau A2.1:** Concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic de Bamako

N°	Quinzaine	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
1	Sep-13d	8,2	18,5	1,1	1,2	8,5
2	Sep-13f	8,6	21,7	1,8	3,8	18,8
3	Oct-13d	11,5	17,0	0,8	2,0	17,4
4	Oct-13f	14,1	32,9	0,8	5,3	19,5
5	Nov-13d	20,4	48,5	0,3	5,5	10,5
6	Nov-13f	17,6	39,4	0,3	4,7	11,9
7	Dec-13d	12,7	39,3	0,3	5,5	9,0
8	Dec-13f	12,3	38,9	0,4	6,8	10,1
9	Jan-14d	15,5	59,9	2,7	5,6	8,3
10	Jan-14f	10,8	40,3	0,2	5,3	10,1
11	Fév-14d	8,6	42,4	1,4	6,0	17,3
12	Fev-14f	8,1	34,2	3,2	4,0	8,8
13	Mars-14d	17,3	56,6	2,0	6,6	9,5
14	Mars-14f	12,1	48,0	1,8	6,8	13,0
15	Avr-14d	12,8	41,9	0,6	6,2	8,3
16	Avr-14f	15,0	38,4	1,8	5,3	25,8
17	Mai-14d	10,8	35,1	1,7	2,8	23,3
18	Mai-14f	14,6	19,2	0,8	2,8	20,0
19	Juin-14f	8,0	11,5	1,0	0,6	14,7
20	Juin-14f	*	*	*	*	*
21	Juil-14d	11,3	13,5	2,2	2,2	20,1
22	Juil-14f	10,8	13,9	1,8	1,8	18,9
23	Aout-14d	9,7	11,9	1,4	0,5	16,7
24	Aout-14f	13,2	20,1	1,9	1,3	13,0
25	Sep-14d	11,5	19,6	1,7	2,7	12,2
26	Sep-14f	11,7	23,7	1,0	2,3	19,4
27	Oct-14d	15,0	40,3	0,9	3,0	20,3
28	Oct-14f	10,8	23,4	0,8	2,9	10,9
29	Nov-14d	16,4	49,1	1,0	5,5	10,2
30	Nov-14f	24,5	63,9	1,0	8,6	17,0
31	Dec-14d	7,5	16,5	*	6,3	6,6
32	Dec-14f	6,6	18,1	*	6,0	6,4
33	Jan-15d	7,8	24,4	*	8,6	7,5
34	Jan-15f	14,6	46,5	0,1	11,1	7,3
35	Fev-15d	21,3	65,2	2,0	12,5	15,9
36	Fev-15f	4,3	3,7	0,6	3,8	5,7
37	Mars-15d	16,0	53,7	1,6	8,7	8,6
38	Mars-15f	5,9	8,3	1,8	4,4	7,0
39	Avr-15d	16,5	58,1	0,4	6,8	7,6
40	Avr-15f	18,7	50,4	0,5	6,8	13,8
41	Mai-15d	18,5	24,1	0,7	3,0	22,7
42	Mai-15f	8,5	18,0	0,2	2,0	11,4
43	Juin-15d	10,3	4,5	0,9	4,5	23,2
44	Juin-15f	16,3	10,1	1,6	4,6	19,8
45	Juil-15d	17,5	10,6	2,8	5,1	25,5
46	Juil-15f	5,1	1,6	1,6	6,8	13,7
47	Aout-15d	12,8	22,2	0,5	5,5	16,1
48	Aout-15f	11,9	21,8	0,8	5,8	13,8
49	Sept-15d	5,2	8,6	0,7	3,1	4,4
50	Sept-15f	20,3	44,3	1,4	1,9	14,9
51	Oct-15d	10,6	25,4	1,1	6,0	11,9
52	Oct-15f	12,7	16,9	0,9	4,5	19,0
53	Nov-15d	23,8	33,3	0,6	5,7	16,8
54	Nov-15f	17,5	43,2	0,4	8,0	10,5
55	Dec-15d	18,1	36,8	0,6	5,4	8,1
56	Dec-15f	11,0	26,7	0,4	5,2	7,0
57	Jan-16d	18,4	54,6	0,4	4,6	9,6
