



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et

de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0342/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0416000623

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT
(LSTE)

Soutenu publiquement
Le : 27-02-2020

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**ANALYSE DES VARIATIONS ET
TENDANCES DES GAZ AZOTES NO₂ ET NH₃
PAR MESURES SATELLITAIRES A LAMTO
(COTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

SOUMAHORO Aboulaye

JURY

Président : Mme. TRAORE Karidia, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

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

Examineur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0342/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0416000623

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT
(LSTE)

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**ANALYSE DES VARIATIONS ET
TENDANCES DES GAZ AZOTES NO₂ ET NH₃
PAR MESURES SATELLITAIRES A LAMTO
(COTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

SOUMAHORO Aboulaye

JURY

Président : Mme. TRAORE Karidia, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

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

Examineur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement
Le : 27-02-2020

TABLE DES MATIERES

	Pages
DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
INTRODUCTION.....	
PARTIE 1 : GENERALITES	
1.1 Cycle biogéochimique de l'azote.....	4
1.1.1. Cycle de l'azote	4
1.1.2. Sources anthropiques et impacts des activités humaines sur le cycle de l'azote	6
1.2. Principales sources de NO ₂ et NH ₃ en zone rurale africaine	7
1.3. Sources, transformations et impacts de NO ₂ et NH ₃	8
1.3.1. Dioxyde d'azote (NO ₂).....	8
1.3.2. Ammoniac (NH ₃)	10
1.4. Présentation d'instruments de mesures satellitaires	12
1.4.1. Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI)	12
1.4.2. L'instrument OMI	14
1.4.3. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).....	16
1.5. Description du site d'étude	16
1.5.1. Présentation de la station de Lamto.....	16
1.5.2. Contexte climatique.....	18
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES	
2.1. Matériel.....	19
2.1.1. Données	19

2.1.2. Logiciels utilisés.....	19
2.2. Méthodes.....	20
2.2.1. Test de Mann-Kendall – Pente de Sen.....	20
2.2.2. Test saisonnier de Kendall – Estimateur saisonnier de Kendall	22
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	
3.1. Résultats.....	23
3.1.1. Evolutions des profils verticaux de NO ₂ et NH ₃ à Lamto.....	23
3.1.2. Tendances des colonnes verticales de NO ₂ et NH ₃ à Lamto.....	27
3.2. Discussion.....	30
3.2.1. Evolutions des profils verticaux de NO ₂ et NH ₃ à Lamto.....	30
3.2.2 Tendances des colonnes verticales de NO ₂ et NH ₃ à Lamto.....	31
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	
REFERENCES.....	
ANNEXES	

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à :

mon père SOUMAHORO Moussa et ma mère TRAORE Djinimba,

mes frères et Sœurs,

la grande famille Meité,

et à l'AEEMCI.

REMERCIEMENTS

Ce travail qui est le courant des cursus du 1^{er} et 2nde cycles n'aurait pu arriver à son terme sans le soutien de bon nombre de personnes. J'en oublierai certainement quelques-unes, je les prie de m'en excuser par avance.

Je remercie les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour leur dévouement dans la formation des étudiants.

J'adresse mes profonds remerciements au Directeur de l'UFR Environnement, Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur scientifique de ce mémoire pour sa disponibilité, sa patience et son encouragement.

Mes remerciements vont également à l'endroit des membres du Jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail malgré leurs nombreuses obligations.

J'exprime ma gratitude au personnel de la station géophysique de Lamto pour l'accueil chaleureux dont j'ai été l'objet lors de mon séjour à la station.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Docteur SILUE Siélé, Enseignant-Chercheur à l'Université Peleforo Gon Coulibaly de Korhogo, pour avoir accepté l'encadrement de ce travail de Master. Monsieur veuillez accepter mes vifs remerciements et une reconnaissance inconditionnelle pour l'élaboration de ce mémoire de fin de cycle.

Je voudrais témoigner ma profonde estime au Docteur OSSOHOU Money Guillaume pour m'avoir permis de bénéficier de ses compétences scientifiques et d'avoir accepté de prendre ce travail sous son aile, je lui suis très reconnaissant.

Au Docteur KOUASSI Adjon, j'adresse un chaleureux et profond remerciement pour son temps précieux qui m'a été consacré, sa générosité et les différentes possibilités matérielles et financières mises à ma disposition pour le bon déroulement de ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance au Professeur DIBI Brou, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement (LSTE) de Daloa, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein dudit laboratoire. Aux doctorants du LSTE, un grand merci pour vos conseils et encouragements.

J'adresse mes sincères remerciements aux enseignants de l'UFR Environnement pour la formation qu'ils m'ont dispensée tout au long de mon parcours universitaire.

Je remercie également mes compagnons : DRABO Souleymane, DOUMBIA Mamadou, SALIFOU Ibrahim, CISSE Moussa, ZOURE Moussa, MEITE Meke pour leurs soutiens et encouragements.

Je n'oublierai pas les encouragements de SINIYOBO Issa, CAMARA Aliman, COULIBALY Aimé, DIAKITE Moussa, DOUMBIA Manigbè, KONEAboulaye, SYLLA Zainab, la chambre 15, ainsi que tous mes frères et sœurs de l'AEEMCI.

Enfin mes remerciements vont à l'endroit de mes camarades de la 3^{ième} promotion (2015-2016) physique-chimie de l'UJLoG. Je vous souhaite tout le meilleur pour la suite.

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEEMCI	: Association des Élèves et Étudiants Musulmans de Côte d'Ivoire
CFHA	: Commission Fédérale de l'Hygiène de l'Air (Suisse)
CNES	: Centre National d'Etudes Spatiales
CO(NH₂)₂	: Carbamide (Urée)
HCO₃⁻	: Ion bicarbonate
H₂SO₄	: Acide sulfurique
HNO₃	: Acide nitrique
NH₃	: Ammoniac
NH₄⁺	: Ion ammonium
NH₄NO₃	: Nitrate d'ammonium
(NH₄)₂SO₄	: Sulfate d'ammonium
NO	: Monoxyde d'azote
NO₂	: Dioxyde d'azote
NO₃⁻	: Ion nitrate
NO_x	: Oxyde d'azote
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economique
ONU	: Organisation des Nations Unies
VCD	: Vertical Column Density

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I : Sources anthropiques d'azote	6
Tableau II : Principales menaces imputables aux rejets excessifs d'azote dans l'environnement.....	7
Tableau III : Principales catégories de sources de NO _x à l'échelle globale.....	9
Tableau IV : Sources d'émissions d'ammoniac (NH ₃) à l'échelle globale.....	11
Tableau V : Pentes de Sen (SS) et Taux de Changement (TC) de la moyenne (Moy) des VCD de NO ₂ et NH ₃ à l'échelle mensuelle.....	27
Tableau VI : Pentes de Sen (SS), p-value et Taux de Changement (TC) de la moyenne (Moy) des VCD de NO ₂ et NH ₃ à l'échelle saisonnière.....	28
Tableau VII : Pentes de Sen (SS) et p-value des minimums et maximums des VCD de NO ₂ et NH ₃ à l'échelle saisonnière.....	29
Tableau VIII : Pentes de Sen (SS), p-value et taux de changement (TC) de la moyenne (Moy) des VCD de NO ₂ et NH ₃ à l'échelle annuelle.....	29
Tableau IX : Pentes de Sen (SS) et p-value des minimums et maximums des VCD de NO ₂ et NH ₃ à l'échelle annuelle obtenus à Lamto.....	30

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Cycle de l'azote.....	4
Figure 2 : Les satellites Metop-A, Metop-B et Metop-C	13
Figure 3 : Principe de l'acquisition des données IASI par balayage transversal à la trace du satellite.....	14
Figure 4 : Principe de mesure OMI	16
Figure 5 : Localisation de la station géophysique de Lamto.	17
Figure 6 : Variation moyenne mensuelle des densités de colonnes verticales de NO ₂ et NH ₃ à Lamto sur la période 2008-2017.....	24
Figure 7 : Profils moyens annuels de NO ₂ (a) et NH ₃ (b) combinés respectivement avec les hauteurs de pluies	25
Figure 8 : Variations saisonnières des VCD de NO ₂ (a) et NH ₃ (b) durant les saisons sèches et humides sur toute la période d'étude	26
Figure 9 : Variations interannuelles des densités de colonnes verticales (VCD) de NO ₂ et NH ₃	27

INTRODUCTION

L'azote (N) est le principal composant de l'atmosphère terrestre. Il se présente sous forme de diazote (N_2) et représente 78% de la composition des gaz de l'atmosphère. L'azote dans l'atmosphère est très inerte : après avoir été converti en une forme absorbable par des moyens biologiques ou industriels, il ne peut être utilisé que par les plantes puis par les animaux (Ossohou, 2020). Toutes les formes d'azote chimiquement et biologiquement actives constituent ce qu'on appelle l'azote réactif (N_r). L'azote réactif peut subir une série de transformations dans l'air, l'eau, le sol et les organismes jusqu'à ce qu'il retrouve sa forme d'origine : c'est le cycle de l'azote (Galloway *et al.*, 2004).

Le cycle de l'azote est un cycle biologique et chimique qui décrit les transformations de l'azote et des composés azotés dans l'atmosphère. En effet, Ce cycle est composé de flux entrant et sortant d'azote liant l'atmosphère et la terre ; ce qui permet à l'azote de prendre diverses formes tant gazeuses que particulaires. Cependant, depuis le siècle dernier, les activités humaines ont gravement perturbé l'équilibre de ce cycle (Galloway *et al.*, 2008). L'agriculture, à travers la synthèse d'engrais, l'industrie, les transports et la combustion des combustibles fossiles augmentent les émissions d'azote sous forme de composés réduits (NH_3 et NH_4^+) et oxydés (NO_x , HNO_3 , N_2O et NO_3^-). Une fois l'azote émis, il sera transformé en azote réactif, puis transporté à travers l'atmosphère et l'hydrosphère par le dépôt humide de particules combinés aux précipitations, puis déposé dans les écosystèmes terrestres et aquatiques (Fagerli & Aas, 2008). Ces dépôts atmosphériques engendrent une augmentation des transferts chimiques de l'azote en formes assimilables par les organismes vivants. En effet, en conditions naturelles, l'azote constitue un élément limitant pour la croissance des plantes dans de nombreux écosystèmes terrestres. Un apport additionnel de cet élément peut alors se traduire par un dérèglement du cycle biogéochimique conduisant à des conséquences tels que l'eutrophisation des lacs et l'acidification du sol. De plus, les polluants atmosphériques azotés, tels que les oxydes d'azotes (NO_x) et l'ammoniac (NH_3) sont impliqués dans la formation d'aérosols secondaires, l'une des composantes des poussières fines ayant des effets nocifs sur l'homme. Ils contribuent par ailleurs à la dégradation de la pierre des ouvrages de construction par le biais de la formation d'aérosols qui se déposent ensuite à la surface des édifices (CFHA, 2005).

L'une des principales problématiques de l'augmentation temporelle et spatiale de cette pollution atmosphérique concerne son impact éventuel sur le fonctionnement et la structure des écosystèmes terrestres, en touchant indifféremment tous les écosystèmes.

En Afrique, les flux de dépôts et d'émissions de composés azotés sont mal quantifiés et devraient augmenter dans un proche avenir en raison des changements d'affectation des sols et de la pression anthropique. Il est prévu que le dépôt d'azote sur les écosystèmes, particulièrement sous forme humide, augmente de 50% à l'horizon 2100 (Lamarque *et al.*, 2013). En effet, la région tropicale africaine constitue une importante source de gaz (NO_2 , NH_3 et HNO_3) et particules (NO_3^- et NH_4^+) azotés à travers les émissions des feux de biomasse (feux de savane, feux de forêt), de la végétation et des sols. Il est donc impérieux de se pencher sur la question de l'azote en Afrique en générale et dans la zone de savane humide de Lamto en particulier afin de maîtriser son utilisation dans l'agriculture, l'élevage et l'agroalimentaire, et limiter les impacts sur l'environnement des milieux ruraux, urbains et périurbains. L'établissement de réseaux de surveillance à long terme, à travers les mesures satellitaires, est donc important pour comprendre et suivre la potentielle évolution des échanges entre l'atmosphère et les autres interfaces.

Les mesures satellitaires de composition chimique de l'atmosphère ont tout d'abord été utilisées à l'échelle planétaire. Elles ont permis de décrire le transport de panaches de polluants à longue distance, pour des espèces ayant une durée de vie atmosphérique de quelques jours. L'amélioration des mesures et les progrès réalisés sur l'algorithme d'analyse permettent aujourd'hui d'apporter de l'information précise aux échelles régionales voire métropolitaines. Les observations satellitaires complémentaires des réseaux de surface existants, notamment en renseignant des zones peu ou pas couvertes par les mesures in-situ, peuvent être utilisées à différents niveaux : elles peuvent servir à limiter les inventaires d'émissions de polluants, permettre une analyse fine de résultats de simulation sur de vastes régions et dans toute la colonne atmosphérique, être assimilées par les modèles pour délivrer des informations plus réalistes (Menut *et al.*, 2017).