58	Jan-16f	12,0	36,6	0,3	6,8	8,0
59	Fev-16d	10,3	24,5	0,4	8,6	6,7
60	Fev-16f	7,8	18,2	0,3	6,3	5,9
61	Mars-16d	8,1	20,4	0,4	7,7	7,2
62	Mars-16f	12,2	22,7	0,4	7,2	8,1
63	Avr-16d	18,0	41,0	0,4	5,5	12,9
64	Avr-16f	13,3	23,4	0,8	4,8	13,7
65	Mai-16d	14,2	24,1	1,3	3,6	19,9
66	Mai-16f	10,3	14,1	1,5	2,4	20,4
67	Jun-16d	6,3	12,4	9,4	11,5	29,3
68	Jun-16f	3,0	12,7	2,2	0,9	22,1
69	Juil-16d	5,2	10,6	4,3	7,8	12,8
70	Juil-16f	7,4	11,2	1,2	6,3	13,6
71	Aou-16d	17,3	10,3	1,5	10,4	21,8
72	Aou-16f	3,8	3,5	0,3	1,3	6,3
73	Sep-16d	12,3	18,5	3,3	10,7	20,2
74	Sep-16f	9,9	13,3	0,3	1,4	17,8
75	Oct-16d	9,6	21,5	1,9	4,9	18,0
76	Oct-16f	11,9	18,8	0,5	2,4	17,0
77	Nov-16d	14,8	35,1	0,2	5,1	14,6
78	Nov-16f	19,2	47,4	0,2	7,4	10,9
79	Dec-16d	17,3	29,6	*	6,1	7,8
80	Dec-16f	10,6	20,3	*	5,3	6,7
81	Jan-17d	13,3	43,7	*	9,7	9,6
82	Jan-17f	13,7	21,4	0,1	9,2	7,7
83	Fev-17d	18,9	41,7	0,2	12,5	6,2
84	Fev-17f	20,2	42,4	0,1	11,4	8,7
85	Mar-17d	41,5	103,0	0,4	12,7	12,9
86	Mar-17f	13,7	23,9	*	5,0	7,8

**Tableau A2.2:** Concentrations moyennes bimensuelles intégrées sur quinze jours des polluants gazeux mesurés sur le site trafic de Yaoundé.

N°	Quinzaine	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
1	Oct-13f	15,9	14,9	0,5	0,4	5,9
2	Nov-13d	17,7	20,6	0,7	0,8	6,6
3	Nov-13f	25,3	21,6	0,9	1,0	9,5
4	Déc-13d	20,2	17,1	0,4	1,1	7,0
5	Déc-13f	21,8	23,0	0,8	0,9	7,2
6	Jan-14d	24,6	26,6	1,3	1,3	12,3
7	Jan-14f	27,4	30,1	1,6	1,2	15,3
8	Fév-14d	12,3	10,2	0,5	0,4	7,7
9	Fév-14f	22,5	22,3	1,6	0,5	11,2
10	Mar-14d	20,6	25,1	1,7	0,4	10,0
11	Mar-14f	*	*	*	*	*
12	Avr-14d	6,7	4,9	0,3	0,1	3,7
13	Avr-14f	16,9	15,4	0,3	0,3	4,7
14	Mai-14d	12,8	13,0	0,6	0,5	4,3
15	Mai-14f	12,9	10,6	0,2	0,3	4,8
16	Juin-14d	16,4	16,6	0,9	0,6	5,0
17	Juin-14f	12,2	12,6	1,0	0,4	2,9
18	Juil-14d	16,4	17,9	4,4	0,7	5,4
19	Juil-14f	12,0	14,0	1,2	0,6	3,9
20	Aout-14d	17,1	16,9	0,7	0,4	3,3
21	Aout-14f	13,1	16,0	0,6	0,8	3,9
22	Sept-14d	*	*	*	*	*
23	Sept-14f	*	*	*	*	*
24	Oct-14d	*	*	*	*	*
25	Oct-14f	*	*	*	*	*
26	Nov-14d	*	*	*	*	*
27	Nov-14f	*	*	*	*	*
28	Dec-14d	*	*	*	*	*
29	Dec-14f	*	*	*	*	*
30	Jan-15d	*	*	*	*	*
31	Jan-15f	*	*	*	*	*