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette présente étude dont le thème est « Analyse des variations et tendances des gaz azotés NO_2 et NH_3 par mesures satellitaires à Lamto (Côte d'Ivoire) ». Elle vise à étudier les évolutions temporelles des gaz azotés (NO_2 et NH_3) par mesures satellitaires dans une zone de savane humide tropicale (la station de Lamto). Plus spécifiquement, il s'agira d'analyser :

- les évolutions des densités de colonnes verticales de NO_2 et de NH_3 à Lamto en relation avec les sources ;

- les tendances des densités de colonnes verticales de NO₂ et de NH₃ sur une décennie à Lamto.

Outre l'introduction, la conclusion et les perspectives, le présent mémoire s'articule autour de trois parties. La première partie consiste en une généralité, d'une part sur le cycle de l'azote et les impacts liés aux activités humaines sur ce cycle, et d'autre part sur les gaz azotés NO₂ et NH₃. La seconde partie décrit le matériel et les méthodes utilisés pour atteindre nos objectifs et la troisième partie présente les résultats obtenus à l'issue des travaux et la discussion qui en découle.

PARTIE 1 : GENERALITES

Le but de ce chapitre est de résumer les aspects importants du cycle de l'azote et de montrer les impacts des activités humaines sur celui-ci. De plus, nous nous intéressons particulièrement aux sources, aux transformations et aux impacts des gaz atmosphériques azotés NH_3 et NO_2 .

1.1 Cycle biogéochimique de l'azote

1.1.1. Cycle de l'azote

L'azote est un élément essentiel pour tous les organismes vivants. L'atmosphère terrestre contient environ 78% d'azote moléculaire (N_2) ; cela en fait le plus grand réservoir d'azote. Le cycle de l'azote (figure 1) décrit le processus biochimique ou chimique de transformation de cet élément en assurant une circulation rapide dans différents compartiments du système eau-sol-végétation. Ce cycle est très complexe en raison des divers changements de l'azote dans l'environnement (Ossou, 2020).

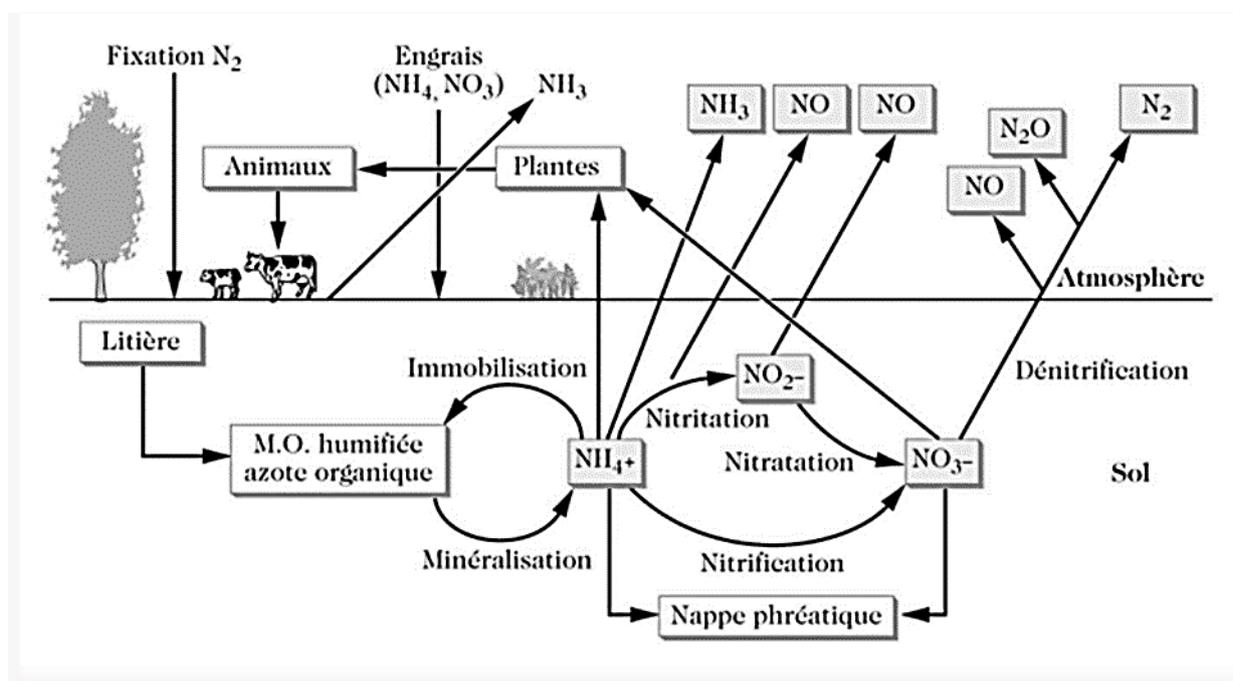


Figure 1: Cycle de l'azote (D'après Holmes *et al.*, 1912, adapté par Delmas *et al.*, 1995)

Les principaux processus impliqués dans le recyclage de l'azote sont entre autres : la fixation de l'azote diatomique N_2 , l'assimilation de l'azote, l'ammonification, la nitrification et la dénitrification (Figure 1).

- Fixation de l'azote

La fixation de l'azote est la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les animaux et les plantes. L'atome gazeux N_2 est converti en ammoniac NH_3 puis en ion ammonium NH_4^+ . La fixation de l'azote peut se produire dans différents milieux. Par exemple dans le sol, elle peut être due à des bactéries présentes dans celui-ci ou des bactéries trouvées dans les racines de certaines plantes (notamment de nombreuses légumineuses). La foudre fixe également l'azote dans l'air. Enfin, cela se fait aussi dans l'océan, c'est ce qu'on appelle la "fixation de l'azote océanique". L'ammoniac produit par ce procédé est absorbé par le phytoplancton. (Ossouhou, 2020).

- Assimilation de l'azote

L'assimilation de l'azote est l'adsorption des ions NO_3^- ou NH_4^+ résultant de la fixation de l'azote dans les composés tissulaires spécifiques des algues et des plantes supérieures. Les animaux ingèrent ensuite ces algues et ces plantes, les transformant en acides aminés, protéines et ADN (Ossouhou, 2020).

- Ammonification

L'ammonification se produit lorsqu'une plante ou un animal meurt ou excrète des déchets. Les décomposeurs, comme les bactéries et les champignons, décomposent d'abord les protéines de la matière organique. Cela libère du NH_3 , qui se dissout dans l'eau du sol. NH_3 se combine ensuite à un ion hydrogène (H^+) pour former NH_4^+ . Avec l'ammonification, la nitrification forme un processus de minéralisation qui se réfère à la décomposition complète de la matière organique, avec libération des composés azotés disponibles (Ossouhou, 2020).

- La nitrification

La nitrification est l'étape du cycle de l'azote qui relie l'oxydation (produit par la dégradation de la matière organique) à la perte d'azote fixé sous forme de gaz diazote (Ward, 2008). C'est une réaction d'oxydation qui s'effectue en milieu aérobie, c'est-à-dire en présence d'oxygène, et par catalyse enzymatique reliée à des bactéries présentes dans le sol ou dans l'eau. Tout l'ammoniac produit pendant la fixation de l'azote n'est pas absorbé par les plantes. Les bactéries présentes dans le sol peuvent en utiliser pour fabriquer du nitrite (NO_2^-). Ensuite, le nitrite peut être converti en nitrate (NO_3^-), qui participe également à la croissance des plantes. (Ossouhou, 2020)

- La dénitrification

Contrairement à la nitrification, la dénitrification est un processus anaérobie. Elle se produit quand certains types de bactéries absorbent du nitrate et le transforment en azote gazeux, qui est libéré dans l'air. La dénitrification ne se produit que dans certains sols et eaux souterraines, dans les zones humides, dans l'océan et dans les sédiments des fonds marins.

1.1.2. Sources anthropiques et impacts des activités humaines sur le cycle de l'azote

1.1.2.1. Sources anthropiques

Le cycle de l'azote est impacté de plusieurs manières par les activités humaines. Ainsi de la combustion d'énergie fossiles aux pratiques agricoles, respectivement sources majeures d'émissions de NO_x et de NH₃ dans la troposphère, les activités humaines impactent à presque tous les niveaux le cycle de l'azote (Tableau I).

Les principales formes réactives de l'azote sont récapitulées dans le tableau I. Leurs émissions proviennent souvent pour une part significative des activités humaines.

Tableau I : Sources anthropiques d'azote (Source : Secrétariat de l'OCDE, 2019)

Impact environnemental	Part des émissions anthropiques dans les émissions totales	Activités
Qualité de l'eau	NO ₃ ⁻ (?)	Agriculture, eaux usées urbaines et industrielles, dépôts atmosphériques
Qualité de l'air	NO _x (~ 70 %)	Combustion d'énergies fossiles et, à un degré moindre, combustion de biomasse (la seconde étant principalement imputable à l'agriculture sur brûlis)
	NH ₃ (~ 90-100 %)	Agriculture (volatilisation à la suite de l'épandage d'effluents d'élevage ou d'engrais à base d'urée)
	PM (?)	Formées dans l'atmosphère par les gaz précurseurs NO _x et NH ₃
	Ozone troposphérique (~ 80 %)	Formé par des processus photochimiques à partir du gaz précurseur NO _x
Effet de serre et couche d'ozone	N ₂ O (~ 40 %)	Agriculture et, à un degré moindre, combustion d'énergies fossiles et de biomasse, procédés industriels, dépôts atmosphériques et eaux usées
Écosystèmes et biodiversité	NH ₃ et NH ₄ ⁺ (~ 90-100 %)	Agriculture (volatilisation à la suite de l'épandage d'effluents d'élevage ou d'engrais à base d'urée)
	NO ₃ ⁻ et azote organique (?)	Agriculture, eaux usées urbaines et industrielles, dépôts atmosphériques
Qualité des sols	NH ₄ ⁺ (~ 90-100 %) ; NO ₃ ⁻ et azote organique (?)	Agriculture et, à un degré moindre, dépôts atmosphériques

1.1.2.2. Impacts des activités humaines sur le cycle de l'azote

Les activités humaines peuvent perturber le cycle de l'azote. Certaines activités peuvent entraîner une augmentation des niveaux d'azote à certaines étapes du cycle. En effet, les rejets excessifs d'azote dans l'environnement peuvent avoir des impacts sur les compartiments eau-air-sol, ainsi que sur la biodiversité (Sutton *et al.*, 2008).

Tableau II: Principales menaces imputables aux rejets excessifs d'azote dans l'environnement (source : Sutton *et al.*, 2011 ; Geupel, 2015)

Domaine	Effet négatif sur la santé et l'environnement	Principale forme de l'azote concernée
Eau	Contamination des eaux souterraines et de l'eau potable par le nitrate	Nitrate (NO ₃ ⁻)
Air	Effets sur la santé humaine et sur la végétation Effets sur les matériaux et les monuments	Oxydes d'azote (NO _x), ammoniac (NH ₃), particules (PM) ^a , ozone troposphérique Acide nitrique (HNO ₃), PM ¹ , ozone troposphérique
Effet de serre et couche d'ozone	Réchauffement de la planète et appauvrissement de la couche d'ozone	Hémioxyde d'azote (N ₂ O)
Écosystèmes et biodiversité	Eutrophisation et acidification des écosystèmes terrestres Eutrophisation des écosystèmes d'eau douce et marins	NO ₃ ⁻ , ammonium (NH ₄ ⁺) NO ₃ ⁻ , azote organique ²
Sols	Acidification	Azote organique ²

1. Particules grossières (1-10 micromètres de diamètre, ou PM₁₀) et particules fines (1-2.5 micromètre de diamètre, ou PM_{2,5})

2. Azote organique dissous et particulaire.

1.2. Principales sources de NO₂ et NH₃ en zone rurale africaine

En zones rurale africaine, les sources majeures de gaz azotés sont les feux de biomasse et les émissions biogéniques. En effet, plusieurs auteurs ont mis en évidence les feux de biomasse et les émissions biogéniques comme principales sources de composés azotés en Afrique (Calabri & Cisela, 1992 ; Lacaux *et al.*, 1993). Dans les sections suivantes nous détaillerons ces diverses sources de composés azotés.

- Les feux de biomasse

Les feux de végétation jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère tropicale et subtropicale et, selon Lacaux *et al.* (1993), ils représentent 57% du total des combustions de biomasse en zone tropicale. Aussi, les feux de savane sont-ils les plus importants car ils occupent 90% du total de la végétation brûlée (Delmas *et al.*, 1995). De plus, les feux de biomasse en Afrique proviennent essentiellement de pratiques culturelles et d'activités liées au défrichage pour l'utilisation permanente des terres pour l'agriculture, l'élevage et l'élimination des résidus agricoles (Assamoi, 2011). En effet, la déforestation s'avère nécessaire pour certaines cultures en particulier les cultures sur brûlis. Ainsi, ce phénomène est plus présent dans les zones favorables à l'exploitation agricole c'est-à-dire dans les zones forestières et dans les savanes humides. Ces dernières années, près de 70% du paysage forestier

anciennement existant auraient disparu (Bahino, 2013). C'est à juste titre que Calabri & Cisela (1992) estiment que sur 750 millions d'hectares de végétations brûlées chaque année, près de la moitié le sont en Afrique alors que 12 à 13 millions d'hectares sont brûlées aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Enfin, ces feux s'observent généralement du mois de juin à octobre dans l'hémisphère sud et du mois de novembre à février dans l'hémisphère nord (Hao & Liu, 1994).

- Les émissions biogéniques

A côté de l'émission des feux de savane, l'activité biologique dans les sols donne lieu à une émission continue. Les émissions biogéniques, gaz produits lors de processus biologiques, sont issues soit directement de la végétation, soit des sols à la suite de la dégradation de la matière organique (Adon, 2011). En effet, dans les sols de savane, les transformations biologiques de l'azote conduisent aussi à l'émission de composé gazeux tel que l'ammoniac (NH_3) à travers l'apport de fertilisants ammoniacaux sur les sols agricoles (Schlesinger & Hartley, 1992).

1.3. Sources, transformations et impacts de NO_2 et NH_3

Certains gaz azotés réactifs tels que les oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) et l'ammoniac (NH_3) jouent un rôle important dans la chimie de l'atmosphère ainsi que dans le fonctionnement des écosystèmes et agroécosystèmes aquatiques et terrestres (Vitousek *et al.*, 1997). Dans la suite, nous présenterons ces deux gaz en allant de leurs sources d'émissions jusqu'à leurs impacts.

1.3.1. Dioxyde d'azote (NO_2)

Le dioxyde d'azote est un composé chimique de formule NO_2 . Il fait partie de la famille des oxydes d'azote (NO_x). Le dioxyde d'azote est essentiellement émis dans l'atmosphère sous forme de monoxyde d'azote (NO) qui subit ensuite une transformation rapide au bout de quelques minutes pour former le NO_2 , plus stable et toxique.

- Sources

Les sources de NO_2 peuvent être d'origine anthropique ou naturelle. Elles proviennent généralement des processus de combustion. Cette combustion produit une réaction entre les molécules d'azote et les molécules d'oxygène, provoquant l'émission de monoxyde d'azote (NO) dans l'air ambiant. En effet, Les centrales thermiques, la circulation des véhicules à moteur, le chauffage (y compris le chauffage au bois) et certaines activités industrielles font

appel à la combustion à haute température. Le bilan des sources de NO_x à l'échelle globale est résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau III: Principales catégories de sources de NO_x à l'échelle globale (Delmas *et al.*, 2005).

Sources (NO _x)		Estimations (TgN.an ⁻¹)
Naturelles	Sols	6
	Eclairs	4
	Total naturel	10
Anthropiques	Combustibles fossiles	22
	Combustion de biomasse	7
	Sols cultivés (fertilisation)	4
	Total anthropique	33

- Transformations

Une fois émis dans l'atmosphère, NO₂ subit de nombreuses transformations. En effet, ce gaz est en équilibre permanent, mais dépendant des conditions de température et de pression, avec son dimère, le peroxyde d'azote N₂O₄ (Holleman *et al.*, 2001).

Aussi, le dioxyde d'azote réagit-il avec la pluie et la vapeur d'eau atmosphérique pour former de l'acide nitrique selon la réaction suivante :



En outre, le dioxyde d'azote combiné à l'ozone troposphérique forme des nitrates très solubles dans l'eau qui sont responsables du caractère eutrophisant et acidifiant des pluies dites acides non soufrées.

- Impacts

Une concentration trop élevée de NO₂ dans l'atmosphère peut nuire aux personnes et à l'environnement. En effet, le NO₂ est un gaz irritant, qui pénètre dans les ramifications les plus fines des voies respiratoires. Il peut ainsi provoquer des difficultés respiratoires ou une hyperréactivité bronchique chez les personnes sensibles et favoriser l'accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant. Le NO₂ est 40 fois plus toxique que le monoxyde de carbone (CO) et quatre fois plus toxique que le monoxyde d'azote (NO). En outre, les NO_x contribuent aussi à la formation des retombées acides et à l'eutrophisation des

écosystèmes. Les oxydes d'azote jouent enfin un rôle dans la formation de particules fines dans l'air ambiant (<https://www.ademe.fr/>).

1.3.2. Ammoniac (NH₃)

L'ammoniac est un composé chimique de formule NH₃. Il est produit par des processus biologiques et donc présent dans différentes régions, polluées ou non. Etant donné que l'ammoniac n'absorbe pas la lumière ultra violette, il ne participe pas directement aux réactions photochimiques de l'atmosphère. Cependant, le NH₃ est très important pour la chimie troposphérique en raison de ses effets sur la chimie des précipitations.

- Sources

Les sources de NH₃ sont aussi naturelles qu'anthropiques. Toutefois, les émissions anthropiques sont beaucoup plus importantes (Adon, 2011). En effet, les principales sources d'ammoniac à l'échelle globale sont l'élevage, l'agriculture et la combustion de la biomasse (Schlesinger & Hartley, 1992; Bouwman *et al.*, 1997). Aussi, l'ammoniac est émis par les écosystèmes naturels à travers la décomposition de la matière organique à la surface du sol, des émissions par les plantes, des excréments d'animaux sauvages et les océans. Le tableau ci-dessous donne les principales sources d'ammoniac produit dans l'atmosphère à l'échelle globale en TgN.an⁻¹ (1 Tg= 10¹² g).

Tableau IV: Sources d'émissions d'ammoniac (NH₃) à l'échelle globale (A -Schlesinger & Hartley,1992 ; B – Dentener & Crutzen, 1994, et C – Bouwman *et al.*,1997)

Sources (NH ₃)		Estimations (TgN.an ⁻¹)		
		A	B	C
Naturelles	Ecosystèmes non perturbés (sols).....	10	5,1	2,4
	Animaux sauvages.....	-	2,5	0,1
	Mers et Océans.....	13	7,0	8,2
	Total naturel.....	23	14,6	10,7
Anthropiques	Elevage.....	32,3	22,5	21,6
	Sols cultivés (fertilisation).....	8,5	6,4	9,0
	Cultures (plantes).....	-	-	3,6
	Combustion de biomasses.....	5	2,0	5,7
	Combustibles fossiles.....	2,2	-	0,1
	Excréments humains.....	4	-	2,6
	Industrie.....	-	-	0,2
	Total anthropique.....	50,0	30,9	42,8

- Transformations

Les transformations de l'ammoniac sont multiples. En effet, provenant de la décomposition de l'urée (CO(NH₂)₂) et de l'acide urique, présents dans les excréments d'animaux, l'ammoniac se transforme en ion ammonium NH₄⁺ sous l'action de l'hydrolyse microbologique de l'urée par l'enzyme uréase présente dans les matière fécales (Bouwman *et al.*, 1997), selon la réaction suivante :

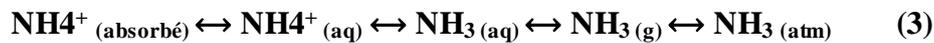


Cette réaction peut également exister dans les sols où l'urée résiduelle, et d'autres composés azotés sont décomposés.

En outre, l'ammoniac gazeux réagit également avec l'acide nitrique gazeux (HNO₃) formant du nitrate d'ammonium NH₄NO₃ solide (formation de brumes) (Pio & Harrison, 1987), ou est dissout dans les gouttes d'eau acide des nuages. La dissolution de l'ammoniac, très efficace,

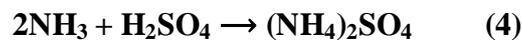
neutralise l'acidité de l'eau de pluie en se combinant aux protons pour produire l'ion ammonium (NH_4^+).

Aussi, en phase liquide, l'ion ammonium est en équilibre avec sa base conjuguée NH_3 , qui elle-même est en équilibre avec NH_3 en phase gazeuse (Bouwman *et al.*, 2002):



Où (aq) représente la phase aqueuse, (g) gazeuse, et (atm) la perte dans l'atmosphère.

Enfin, l'ammoniac joue un rôle important dans la neutralisation (partielle) de l'acidité naturelle et anthropique dans l'atmosphère par des réactions de type (Schlesinger & Hartley, 1992) :



- Impacts

L'ammoniac est éliminé de l'atmosphère par dépôt humide ou sec. Ces dépôts ont plusieurs effets sur le sol et la végétation. Ils interviennent dans l'enrichissement du sol en azote ammoniacal, ce qui développe la nitrification ainsi que l'acidification du sol (Binkley & Richter, 1987). Les dépôts de NH_3 sur les surfaces terrestre et aquatique contribuent aussi à l'eutrophisation, qui est une forme naturelle de pollution de certains écosystèmes qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent.

En somme, l'azote est sans doute le nutriment le plus important dans la régulation de la productivité primaire et de la diversité des espèces dans les écosystèmes aquatiques et terrestres.

Néanmoins, un dépôt de grande quantité d'azote attaque la vitalité des forêts, influence négativement la qualité des cultures, fait diminuer la biodiversité et contribue à la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines (Brimblecombe *et al.*, 2007). Les préoccupations environnementales concernant l'azote sont axées sur la conversion de l'azote en d'autres formes de réaction chimique. L'excès d'azote réactif dans notre environnement lié aux activités anthropiques est considéré comme alarmant par les Nations Unies, non seulement à cause de l'amplitude et la complexité de la pollution par l'azote mais surtout parce que très peu de progrès ont été faits pour la réduire.

1.4. Présentation d'instruments de mesures satellitaires

1.4.1. Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI)

- Présentation

L'Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI) est un capteur interférométrique ultrasensible conçu par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), en collaboration avec l'organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques (EUMETSAT pour European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites), et placé sur les satellites météorologiques européens Metop, dont les modèles A, B et C (Figure 3) ont été lancés respectivement en 2006, 2012 et 2018. IASI a été conçu pour des sondages météorologiques opérationnels de très hautes précisions dédiés à l'amélioration des prévisions météorologiques à moyen terme. Il est également conçu pour la chimie de l'atmosphère à des fins climatologiques dans le but d'estimer et de suivre les gaz traces tels que l'ozone, l'ammoniac, le monoxyde de carbone ou le méthane à l'échelle mondiale (<https://www.eumetsat.int>).



Figure 2 : Les satellites Metop-A, Metop-B et Metop-C (source : Latmos).

- Fonctionnement

La technique de mesure est basée sur la télédétection infrarouge passive utilisant un spectromètre à transformée de Fourier. IASI est composé de 8 461 canaux couvrant l'intervalle $[645 \text{ cm}^{-1}, 2760 \text{ cm}^{-1}]$ avec un intervalle d'échantillonnage de 0.25 cm^{-1} et une résolution spectrale de 0.5 cm^{-1} après apodisation (Vincensini, 2013).

L'axe optique de IASI balaie l'espace dans un plan perpendiculaire à la trace au sol du satellite. Le balayage est discontinu, avec un déplacement rapide entre les positions de visée et un arrêt pendant la visée (acquisition de l'interférogramme). Il y a 30 positions de visée sur la ligne de mesure. Ces positions sont symétriques par rapport à la verticale. Le champ angulaire total de IASI est conique avec un angle au sommet de 3.3° . L'axe optique se déplace donc de $\pm 48,3^\circ$ par rapport au nadir (Figure 4). Le balayage d'une ligne inclut, en plus des 30 visées vers le sol, les visées sur les cibles d'étalonnage et le retour à la position de départ. Il dure en tout 8 secondes. Metop est en orbite à une altitude d'environ 817 km, la fauchée de IASI (longueur de la ligne de mesure au sol) est de 2 200 km environ. Il y a deux passages quotidiens en heure locales de IASI, le premier à 9h30' et le second à 21h30' à l'équateur. La résolution spatiale au nadir est d'environ 12 km et augmente ensuite sur les bords de la fauchée.