32	Fev-15d	20,5	26,7	2,5	1,0	11,3
33	Fev-15f	16,3	22,1	1,1	0,9	8,9
34	Mars-15d	19,7	21,6	1,3	0,9	10,4
35	Mars-15f	22,6	26,3	1,0	1,2	9,8
36	Avr-15d	52,1	64,9	3,8	2,4	16,2
37	Avr-15f	9,1	9,1	0,1	0,3	1,8
38	Mai-15d	10,7	11,7	0,2	0,6	2,2
39	Mai-15f	10,4	15,4	0,2	0,3	2,8
40	Juin-15d	19,7	23,8	0,5	2,2	3,7
41	Juin-15f		5,3	0,0	0,0	
42	Juil-15d	16,3	24,1	0,5	1,7	3,6
43	Juil-15f	12,3	17,9	0,4	1,6	3,2
44	Aout-15d	15,5	22,8	0,4	2,0	3,8
45	Aout-15f	13,6	16,3	0,5	1,6	3,8
46	Sept-15d	15,1	17,5	0,4	1,4	5,7
47	Sept-15f	20,0	24,9	0,5	1,1	5,4
48	Oct-15d	16,7	20,6	0,5	1,3	4,2
49	Oct-15f	13,9	19,9	0,6	0,3	6,5
50	Nov-15d	14,3	15,9	0,7	0,5	4,8
51	Nov-15f	15,4	21,5	0,6	0,9	6,1
52	Dec-15d	26,4	19,0	0,8	1,0	7,4
53	Dec-15f	24,6	20,2	0,9	1,2	7,7
54	Jan-16d	22,6	23,4	1,0	0,8	12,5
55	Jan-16f	22,3	19,3	0,9	0,7	8,0
56	Fev-16d	21,5	22,2	0,8	0,5	10,9
57	Fev-16f	20,1	22,5	0,6	0,4	9,8
58	Mars-16d	23,5	34,0	0,4	0,2	6,7
59	Mars-16f	18,0	20,9	0,5	0,4	5,6
60	Avr-16d	16,7	22,0	0,7	0,7	9,0
61	Avr-16f	18,0	24,4	0,8	0,7	6,1
62	Mai-16d	21,2	24,8	0,9	0,8	6,1
63	Mai-16f	15,2	22,9	0,7	0,9	4,9
64	Juin-16d	18,4	14,0	1,0	1,1	8,6
65	Juin-16f	17,4	15,9	1,0	0,7	6,5
66	Juil-16d	15,9	2,8	0,4	0,4	6,3
67	Juil-16f	14,7	13,1	*	*	6,2
68	Aou-16d	14,6	4,2	0,6	0,5	5,6
69	Aou-16f	12,4	2,8	0,5	0,8	4,7
70	Sep-16d	17,6	9,7	0,6	0,9	7,1
71	Sep-16f	15,9	7,3	1,1	1,2	5,4
72	Oct-16d	*	7,2	0,8	0,1	*
73	Oct-16f	20,5	14,4	2,0	1,0	8,3
74	Nov-16d	19,7	21,9	1,2	0,8	6,8
75	Nov-16f	13,8	6,1	0,5	0,4	5,5
76	Dec-16d	22,9	10,9	1,2	0,7	7,3
77	Dec-16f	19,7	12,1	0,7	0,5	9,7
78	Jan-17d	20,8	35,1	1,1	0,5	9,4

### **Annexe III**

**Tableau A3.1:** Concentrations moyennes bimensuelles en ppb des polluants gazeux sur les sites d'Abidjan du 15 Décembre 2015 au 15 Février 2016

Sites de mesures	15 Décembre 2015 - 1 Janvier 2016					1 Janvier 2016 - 15 Janvier 2016					15 Janvier 2016 - 1 Février 2016					1 Février 2016 -15 Février 2016				
	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>
SA1	30,8	43,3	5,4	0,9	10,1	18,9	26,7	2,1	1,3	12,0	19,7	31,0	2,1	1,1	10,6	13,9	23,3	0,9	1,2	12,6
SA2	13,1	31,6	7,8	0,7	10,4	12,1	28,2	4,9	0,6	13,0	10,8	25,4	6,1	0,6	13,3	10,4	25,1	8,2	0,7	13,0
SA3	15,7	28,2	8,1	0,5	7,2	11,3	23,7	5,4	0,3	9,1	10,9	21,9	6,6	0,4	9,0	10,9	20,2	8,8	0,5	10,3
SA5	33,6	22,6	4,4	0,6	6,9	21,2	19,0	2,0	1,0	8,2	21,1	26,7	2,1	1,1	8,0	19,7	23,8	4,0	1,9	7,9
SA6	8,0	22,5	0,7	0,6	14,0	5,3	17,4	0,3	1,0	21,1	6,5	19,0	0,5	1,0	22,4	7,6	16,4	0,2	0,9	17,6
SA7	23,4	58,8	2,5	0,7	8,7	16,0	28,2	1,6	1,5	12,8	16,7	32,2	1,0	0,6	12,0	13,9	28,8	0,9	1,8	15,9
SA8	24,6	37,0	2,6	0,7	7,4	20,3	24,7	1,3	1,2	11,3	18,6	31,4	1,0	0,8	9,8	18,0	29,4	0,7	1,6	13,3
SA9	26,7	26,5	2,5	0,9	10,9	17,7	16,7	1,7	1,4	14,8	19,6	20,9	2,4	1,2	11,0	15,7	22,3	0,5	1,7	12,1
SA10	19,7	24,5	2,3	0,8	9,0	16,2	20,5	1,7	0,9	11,6	17,6	22,9	1,5	0,7	7,0	17,2	15,5	0,9	0,6	7,7
SA11	25,9	19,1	2,9	0,5	11,0	23,9	21,8	1,2	0,8	9,6	22,7	16,9	1,5	0,6	11,9	27,6	20,7	1,9	1,0	5,8
SA12	17,3	18,4	0,8	0,6	13,4	12,2	19,4	0,5	1,0	13,7	12,0	24,3	0,7	0,8	14,0	8,4	33,5	0,6	1,5	15,1
SA13	22,8	28,9	1,9	0,8	9,1	16,9	24,6	1,5	1,3	16,1	15,8	29,6	1,7	1,1	13,0	18,3	24,4	1,8	1,8	13,5
SA14	21,5	57,6	1,6	0,5	5,3	16,8	61,3	1,1	0,8	12,4	15,8	80,5	0,6	0,4	6,9	16,3	71,5	1,1	0,7	5,9
SA15	13,3	37,5	0,4	0,9	16,1	11,3	36,9	0,6	1,3	15,2	9,9	43,3	1,1	1,2	19,2	13,6	38,6	2,5	1,8	19,6
SA16	18,8	83,9	1,0	1,1	9,9	17,8	107,5	1,3	1,0	12,8	17,6	107,6	1,4	1,6	7,7	18,9	109,4	0,8	1,0	10,3
SA17	21,0	16,8	1,7	1,2	11,2	11,6	16,0	0,8	1,3	19,1	12,5	25,6	0,7	1,0	16,4	9,4	31,5	1,0	2,0	20,4
SA19	5,7	47,2	2,3	0,2	5,4	4,9	45,1	2,4	0,2	7,1	5,2	42,0	3,8	0,2	7,0	5,6	41,7	4,9	0,2	7,8
SA24	8,7	38,5	3,8	0,2	4,0	7,9	33,4	5,1	0,2	5,5	7,0	30,7	6,0	0,3	5,4	7,1	26,2	4,0	0,3	5,6
SA25	2,9	12,4	1,9	0,4	10,1	2,5	8,8	1,4	0,7	12,6	2,6	7,7	2,1	0,9	12,8	2,6	7,5	2,0	0,6	13,7
SA26	7,0	18,8	0,3	0,7	15,9	6,8	11,0	0,4	0,1	21,4	6,0	15,0	0,5	0,9	18,9	7,7	12,3	0,4	1,5	20,2
SA27	7,4	15,6	0,3	0,4	10,9	5,3	11,3	0,4	0,8	14,5	6,0	17,5	0,6	0,8	15,3	5,1	9,9	0,3	0,5	13,9