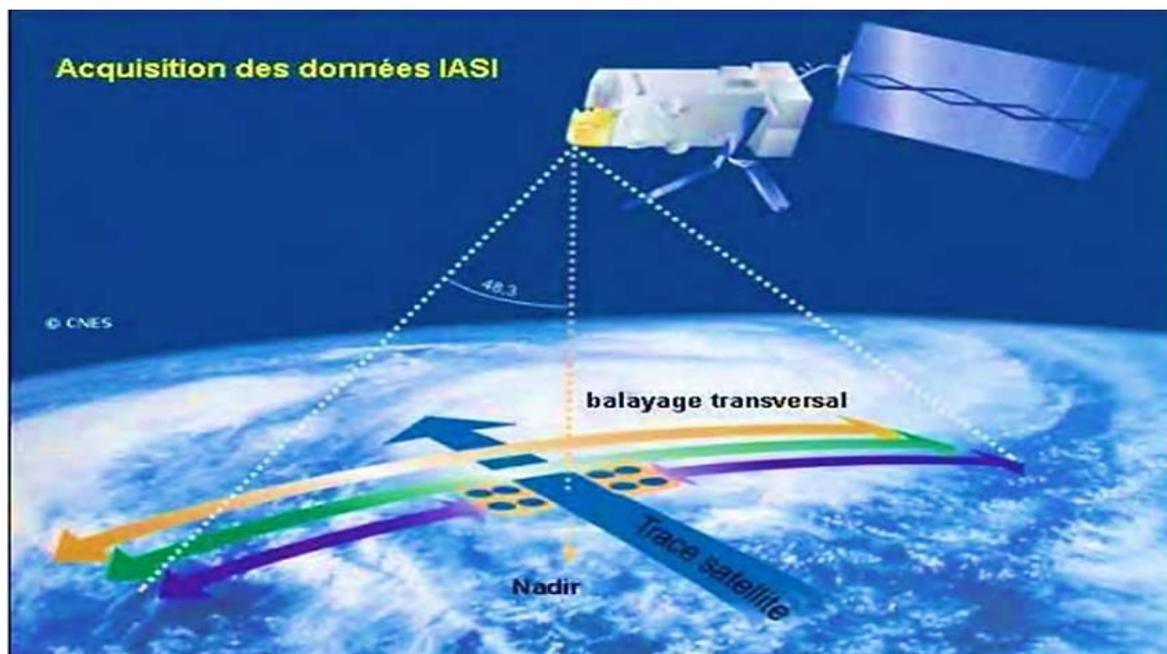


Figure 3 : Principe de l'acquisition des données IASI par balayage transversal à la trace du satellite. (Source : CNES)

1.4.2. L'instrument OMI

- Présentation

L'instrument de surveillance de l'ozone (OMI pour Ozone Monitoring Instrument) est une contribution de l'Agence Néerlandaise pour les Programmes Aérospatiaux (NIVR pour

Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart) en collaboration avec l'Institut météorologique finlandais (FMI) à la mission Aura.

L'instrument OMI utilise l'imagerie hyper-spectrale en mode push-broom pour observer le rayonnement solaire de rétrodiffusion dans le visible et l'ultraviolet. Les capacités hyper-spectrales améliorent la précision des quantités totales d'ozone et permettent également un auto-calibrage radiométrique et de longueur d'onde précise sur le long terme. L'OMI peut distinguer les types d'aérosols, tels que la fumée, la poussière et les sulfates, et mesure la pression et la couverture nuageuses, qui fournit des données pour estimer l'ozone troposphérique.

- Fonctionnement

L'instrument OMI est un spectrographe d'imagerie de visualisation nadir qui mesure le rayonnement solaire rétrodiffusé par l'atmosphère et la surface de la Terre sur toute la longueur d'onde de 270 à 500 nm avec une résolution spectrale d'environ 0,5 nm. L'angle de vision de 114° du télescope correspond à une bande de 2600 km de large à la surface, ce qui permet des mesures avec une couverture globale quotidienne. La lumière entrant dans le télescope est dépolarisée à l'aide d'un brouilleur, puis divisée en deux canaux : le canal UV (ultraviolet) de longueur d'onde compris entre 270 et 380 nm, et le canal VIS (visible) de longueur d'onde compris entre 350 et 500 nm. (<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>)

En mode fonctionnement global normal, la taille des pixels OMI est de 13 km × 24 km au nadir (le long de x à travers la piste). Dans le mode zoom, la résolution spatiale peut être réduite à 13 km × 12 km. La petite taille des pixels permet à OMI de regarder entre les nuages, ce qui est très important pour récupérer des informations troposphériques. Aussi, l'OMI peut mesurer le spectre complet dans la gamme de longueurs d'onde ultraviolette/visible avec une résolution spatiale très élevée (13 km × 24 km) et une couverture globale quotidienne. Cela est possible en utilisant un détecteur bidimensionnel.

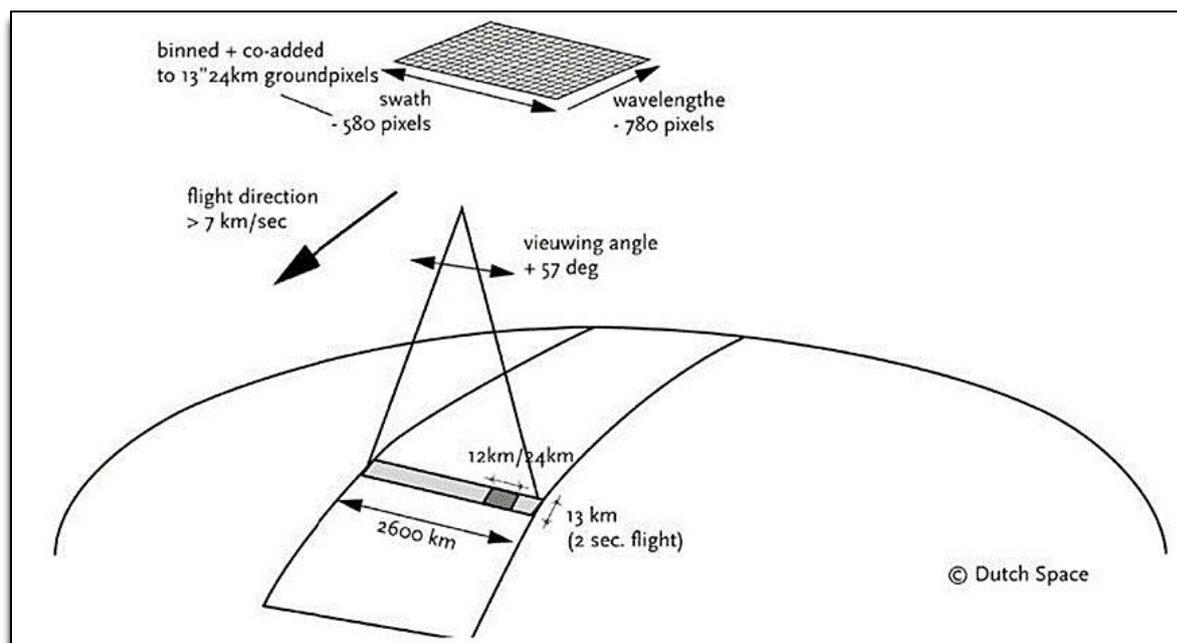


Figure 4 : Principe de mesure OMI (Levelt *et al.*, 2006).

1.4.3. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

La mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM pour Tropical Rainfall Measuring Mission) est une mission spatiale conjointe de la NASA et de l'agence nationale de développement spatial du Japon, conçue pour surveiller et étudier les précipitations tropicales et subtropicales et la libération d'énergie associée (Huffman *et al.*, 2019). TRMM fournit un schéma séquentiel basé sur l'étalonnage pour combiner les estimations des précipitations de plusieurs satellites (Huffman *et al.*, 2007), ainsi que des analyses de pluviométries à une résolution de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ et un pas de temps de 3 heures. TRMM vise à améliorer notre compréhension de la distribution et de la variabilité des précipitations dans les régions tropicales dans le cadre du cycle de l'eau dans le système climatique actuel.

1.5. Description du site d'étude

1.5.1. Présentation de la station de Lamto

La station de Lamto est située dans la partie centrale de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). Elle est localisée par les coordonnées suivantes : Latitudes $6^\circ 12' 0''$ et $6^\circ 15' 0''$ Nord, Longitudes $4^\circ 59' 0''$ et $5^\circ 2' 0''$ Ouest et située à une altitude de 105 m. La réserve présente une superficie de plus de 2 700 ha à l'extrême sud du V-baoulé, à environ 110 km de l'océan Atlantique et 160 km d'Abidjan. C'est une zone de transition entre la savane-forêt tropicale avec une végétation essentiellement constituée de forêt haute et dense au bord du Bandama ou sur les plateaux (figure 2). Elle est aussi constituée de savane avec son tapis d'herbes, ses

rôniers, ses grands horizons et les étroites galeries des marigots (Villocourt & Roose, 1978; Diawara *et al.*, 2014). Elle abrite également un sous-sol entièrement granitique dont l'altération conduit à des sols très sableux de type ferrugineux tropical (Gautier, 2014).

La réserve de Lamto dispose d'une importante base de données scientifiques. En effet, elle abrite deux (02) stations de recherches scientifiques : La station d'écologie tropicale et la station géophysique. La station d'écologie est une station de recherche écologique rattachée à l'Université Nangui Abrogoua d'Abidjan. Elle constitue un centre actif d'études et de formation multidisciplinaires en écologie tropicale et abrite de nombreuses collections depuis plus de 50 ans. La station géophysique quant à elle est une station de sismologie et un site de mesure multi-instrumenté avec des équipements provenant de plusieurs programmes de recherche internationaux.

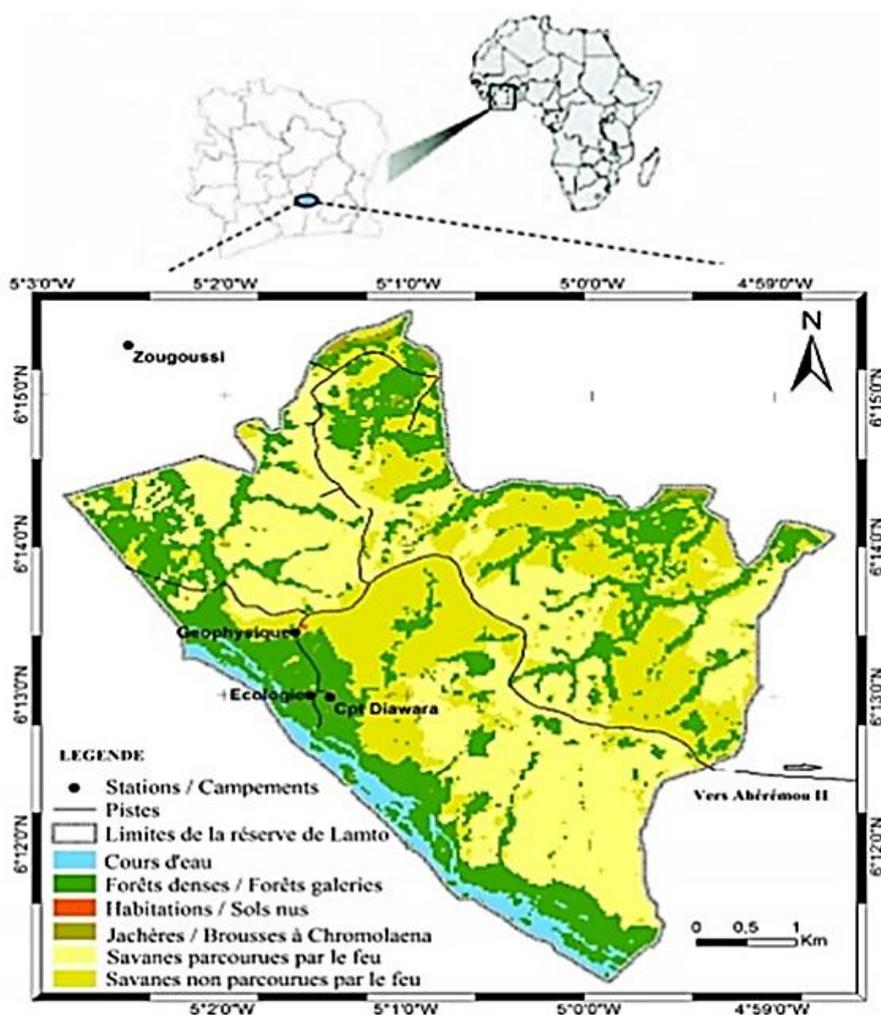


Figure 5 : Localisation de la station géophysique de Lamto (Gueulou *et al.*, 2020).

1.5.2. Contexte climatique

La savane humide de Lamto à deux principales saisons (sèche et humide) dont les étendues ont été bien documentées dans plusieurs articles (Adon *et al.*, 2010; Ossohou, 2020). La saison sèche part de novembre à mars et la saison humide s'étend du mois d'avril à celui d'octobre. Deux facteurs importants déterminent les conditions climatiques dans la réserve de Lamto. Il s'agit de la température et de la pluviométrie (Lamotte, 1967). La température est constamment élevée avec de faibles variations entre les saisons sèche et humide (Yoboué *et al.*, 2005). Les moyennes journalières oscillent entre 24 et 30°C pendant la saison sèche, et entre 25 et 28°C en saison humide (Lamotte, 1967). Les hauteurs de pluies annuelles mesurées sur la période 1998-2015 ont atteint le minimum en 2014 (991,9 mm) et le maximum en 2007 (1586,2 mm) avec une pluviométrie moyenne de $1240,9 \pm 133,5$ mm (Ossohou *et al.*, 2019).