**Tableau A3.2:** Concentrations moyennes bimensuelles en ppb des polluants gazeux sur les sites d'Abidjan du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Sites de mesures	15 Décembre 2016 - 1 Janvier 2017					1 janvier 2017 - 15 Janvier 2017					15 Janvier 2017 - 1 Février 2017					1 Février 2017 - 15 Février 2017				
	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
SA1	17,46	33,86	1,28	2,31	9,96	14,12	27,90	1,54	1,68	13,62	12,17	20,49	1,66	1,20	14,76	15,75	23,93	1,07	1,41	12,56
SA2	12,41	73,56	0,65	0,34	8,01	8,36	45,68	0,33	0,30	10,10	7,22	36,78	0,59	0,36	9,05	7,02	33,95	0,77	0,58	12,24
SA3	16,80	25,73	0,71	0,96	8,81	18,04	21,62	1,54	1,91	10,73	17,36	20,65	1,45	1,32	10,77	22,23	19,73	1,54	0,93	12,10
SA4	21,79	22,68	0,60	0,87	9,70	18,44	26,11	0,77	1,00	10,43	15,42	19,98	1,24	1,15	11,66	14,81	21,89	1,22	1,27	12,75
SA5	23,47	17,80	0,53	3,32	6,12	22,93	18,25	0,49	2,09	7,69	16,65	12,29	0,92	1,68	8,11	22,20	13,82	0,73	2,45	8,16
SA6	6,15	16,79	0,39	0,56	14,16	6,35	15,87	0,65	0,23	19,85	5,72	12,09	1,05	0,68	15,58	4,45	9,17	1,16	0,43	19,21
SA7	20,24	28,08	0,76	1,46	10,72	14,63	28,88	0,79	0,98	13,85	13,16	18,80	1,25	1,23	13,30	15,15	19,68	2,67	2,77	13,68
SA8	19,89	56,32	0,50	0,68	8,53	19,79	44,60	0,64	0,74	7,93	15,33	45,68	0,50	0,76	7,51	17,35	41,76	2,10	1,61	12,88
SA9	39,00	28,24	0,57	5,12	4,78	37,27	32,34	0,55	3,47	5,62	37,07	28,12	0,60	3,40	4,63	41,77	26,43	0,91	5,88	6,14
SA10	14,28	37,51	0,66	0,80	8,26	17,28	53,65	0,33	0,76	10,06	16,68	68,14	0,62	0,88	6,42	14,10	65,20	0,68	0,80	7,92
SA11	25,46	14,31	0,86	1,59	8,36	29,25	19,70	0,61	1,95	5,96	28,75	20,43	0,74	1,57	4,44	25,26	25,17	0,69	1,11	9,65
SA12	13,94	11,38	1,36	1,70	16,13	14,95	9,92	1,21	1,52	17,61	12,21	12,61	2,22	1,81	27,42	8,87	9,70	1,47	1,08	19,21
SA13	14,68	12,94	1,69	2,15	15,60	13,55	16,01	0,99	1,00	12,81	10,88	11,65	0,59	0,68	8,67	14,79	14,17	1,42	0,76	14,01
SA14	16,61	29,50	1,35	2,19	16,51	17,33	30,64	1,50	1,92	14,10	15,96	25,49	2,06	2,09	13,21	11,87	28,34	1,32	1,32	16,93
SA15	12,61	28,07	1,27	0,79	14,10	12,14	41,67	1,26	0,73	13,21	12,62	28,54	1,63	0,97	16,93	11,82	72,01	1,96	1,31	8,87
SA16	19,24	129,80	1,25	0,79	8,24	23,12	122,99	1,87	1,53	11,40	21,21	115,88	1,10	0,82	8,96	20,86	100,56	1,54	0,92	15,15