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

2.1.1. Données

Une base de données mensuelle de mesures satellitaires de colonnes de NO_2 , NH_3 et de hauteurs de pluies à Lamto sur une période de 10 ans de mesures (2008-2017) a été utilisée. En effet, dans cette étude, nous avons utilisés 120 données de densités de colonnes verticales de NO_2 , 120 données de précipitation et 110 données de densités de colonnes verticales de NH_3 . Nous précisons que, le nombre de données de NH_3 inférieur aux autres est dû à certaines données mensuelles manquantes. Aussi, toutes les données de densités et de précipitations ont été récupérées sur un champ de $1^\circ \times 1^\circ$ centré sur la zone de Lamto et obtenues directement sur les différents sites des agences responsables des satellites cités dans la section précédente.

- Densités de colonnes verticales de NO_2

Pour une meilleure qualité des données, nous avons utilisé pour notre étude, les données provenant du niveau 3 OMI de NO_2 qui est doté d'un écran de nuage, comprenant uniquement les pixels qui ont au plus 30% de couverture nuageuse. Ces données sont globales et examinées pour détecter les points de données erronées (Ossohou, 2020).

- Densités de colonnes verticales de NH_3

Elles ont été récupérées par l'interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge (IASI) embarqué à bord du satellite météorologique MetOp-A depuis 2006. Les données de cette étude ont été récupérées chaque jour à 9h30, lorsque le contraste thermique est plus favorable aux extractions (Clarisse *et al.*, 2009 ; Van Damme *et al.*, 2014).

2.1.2. Logiciels utilisés

Dans cette étude, deux logiciels ont été utilisés pour le traitement des données. Il s'agit des logiciels Excel version 2019 et XLSTAT version 2020.3.1.

- Logiciel Excel

Excel est un logiciel de type "tableur" de la suite bureautique Office de Microsoft. Il permet la création de tableaux, de calculs automatisés, de plannings, de graphiques et de bases de données.

- Logiciel XLSTAT

XLSTAT est un logiciel statistique rattaché au logiciel Excel. C'est un logiciel en libre essai (shareware) et possède plus de 240 fonctionnalités. Il permet entre autres d'analyser, de

visualiser, de modéliser, de préparer des données ; et d'effectuer des tests paramétriques ou non paramétriques.

2.2. Méthodes

Pour l'étude des tendances, nous allons déterminer les taux de changement des moyennes mensuelle, saisonnière et annuelle des densités de colonnes verticales. Le taux de changement, de manière générale, est égal au ratio entre la pente de Sen (SS) et la moyenne de la période considérée (Moy) ramené en pourcentage :

$$TC = \frac{SS}{Moy} * 100 \quad (9)$$

Les taux de changement (TC), sont exprimés en $\% \cdot \text{mois}^{-1}$ et $\% \cdot \text{an}^{-1}$ respectivement pour les tendances mensuelles et interannuelles.

Par ailleurs, les tendances mensuelles sont évaluées grâce au test saisonnier de Kendall couplé à l'estimateur saisonnier de la pente de Kendall en tenant compte de l'autocorrélation dans les séries temporelles (Hamed & Ramachandra, 1998) avec une saisonnalité de douze. En ce qui concerne les séries temporelles saisonnières et annuelles, elles sont calculées grâce au test de Mann-Kendall couplé à la pente de Sen. Le niveau de significativité seuil choisi vaut 90 %, ce qui signifie que nous nous donnons au maximum 10 % de marge d'erreur lorsqu'une tendance statistiquement significative est détectée ; En d'autres termes, un test statistique est dit significatif lorsque la p-value est inférieure ou égale à 0,1. Enfin, il est important de préciser que tous les graphes de ce manuscrit ont été réalisés à l'aide d'Excel 2019.

2.2.1. Test de Mann-Kendall – Pente de Sen

- Test de Mann-Kendall (MK)

Le test de Mann-Kendall est un test statistique non paramétrique permettant de mettre en évidence la présence ou non d'une tendance significative dans une série temporelle. Ce test de tendance est le résultat d'une amélioration du test qui a d'abord été étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975) et finalement optimisé par Hirsch (1982, 1984).

L'hypothèse nulle H_0 de ces tests est qu'il n'y a pas de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies.

Pour cette étude, l'hypothèse nulle H_0 ("absence de tendance") est testée par rapport à l'hypothèse alternative H_1 ("présence de tendance"). Ces tests statistiques permettent de comparer les hypothèses H_0 et H_1 à l'aide d'un niveau de signification α qui mesurent la probabilité que H_0 soit rejetée par erreur. Il reste malgré tous des éventualités de se tromper : refuser H_0 alors que H_0 est vraie (risque de 1ère espèce) ou accepter H_0 alors que H_1 est vraie (risque de 2ème espèce). En pratique, les tests fournissent une valeur de probabilité p à comparer avec le niveau α . Si $p < \alpha$, alors l'hypothèse H_0 est rejetée au seuil α . Dans notre travail, nous fixons le niveau de significativité à 10 % ; c'est-à-dire qu'une probabilité de moins de 10% de détection de tendance erronée est acceptée.

Dans notre étude, le test non paramétrique de MK est utilisé pour détecter une tendance monotone statistiquement significative dans les séries temporelles de composés azotés des gaz atmosphériques.

La statistique de Mann-Kendall pour une série x est calculée par la relation suivante :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \text{ et } \text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Avec : n : la longueur de la série temporelle ; x_i et x_j : les moyennes respectives des années i et j avec $j > i$; S : la direction et l'ampleur de la tendance.

Si S est positif, cela signifie que les valeurs ont tendance à être de plus en plus élevées dans la série chronologique. Une valeur négative de la statistique S tend à montrer que les valeurs du jeu de données sont de plus en plus faibles. La statistique S sous hypothèse nulle a une distribution approximativement normale.

- Pente de Sen (SS)

Un autre test couramment couplé au test de MK est la pente de Theil-Sen ou pente de Sen (Sen, 1968). La pente de Sen (SS) est la statistique sommaire utilisée pour décrire l'ampleur et la direction des tendances dans les séries temporelles. Elle est calculée comme la médiane de toutes les pentes possibles par paire entre tous les points de données dans une série chronologique. Par rapport à la régression linéaire, SS est plus robuste aux valeurs aberrantes

ou aux valeurs extrêmes car leur influence est minimisée. SS s'exprime dans l'unité de la série temporelle (Helsel & Hirsch, 2002) :

$$SS = \text{médiane} \frac{(Y_j - Y_i)}{(X_j - X_i)} \quad (6)$$

Avec : $1 < i < j < n$; Y : la concentration ; X : le temps ; i, j et n : les numéros d'ordre

2.2.2. Test saisonnier de Kendall – Estimateur saisonnier de Kendall

- Test saisonnier de Kendall

Le test de MK a été étendu par Hirsch *et al.* (1982) afin d'inclure la saisonnalité des données. Le test statistique obtenu est communément appelé test saisonnier de Kendall (SMK). Ce test consiste à calculer la statistique S_{mk} du test de MK et sa variance $VAR(S_{mk})$ séparément pour chaque saison, puis à combiner les résultats obtenus. Soient S_{mk} et σ_{i2} , respectivement la statistique du test de MK et la variance pour la i ème saison.

$$S_{mk} = \sum_{i=1}^m S_i \text{ et } VAR(S_{mk}) = \sum_{i=1}^m VAR(S_i) \quad (7)$$

- Estimateur saisonnier de la pente de Sen (SSE)

La pente de Sen peut être modifiée pour prendre en compte la présence de saisonnalité dans la série temporelle. Ceci est le cas des données mensuelles mesurées sur une longue période. SSE est la médiane des pentes de tous les mois.

Pour chaque mois k ($k=1, 2, \dots, 12$) on a :

$$SSE = \text{médiane} \frac{(Y_{jk} - Y_{ik})}{(X_{jk} - X_{ik})} \quad (8)$$

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous montrerons dans un premier temps les résultats des variations et tendances des gaz NO₂ et NH₃ mesurés dans la savane humide de Lamto. Ensuite, dans un second temps, nous les discuterons en tenant compte de leurs sources.

3.1. Résultats

Cette section comporte deux parties. La première présente les variations mensuelles, saisonnières et annuelles, des profils verticaux de NO₂ et NH₃. La seconde partie ; évalue les tendances des colonnes verticales de NO₂ et NH₃ aux mêmes échelles temporelles que les variations.

Le terme “VCD” pour « vertical column density » fait référence à la densité de colonne verticale des gaz étudiés et s’exprime en molécules/cm².

3.1.1. Evolutions des profils verticaux de NO₂ et NH₃ à Lamto

3.1.1.1. Variations mensuelles et profils moyens annuels

a) Variations mensuelles de NO₂ et NH₃

La figure 6 présente les évolutions mensuelles de densités de colonnes verticales de NO₂ et NH₃ sur la période 2008-2017 à la station de Lamto. On observe un pic chaque année. Les VCD mensuelles de NH₃ varient entre $0,55 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² et $65,72 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² avec une moyenne mensuelle de $21,85 \pm 13,84 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² sur les 10 ans de mesures. Les VCD de NH₃ sont généralement supérieures à ceux de NO₂, variant de $1,65 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² à $16,86 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² avec une moyenne mensuelle décennale de $0,6 \pm 0,24 \cdot 10^{14}$ molécules/cm².

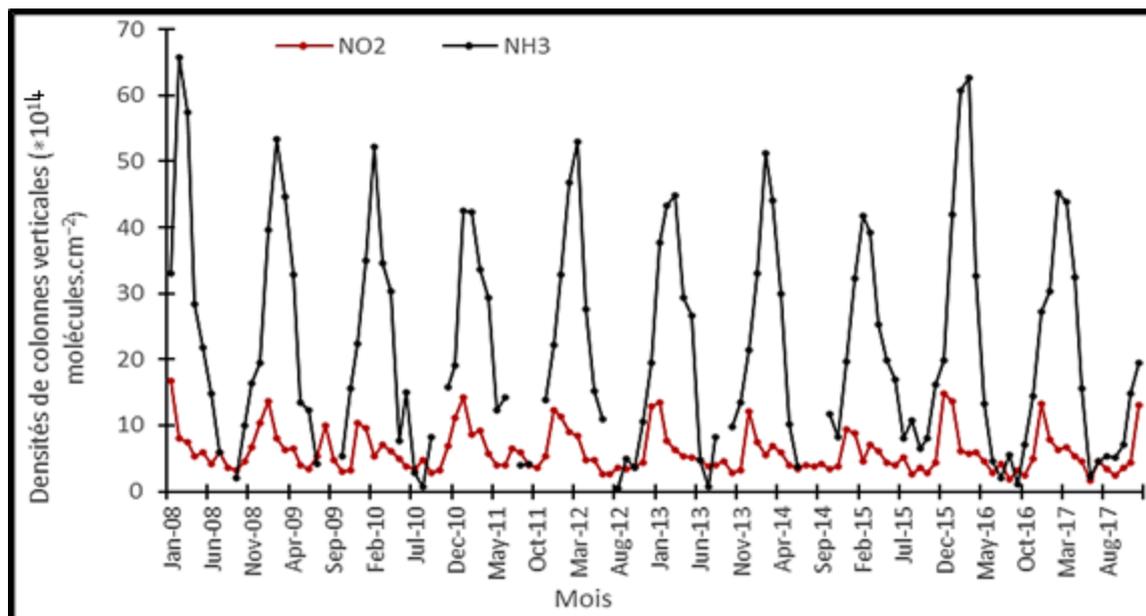


Figure 2 : Variation moyenne mensuelle des densités de colonnes verticales de NO₂ et NH₃ à Lamto sur la période 2008-2017

b) Profils moyens annuels de NO₂ et NH₃

Les données mensuelles ont été moyennées pour donner les profils moyens annuels des densités de colonnes verticales de NO₂ et NH₃ à Lamto (figure 7). Aux densités de colonnes verticales de NO₂ et NH₃, on ajoute la pluviométrie mensuelle sur les 10 années de mesures afin de montrer les hauteurs moyennes de pluies de chaque mois à Lamto.

Les VCD moyens annuels de NO₂ et NH₃ présentent des variations unimodales caractérisées par un pic apparaissant en saison sèche (de novembre à mars). La saison humide, qui s'étend d'avril à octobre, enregistre les VCD généralement les plus faibles de l'année.

Les VCD de NO₂ diminuent progressivement de janvier ($1,17 \pm 0,27.10^{15}$ molécules/cm²) au mois de juin où ils atteignent la plus petite valeur $0,35 \pm 0,07.10^{15}$ molécules/cm² avant d'augmenter jusqu'au mois de décembre où on enregistre la valeur maximale de $1,20 \pm 0,13.10^{15}$ molécules/cm² alors que les VCD de NH₃, vont d'abord augmenter du mois de janvier ($35,83 \pm 3,71.10^{15}$ molécules/cm²) au mois de février où nous observons le pic ($50,26 \pm 6,37.10^{15}$ molécules/cm²), ensuite baisser progressivement jusqu'au mois de juillet qui enregistre la plus faible valeur ($4,06 \pm 1,89.10^{15}$ molécules/cm²) et enfin, augmenter jusqu'au mois de décembre ($21,05 \pm 1,82.10^{15}$ molécules/cm²).

La quantité minimale des hauteurs de pluies, égale à 12,26 mm, est observée en janvier. Cette quantité augmente considérablement jusqu'à l'obtention d'un pic au mois de juin

avec une valeur de $186,61 \pm 34,07$ mm. Ensuite, le niveau de pluie baisse considérablement de juin à juillet ($83,47 \pm 37,19$ mm) avant d'augmenter à nouveau jusqu'au mois d'octobre avec une nouvelle valeur de $131,49 \pm 23,39$ mm ; pour enfin baisser jusqu'au mois de décembre qui possède la seconde valeur plus petite ($23,64 \pm 64$ mm) des hauteurs de pluies.

Les coefficients de corrélation de rang sont de $-0,524$ entre NO_2 et la pluviométrie mensuelle, et $-0,175$ entre NH_3 et la pluviométrie mensuelle. Ces coefficients négatifs prouvent l'existence de variations inverse entre les hauteurs de pluies et les gaz.

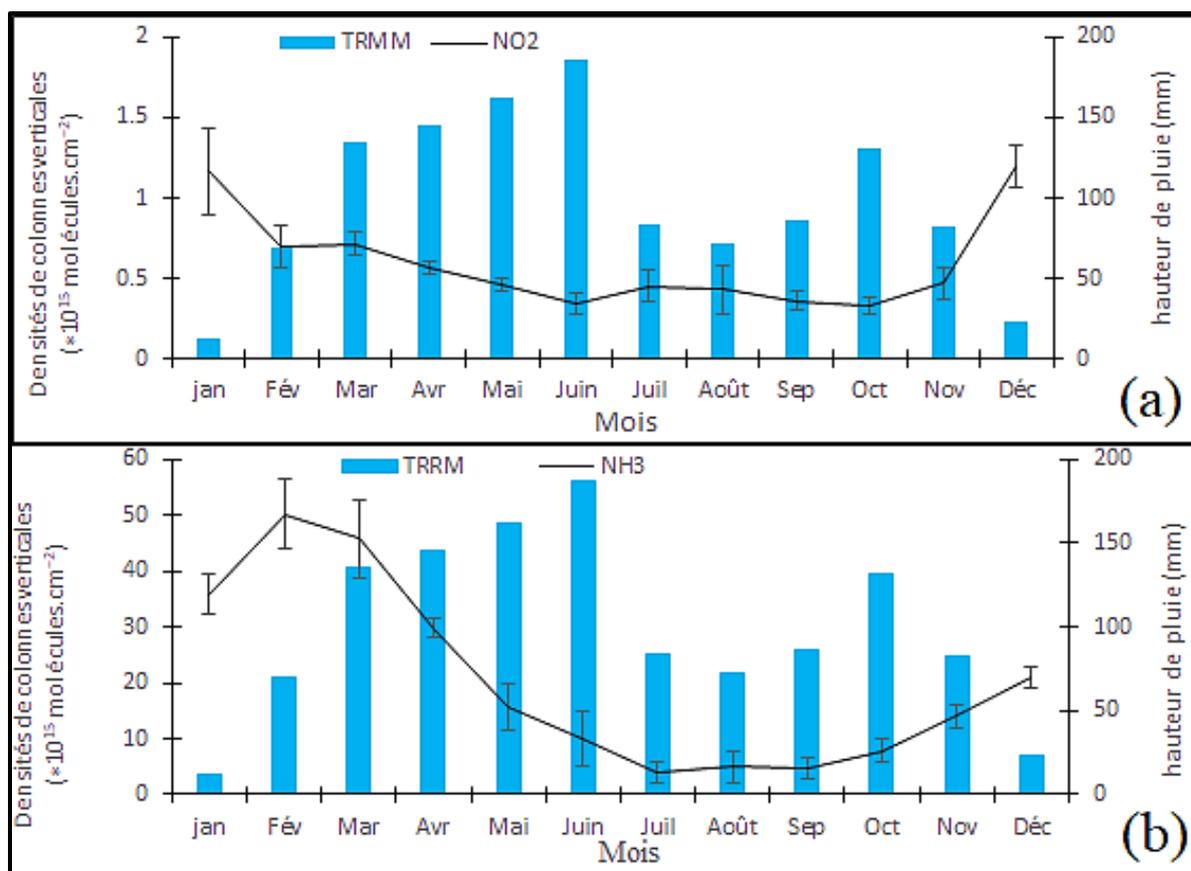


Figure 3 : Profils moyens annuels de NO_2 (a) et NH_3 (b) combinés respectivement avec les hauteurs de pluies

3.1.1.2. Variations saisonnières et interannuelles

a) Variations saisonnières

Les figures 8 présentent les variations saisonnières interannuelles des concentrations de NO_2 et NH_3 durant les deux saisons (sèche et humide) sur toute la période d'étude. On observe, que les valeurs des concentrations des VCD de NH_3 sont plus élevées que celles de NO_2 . Aussi, on constate que pour les deux gaz, les plus grandes valeurs sont enregistrées pendant la saison

sèche. Les VCD les plus élevées de NO_2 ($1,00 \pm 0,27 \cdot 10^{15}$ molécules/cm²) et de NH_3 ($41,38 \pm 16,46 \cdot 10^{15}$ molécules/cm²) sont obtenues respectivement en 2011 et 2016. Les valeurs minimales de NO_2 ($0,36 \pm 0,07 \cdot 10^{15}$ molécules/cm²) et de NH_3 ($9,45 \pm 7,7 \cdot 10^{15}$ molécules/cm²) sont respectivement obtenues en 2012 et 2016 pendant les saisons humides. Pour les deux gaz, les VCD en saisons sèche et humide varient peu d'une année à une autre ; avec des coefficients de variations en saison sèche de 11,91 % et 11,34 % respectivement pour NO_2 et NH_3 et, de 13,31 % et 14,17 % en saison humide respectivement pour NO_2 et NH_3 . Les coefficients de variations en saisons humides sont plus grands que ceux de la saisons sèche.

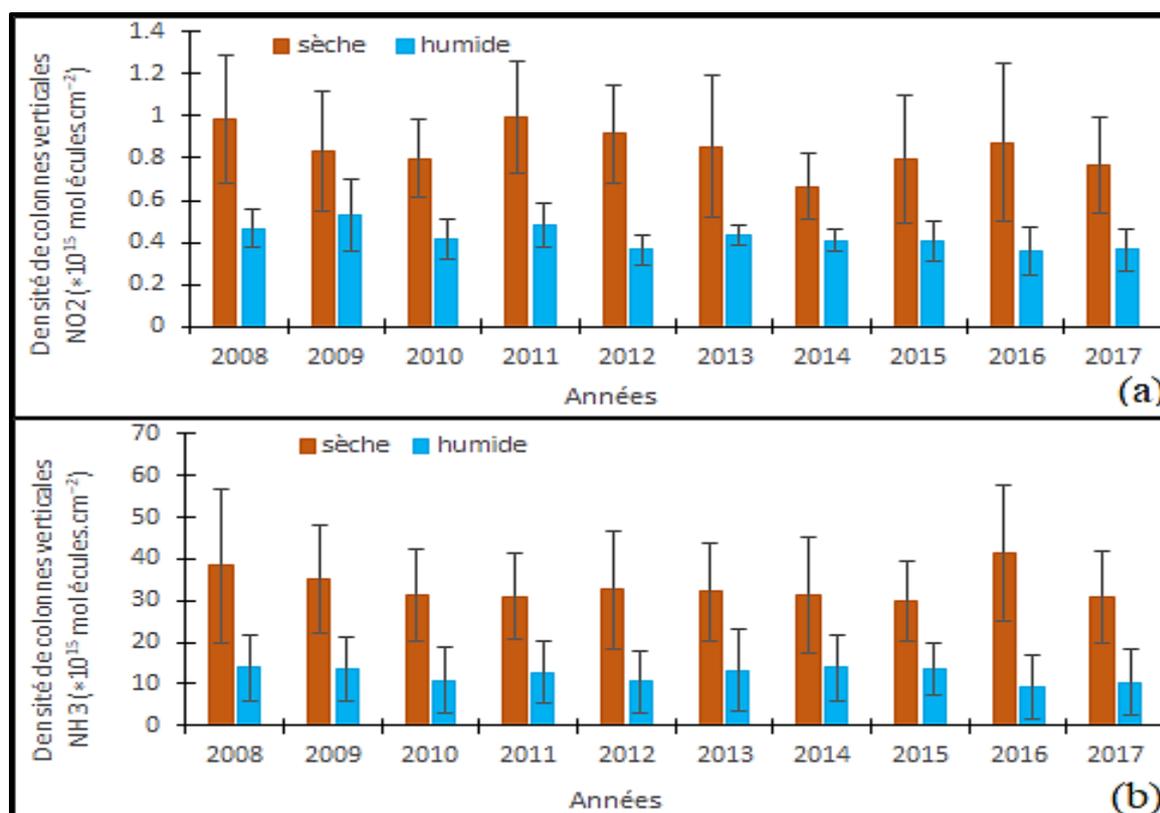


Figure 4 : Variations saisonnières des VCD de NO_2 (a) et NH_3 (b) durant les saisons sèches et humides sur toute la période d'étude

b) Variations interannuelles

Pour une année donnée, les VCD des saisons sèche et humides de chaque gaz ont été moyennées afin d'obtenir la moyenne annuelle. La figure 9 montre les variations interannuelles des densités de colonnes verticales des deux gaz azotés (NO_2 et NH_3). En général, les VCD de NH_3 sont de 30 à 35 fois plus élevées que celles de NO_2 , avec des valeurs variant de $5,15 \pm 1,59 \cdot 10^{14}$ (2014) à $6,97 \pm 2,76 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² (2011) pour NO_2 , et de $18,86 \pm 12,87 \cdot 10^{15}$ (2017) à $25,02 \pm 15,36 \cdot 10^{15}$ molécules/cm² (2008) pour NH_3 .

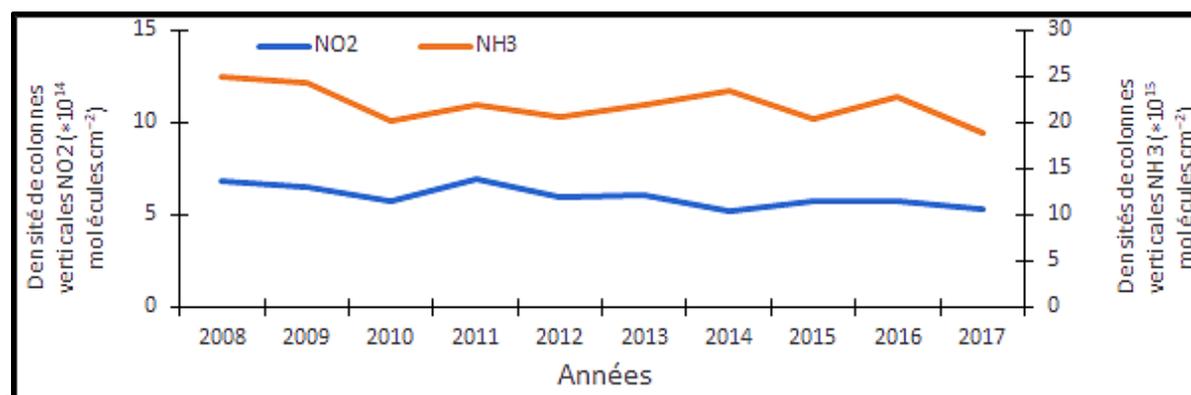


Figure 5 : Variations interannuelles des densités de colonnes verticales (VCD) de NO₂ et NH₃

3.1.2. Tendances des colonnes verticales de NO₂ et NH₃ à Lamto

3.1.2.1. Tendances mensuelles

Le tableau V présente les résultats des analyses de tendances mensuelles de VCD de NO₂ et NH₃ à Lamto sur toute la période d'étude. Nous constatons que les VCD de NH₃ ne présentent aucune tendance significative, tandis que ceux de NO₂ présentent une tendance à la baisse avec un taux de changement de -1,67 %.mois⁻¹ significative à plus de 99%.

Se référer aux annexes 1 et 2 pour des résultats plus complets ainsi que pour les figures avec les pentes de Sen.

Tableau V : Pentes de Sen (SS) et Taux de Changement (TC) de la moyenne (Moy) des VCD de NO₂ et NH₃ à l'échelle mensuelle.