SA17	5,37	7,57	0,54	0,35	14,77	5,60	11,85	0,83	0,34	14,88	6,26	9,01	0,90	0,46	17,38	4,59	10,91	0,68	0,40	15,98
SA18	35,81	26,54	0,62	3,74	6,31	36,69	21,99	0,76	4,16	8,05	27,86	22,08	0,65	2,88	8,61	33,59	22,05	0,77	3,50	7,07
SA19	10,48	27,27	1,06	2,29	6,57	11,40	27,51	0,67	1,06	7,65	10,62	25,78	0,62	0,65	8,36	10,40	26,05	0,88	1,22	10,35
SA20	14,77	26,07	0,87	1,49	11,46	18,37	32,18	0,98	1,76	9,84	17,15	25,09	1,15	1,93	16,32	14,43	30,76	1,07	1,72	13,72
SA21	22,17	46,65	0,59	1,58	6,98	25,00	46,49	0,59	2,08	5,50	20,71	41,82	0,63	1,93	8,66	22,62	56,94	0,62	1,63	5,88
SA22	10,87	29,15	0,60	0,61	11,34	8,99	30,16	0,54	0,24	12,46	8,41	23,84	0,47	0,68	10,45	9,85	25,91	1,40	0,68	13,17
SA23	16,16	26,50	0,78	0,41	9,93	13,02	26,85	0,96	0,62	9,70	10,21	17,73	1,04	0,51	11,03	10,01	21,34	1,25	0,51	13,03

**Tableau A3.3:** Concentrations moyennes bimensuelles en ppb des polluants gazeux sur les sites de Cotonou du 15 Décembre 2016 au 15 Février 2017.

Sites de mesures	15 Décembre 2016 - 1 Janvier 2017					1 Janvier 2017 - 15 Janvier 2017					15 Janvier 2017 - 1 Février 2017					1 Février 2017 - 15 Février 2017				
	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
SC1	23,06	22,18	1,66	2,08	17,83	20,67	18,72	2,66	2,96	21,74	18,95	18,41	2,53	1,31	23,95	17,81	18,72	1,63	1,52	15,26
SC2	7,36	6,96	0,99	0,56	18,36	13,17	10,04	1,62	0,50	24,25	6,44	13,64	1,09	0,20	24,03	7,12	11,72	1,56	0,33	20,19
SC3	5,63	7,36	0,96	0,48	28,97	5,82	7,90	1,50	0,49	33,77	5,36	7,22	1,38	0,24	38,94	4,91	9,98	1,07	0,32	32,18
SC4	14,71	30,32	0,88	0,39	13,66	14,62	33,27	1,57	0,57	16,48	12,35	29,18	1,79	0,62	20,37	0,00	45,27	1,09	0,17	23,85
SC5	9,35	13,99	1,26	0,81	16,16	11,02	17,07	1,06	0,74	21,80	11,84	19,54	1,60	0,37	22,34	9,63	18,81	1,26	0,92	18,69
SC6	15,37	17,28	1,22	0,83	12,37	16,69	19,38	1,02	0,76	23,85	16,01	19,54	1,42	0,73	15,97	15,28	18,81	0,85	0,58	16,61
SC7	13,63	11,31	0,88	0,44	15,22	15,65	12,57	2,03	1,03	12,14	15,18	13,51	1,47	0,84	19,45	13,46	14,67	1,08	0,69	14,98
SC8	10,95	19,69	1,30	0,29	14,23	9,83	22,91	1,14	0,23	23,58	9,60	22,55	1,28	0,35	22,51	7,81	22,69	0,77	0,40	20,45