		NO ₂	NH ₃
Mensuelle	Moy	6,00.10 ¹⁴	21,85.10 ¹⁵
	SS	-0,10.10 ¹⁴	-0,12.10 ¹⁵
	TC (%)	-1,67	-0,56
	p-value	0,006 (Significative)	> 0,1

3.1.2.2. Tendances saisonnières

- Tendance sur les moyennes des VCD en saisons sèche et humide

Le tableau VI présente les résultats des analyses de tendances saisonnières (sèche et humide) des VCD de NO₂ et NH₃ à Lamto sur toute la période d'étude. De manière générale, en saison sèche, on constate que les VCD des deux gaz ne présentent aucune tendance significative. Par contre en saison humide, seuls les VCD de NO₂ présentent une tendance à la baisse avec un taux de changement de -4,23 % par saison. Cette tendance à la baisse est significative à plus de 90 % avec une p-value égale à 0,02.

Se référer aux annexes 3 et 4 pour des résultats plus complets ainsi que pour les figures avec les pentes de Sen.

Tableau VI : Pentes de Sen (SS), p-value et Taux de Changement (TC) de la moyenne (Moy) des VCD de NO₂ et NH₃ à l'échelle saisonnière.

		NO ₂	NH ₃
Saison sèche	Moy	0,849.10 ¹⁵	33,38.10 ¹⁵
	SS	-0,022.10 ¹⁵	-0,424.10 ¹⁵
	TC (%)	-2,59	-1,27
	p-value	> 0,1	> 0,1
Saison humide	Moy	0,423.10 ¹⁵	12,22.10 ¹⁵
	SS	-0,017.10 ¹⁵	-0,178.10 ¹⁵
	TC (%)	-4,23	-1,46
	p-value	0,02 (Significative)	> 0,1

- Tendance sur les minimums et maximums des VCD en saisons sèche et humide

Le tableau VII présente les résultats des analyses de tendances saisonnières des minimums et maximums (en saisons sèche et humide) des VCD de NO₂ et NH₃ à Lamto sur toute la période d'étude. De manière générale, on constate que les valeurs maximales et minimales des VCD des deux gaz ne présentent aucune tendance significative. De plus, toutes les pentes de Sen obtenues sont négatives à l'exception de celles de NH₃ en saison humides où les valeurs sont positives (tableau VII).

Tableau VII : Pentas de Sen (SS) et p-value des minimums et maximums des VCD de NO₂ et NH₃ à l'échelle saisonnière.

		NO ₂		NH ₃	
		SS	p-value	SS	p-value
Saison sèche	Min	-1,03.10 ¹³	> 0,1	-1,91.10 ¹⁴	> 0,1
	Max	-1,32.10 ¹³	> 0,1	-1,02.10 ¹⁵	> 0,1
Saison humide	Min	-6,57.10 ¹²	> 0,1	2,5.10 ¹³	> 0,1
	Max	-9,26.10 ¹²	> 0,1	1,49.10 ¹⁴	> 0,1

3.1.2.3. Tendances interannuelles

- Tendance sur les moyennes des VCD annuelles

Les résultats des tendances annuelles des VCD de NO₂ et NH₃ sont présentés dans le tableau VIII. On observe une tendance à la baisse des densités de colonnes verticales de NO₂ avec un taux de changement de -2,52 % .an⁻¹. Cette tendance est significative avec une p-value de 0,032.

Se référer à l'annexe 5 pour des résultats plus complets ainsi que pour les figures avec les pentes de Sen.

Tableau VIII : Pentas de Sen (SS), p-value et taux de changement (TC) de la moyenne (Moy) des VCD de NO₂ et NH₃ à l'échelle annuelle.

		NO ₂	NH ₃
Annuelle	Moy	6,00	21,94
	SS	-0,151	-0,375*
	TC (%)	-2,52	-1,71
	p-value	0,032 (Significative)	> 0,1

- Tendance sur les minimums et maximums des VCD annuelles

Les résultats des tendances des minimums et maximums des VCD annuelles de NO₂ et NH₃ sont présentés dans le tableau VIII. On observe, des pentes de Sen négatives et une tendance à la baisse significative des densités de colonnes verticales de NO₂ avec une p-value de 0,02.

Tableau IX : Pentas de Sen (SS) et p-value des minimums et maximums des VCD de NO₂ et NH₃ à l'échelle annuelle obtenus à Lamto.

		NO ₂		NH ₃	
		SS	p-value	SS	p-value
Annuelle	Min	-1,57.10 ¹³	0,02 (Significative)	2,5.10 ¹³	> 0,1
	Max	-1,32.10 ¹³	> 0,1	-1,02.10 ¹⁵	> 0,1

3.2. Discussion

3.2.1. Evolutions des profils verticaux de NO₂ et NH₃ à Lamto

Afin de comprendre l'évolution des profils verticaux de NO₂ et NH₃, nous avons procédé à l'analyse de leurs variations mensuelles, saisonnières, interannuelles et de leurs profils moyens annuels. Les résultats obtenus mettent en évidence des VCD élevées pendant la saison sèche, et faibles en saison humide. De plus, les niveaux de densités sont dominés par ceux de NH₃ sur toute la période d'étude.

Ces résultats montrent que la pluviométrie influence considérablement les niveaux de concentration des gaz atmosphériques dans l'air. En effet, les concentrations des gaz atmosphériques et la pluviométrie évoluent en sens contraire ; c'est-à-dire que plus il pleut, moins il y a de gaz dans l'atmosphère. Cet état de fait peut être attribué au phénomène de lessivage de l'atmosphère à travers lequel les gaz azotés sont entraînés vers le sol pendant la pluie. En effet, Adon *et al.* (2013) ont montré que pendant la saison des pluies, les faibles émissions de combustion de biomasse associées à des processus de dépôt humides et secs importants expliquent les faibles VCD de NO₂ en surface. La relation entre les densités de colonnes verticales minimales (de NO₂ et NH₃) et la saison humide (d'avril à octobre) observée dans ce travail corrobore les résultats des travaux de Adon *et al.* (2013).

Les maximas de VCD en saison sèche sont attribuables à la combustion de biomasse dans la zone de Lamto. En effet, dans la savane humide, les flux de NO₂ et de NH₃ peuvent considérablement augmenter lors de l'utilisation des engrais ou de pratiques agricoles basées sur le brûlage juste avant la saison des pluies (Johansson *et al.*, 1988 ; Whitburn *et al.*, 2017). Pendant la saison sèche, la surface du sol à Lamto est brûlée à 80 % chaque années (Abbadie *et al.*, 2006) ; ce qui provoque une augmentation des VCD pendant cette saison. De plus, selon

Whitburn *et al.* (2017), les feux de végétation sont une source importante de NH_3 dans l'atmosphère, et Ossohou (2020) a montré que les niveaux de concentrations de NO_2 en saison sèche sont principalement dus à la source de combustion de biomasse sur tous les sites de savane humide. On peut ainsi en déduire que la combustion de biomasse est une source importante de NO_2 pendant la saison sèche à la station de Lamto comme le démontre Lacaux *et al.* (1996). Ainsi donc, nos résultats sont en accord avec ceux des travaux antérieurs à savoir que la combustion de biomasse constitue la principale source de NO_2 et de NH_3 en saison sèche à Lamto.

Il est également important de souligner que la contribution de la source biogénique pour les sites de savane humide est non négligeable. En effet, Delon *et al.* (2012) ont mis en évidence à l'échelle annuelle que la combustion de biomasse et les émissions biogéniques des sols sont équivalentes (environ $2 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ chacune) dans les savanes humides de Djougou (Benin) et Lamto (Côte d'Ivoire) pour la période 2002- 2007.

3.2.2 Tendances des colonnes verticales de NO_2 et NH_3 à Lamto

Dans le but d'étudier les tendances des gaz azotés à Lamto, nous avons analysé les résultats des tests de tendances mensuelles, saisonnières et annuelles des VCD des deux gaz. Les résultats obtenus montrent uniquement des tendances significativement à la baisse des VCD de NO_2 aux échelles mensuelle, saisonnière et annuelle ; tandis que les VCD de NH_3 ne présentent aucune tendance significative suivant les mêmes échelles temporelles.

Les tendances observées à Lamto peuvent être dues à trois facteurs importants, à savoir (1) la transformation de NO_2 en HNO_3 , (2) les dépôts humides et (3) la tendance à la baisse des sources d'émissions des gaz. En effet, une fois émis dans l'atmosphère, le dioxyde d'azote (NO_2) va réagir avec la vapeur d'eau (H_2O) atmosphérique pour former de l'acide nitrique (HNO_3). Cette transformation est favorisée au cours de la saison humide qui dure 7 mois (d'Avril à Octobre) dans la zone d'étude ; ce qui occasionne une augmentation de la quantité de HNO_3 au détriment de celle de NO_2 . Nos résultats sont corroborés par les travaux de Ossohou (2020) qui a montré que les concentrations de HNO_3 à Lamto sont significativement croissantes avec une augmentation d'environ $+1,00 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$ sur la période 1998-2015 ; et que la tendance à la baisse de NO_2 ($-0,91 \text{ \%} \cdot \text{an}^{-1}$) serait à l'origine de la tendance à la hausse des concentrations de HNO_3 observée sur le site de Lamto.

Par ailleurs, les dépôts humides ont un impact considérable sur la quantité de gaz azotés présente dans l'atmosphère du site. En effet, les dépôts humides dominent dans les régions

humides au détriment des dépôts secs (Ossohou, 2020). Selon Lovett (1994), les dépôts humides des aérosols et des gaz s'effectuent à la surface de la terre par interaction avec les hydrométéores (les gouttelettes de pluie, les flocons de neige et la grêle). Aussi, ils se produisent soit par piégeage dans les nuages, soit par interception des pluies ou de la neige, soit par dépôt de brouillard ou élimination des gaz et particules via le dépôt de ces gouttelettes. Dans cette étude, les quantités importantes de hauteur de pluie enregistrées (en moyenne $99,28 \text{ mm.an}^{-1}$ et $123,99 \text{ mm.mois}^{-1}$ en saison humide) participent à une augmentation de dépôts humides. Cette observation est en accord avec les résultats de l'étude faite par Ossohou (2020). En effet, selon Ossohou (2020), les tendances à la baisse des gaz azotés (NO_2 et NH_3) peuvent être expliquées par des tendances à la hausse des hauteurs de pluie mensuelles ($+1,49 \text{ mm.mois}^{-1}$), en saison sèche ($+2,08 \text{ mm.an}^{-1}$) et annuelles ($+0,92 \text{ mm.an}^{-1}$) à Lamto sur la période 1994-2015. Cet état de fait peut être attribué au phénomène de lessivage de l'atmosphère à travers lequel les gaz azotés sont entraînés vers le sol pendant la pluie. Cette suggestion est d'autant plus vraie que les corrélations de $-0,19$ et $-0,15$ entre les hauteurs de pluies mensuelles et les concentrations atmosphériques des gaz NO_2 (1998-2015) et NH_3 (2000-2015) sont significatives à 95 %.

En outre, les résultats des tableaux VII et IX nous permettent de dire que les sources d'émissions des gaz azotés sont généralement en baisse dans la zone d'étude. En effet, une étude menée à Lamto sur 18 années a révélé que les NO_x provenant de la source de combustion de biomasse connaissent une tendance à la baisse (Ossohou *et al.*, 2019). De même, Hickman *et al.* (2020) ont montré que la combustion de biomasse, qui est une importante source de NO_2 connaît une baisse dans la zone d'Afrique équatoriale en général, et en savane humide en particulier.

Pour finir, l'absence de tendance significative des VCD de NH_3 pourrait être attribuée à la courte période de données utilisées pour nos analyses (10 ans). Les pentes de Sen obtenues étant négatives, il est probable d'obtenir des tendances à la baisse avec une plus longue série de données (Hickman *et al.*, 2020).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de recherche consistait à étudier les évolutions temporelles des gaz azotés NO_2 et NH_3 par mesures satellitaires à la station de Lamto, zone de savane humide tropicale. Une base de données décennale (2008-2017) de mesures mensuelles provenant des instruments IASI et OMI, installés respectivement sur les satellites Metop et Aura ; ainsi que les mesures mensuelles de précipitation de la mission TRMM ont été mises à notre disposition.

La densité de colonne verticale est dominée par NH_3 avec une moyenne mensuelle de $0,6 \pm 0,24 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² pour NO_2 et $21,85 \pm 13,84 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² pour NH_3 . Les moyennes annuelles varient de $5,15 \pm 1,59 \cdot 10^{14}$ (2014) à $6,97 \pm 2,76 \cdot 10^{14}$ molécules/cm² (2011) pour NO_2 et de $18,86 \pm 12,87 \cdot 10^{15}$ (2017) à $25,02 \pm 15,36 \cdot 10^{15}$ molécules/cm² (2008) pour NH_3 . Le cycle annuel est marqué par les saisons, avec des VCD élevées en saison sèche et faible en saison humide.

Les résultats obtenus ont permis de montrer que les hauteurs de pluies et les niveaux de densités verticales des deux gaz sont négativement corrélés, suggérant ainsi que la pluie participe à la baisse des niveaux de VCD de NO_2 et de NH_3 . De plus, les activités humaines à travers la combustion de la biomasse, les sources biogéniques et la pratique culturales, en zone rurale sont des sources importantes de gaz azotés dans cette zone et influencent l'évolution des profils verticaux de NH_3 et NO_2 .

Vu l'importance de la compréhension de l'évolution des gaz azotés (NO_2 et NH_3) en Afrique, surtout en Afrique tropicale humide, il serait intéressant de poursuivre les campagnes de mesures de ces gaz dans la zone de Lamto, afin d'avoir une base de données satellitaires assez importante. En outre, pour s'assurer de la fiabilité des données satellitaires, l'on devrait faire une comparaison qualitative et/ou quantitative entre les données in situ et les données satellitaires obtenues à Lamto.

Les études existantes ont pour but soit de produire des cartes de composés azotés via les satellites, soit d'obtenir des mesures in situ sur quelques sites en Afrique. Dans le but de combiner ces deux aspects, une étude permettant de déduire les concentrations au sol à partir des mesures satellitaires pourrait être envisagée. Elle permettrait d'avoir les concentrations de ces gaz azotés via un algorithme de conversion de densités en concentrations sur toute l'Afrique dans le but de produire des cartes de distribution spatiale de gaz azotés.

REFERENCES

- Abbadie L., Gignoux J., Roux X., Lepage M., (Eds.) (2006). Lamto: Structure, Functioning, and Dynamics of a Savanna Ecosystem. *In: Ecological Studies*. Edition Springer, Allemagne, pp. 179-415.
- Adon M. (2011). Etude des concentrations de gaz atmosphériques et estimation des flux de dépôt sec à l'échelle des principaux écosystèmes africains. Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 290 p.
- Adon, M., Galy-Lacaux, C., Delon, C., Yoboue, V., Solmon, F., Kaptue Tchunte, A.T. (2013). Dry deposition of nitrogen compounds (NO₂, NO₃, NH₃), sulfur dioxide and ozone in west and central African ecosystems using the inferential method. *Atmospheric Chem. Phys.* 13, 11351–11374.
- 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. & Mougou E. (2010). Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15) : 7467–7487.
- Assamoi A.Y.E.-M. (2011). Emissions anthropiques d'aérosols carbonés en Afrique en 2005 et en 2030: élaboration d'inventaires et évaluation. Thèse de doctorat, Université de Toulouse (Toulouse, France), 259 p.
- Bahino D.J. (2013). Caractéristiques chimiques des aérosols carbonés collectés par spéciation de taille PM_{2,5} et PM₁₀ dans la forêt équatoriale de Zoétélé (Cameroun) . Mémoire de Master 2 Energetique et Environnement, Université Félix Houphouet Boigny Abidjan, (Abidjan,Cote d'Ivoire), 74 p.
- Binkley D. & Richter D. (1987). Nutrient Cycles and H⁺ Budgets of Forest Ecosystems. *In: Advances in Ecological Research*, Elsevier, pp. 1–51.
- Bouwman A.F., Boumans L.J.M. & Batjes N.H. (2002). Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4) : 281-289.
- Bouwman A.F., Lee D.S., Asman W.A.H., Dentener F.J., Van Der Hoek K.W. & Olivier J.G.J. (1997). A global high-resolution emission inventory for ammonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(4) : 561–587.

- Brimblecombe P., Hara H., Houle D. & Novak M. (eds.) (2007). Acid Rain – Deposition to Recovery, reprinted from Water Air and Soil Pollution. Springer Edition, Pays-Bas, (7) : 1-3.
- Calabri, G. and W.M. Cisela, (1992). Global wildland fire statistics, FO Misc/92/4, FAO, Rome (Italie), 48 p.
- CFHA (2005). Les polluants atmosphériques azotés en Suisse. Rapport de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA), 174 p.
- Clarisse L., Clerbaux C., Dentener F., Hurtmans D. & Coheur P.-F. (2009). Global ammonia distribution derived from infrared satellite observations. *Nature Geoscience*, 2 (7) : 479–483.
- Delmas R., Lacaux J.P., Menaut J.C., Abbadie L., Le Roux X., Helas G. & Lobert J. (1995). Nitrogen compound emission from biomass burning in tropical African savanna FOS/DECAFE 1991 experiment (Lamto, Ivory Coast). *Journal of Atmospheric Chemistry*, 22 (1–2) : 175–193.
- Delmas R., Mégie G. & Peuch V.-H. (eds.) (2005). Physique et chimie de l'atmosphère. Belin, Paris, 639 p.
- Delon, C., Galy-Lacaux, C., Adon, M., Liousse, C., Serça, D., Diop, B., Akpo, A. (2012). Nitrogen compounds emission and deposition in West African ecosystems : comparison between wet and dry savanna. *Biogeosciences*, (9) : 385–402.
- Diawara A., Yoroba F., Kouadio K.Y., Kouassi K.B., Assamoi E.M., Diedhiou A. & Assamoi P. (2014). Climate Variability in the Sudano-Guinean Transition Area and Its Impact on Vegetation: The Case of the Lamto Region in Côte D'Ivoire. *Advances in Meteorology*, 2014 (400) : 11.
- Fagerli H. & Aas W. (2008). Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980–2003. *Environmental Pollution*, 154 (3) : 448–461.
- Galloway J.N., Dentener F.J., Capone D.G., Boyer E.W., Howarth R.W., Seitzinger S.P., Asner G.P., Cleveland C.C., Green P.A., Holland E.A., Karl D.M., Michaels A.F., Porter J.H., Townsend A.R. & Vosmartly C.J. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 70 (2) : 153–226.

- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science*, (320) : 889–892.
- Gautier L. (2014). Contact forêt-savane en Côte d’Ivoire centrale: évolution de la surface forestière de la réserve de Lamto (sud du V-Baoulé). *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 136 : 85–92.
- Geupel, M. (2015), « Towards a National Nitrogen Strategy for Germany », exposé à destination du Comité des politiques d’environnement de l’OCDE (EPOC), 6-8 octobre 2015, Agence fédérale pour l’environnement d’Allemagne, Section II 4.3 Contrôle de la qualité de l’air et des écosystèmes terrestres.
- Gueulou N., Douffi K.G.-C., Yenilougo S., Kone M. & Bakayoko A. (2020). Evaluation de la couverture forestière et du stock de carbone forestier de la réserve scientifique de Lamto (Côte d’Ivoire). 28 (3) : 9.
- Hamed K.H. & Ramachandra Rao A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4) : 182–196.
- Hao W.M. & Liu M.-H. (1994). Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 8 (4) : 495–503.
- Helsel, D.R., Hirsch, R.M. (2002). *Statistical Methods in Water Resources*.
<https://doi.org/10.13140/rg.2.2.36048.10248>.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R., Smith, R.A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resource Res*, (18) : 107–121.
- Holleman A.F., Wiberg E., Wiberg N., Eagleson M., Brewer W.D. & Aylett B.J. (2001). *Inorganic chemistry*, Academic Press, Berlin, 1884 p.
- Huffman G.J., Bolvin D.T., Nelkin E.J. & Tan J. (2019). Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), Technical Documentation, 64 p.
- Huffman G.J., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Wolff D.B., Adler R.F., Gu G., Hong Y., Bowman K.P. & Stocker E.F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1) : 38–55.

- Johansson C., Rodhe H. & Sanhueza E. (1988). Emission of NO in a tropical savanna and a cloud forest during the dry season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93 (D6) : 7180–7192.
- Lacaux, J.P., Cachier H., and Delmas R (1993). Biomass burning in Africa: An overview of its impact on atmospheric chemistry, in *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric and Climatic Importance of Vegetation Fires. Environmental Science Research Report 13*, Crutzen P.J. et Goldammer J.G. (Eds.), New York, 159-191 pp.
- Lacaux, J.P., Delmas R., Jambert C., Kuhlbusch, T.A.J. (1996). NO_x emissions from African savanna fires. *Journal Geophysic Res. Atmospheres*, 101: 23585–23595.
- Lamarque J.-F., Dentener F., McConnell J., Ro C.-U., Shaw M., Vet R., Bergmann D., Cameron-Smith P., Dalsoren S., Doherty R., Faluvegi G., Ghan S.J., Josse B., Lee Y.H., MacKenzie I.A., Plummer D., Shindell D.T., Skeie R.B., Stevenson D.S., Strode S., et al. (2013). Multi-model mean nitrogen and sulfur deposition from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP): evaluation of historical and projected future changes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16) : 7997–8018.
- Lamotte (1967). Recherches ecologiques dans la savane de lamto (cote d'ivoire) : Repartition de la vegetation dans la savane pre-forestiere, 24 p.
- Levelt P.F., van den Oord G.H.J., Dobber M.R., Malkki A., Huib Visser, Johan de Vries, Stammes P., Lundell J.O.V. & Saari H. (2006). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5) : 1093–1101.
- Lovett, G.M., 1994. Atmospheric Deposition of Nutrients and Pollutants in North America: An Ecological Perspective. *Ecological Application*, (4) : 629–650.
- Menut L., Attié J.L., Beekmann M., Bessagnet B., Clerbaux C., Cuesta J., Dufour G., Forêt G., Amraoui L.E., Mallet M., Meleux F., Ricaud P., Tanré D. & Turquety S. (2017). Apport de l'observation satellite à l'analyse et à la prévision de la qualité de l'air, 12 p.
- Ossouhou M., Galy-Lacaux C., Yoboué V., Hickman J.E., Gardrat E., Adon M., Darras S., Laouali D., Akpo A., Ouafou M., Diop B. & Opepa C. (2019). Trends and seasonal variability of atmospheric NO₂ and HNO₃ concentrations across three major African biomes inferred from long-term series of ground-based and satellite measurements. *Atmospheric Environment*, 207: 148–166.

- Ossouhou M.G. (2020). Etude des tendances des concentrations atmosphériques des gaz azotés en Afrique-Bilan de dépôt atmosphérique secs et humide d'azote de l'écosystème de savane humide de Lamto (Côte d'Ivoire). Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan (côte d'Ivoire), 261p.
- Pio C.A. & Harrison R.M. (1987). The equilibrium of ammonium chloride aerosol with gaseous hydrochloric acid and ammonia under tropospheric conditions. *Atmospheric Environment* (1967), 21 (5) : 1243–1246.
- Schlesinger W.H. & Hartley A.E. (1992). A global budget for atmospheric NH₃. *Biogeochemistry*, 15 (3) : 191–211.
- Sen (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal Am. Statistic Association*, (63) : 1379–1389.
- Sutton T.T., Porteiro F.M., Heino M., Byrkjedal I., Langhelle G., Anderson C.I.H., Horne J., Sjøiland H., Falkenhaus T., Godø O.R. & Bergstad O.A. (2008). Vertical structure, biomass and topographic association of deep-pelagic fishes in relation to a mid-ocean ridge system. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55 (1–2) : 161–184.
- Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature*, (472) : 159–161.
- Van Damme M., Clarisse L., Heald C.L., Hurtmans D., Ngadi Y., Clerbaux C., Dolman A.J., Erisman J.W. & Coheur P.F. (2014). Global distributions, time series and error characterization of atmospheric ammonia from IASI satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14 (6) : 2905–2922.
- Villecourt P. & Roose E. (1978). Charge en azote et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolessivage et de drainage dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). *Revue Ecologie Biologie Sol*, 15 (1) : 1-20.
- Vincensini A. (2013). Contribution du sondeur iasi a l'estimation des paramètres des surfaces continentales pour la prévision numérique du temps. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Toulouse (France), 234p.
- Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H. & Tilman D.G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle:

- sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3) : 14.
- Tilman D.G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3) : 737-750.
- Ward B.B. (Eds.) (2008). Nitrification. In: Encyclopedia of Ecology. Jørgensen S.E. & Fath B.D., Academic Press, 2511–2518 p.
- Whitburn S., Van Damme M., Clarisse L., Hurtmans D., Clerbaux C. & Coheur P.-F. (2017). IASI-derived NH₃ enhancement ratios relative to CO for the tropical biomass burning regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17 (19) : 12239–12252.
- Yoboué, V., Galy-Lacaux, C., Lacaux, J.P., Silué, S. (2005). Rainwater Chemistry and Wet Deposition over the Wet Savanna Ecosystem of Lamto (Côte d'Ivoire). *Journal Atmospheric Chemistry*, (52) : 117–141. <https://doi.org/10.1007/s10874-005-0281-z>

ANNEXES

Annexe 1 : Test de Tendance Mensuelle NO₂

Annexe 2 : Test de tendance Mensuelle NH₃

Annexe 3 : Test de tendance Saisonnier NO₂

Annexe 4 : Test de tendance saisonnier NH₃

Annexe 5 : Test de tendance interannuelle

Annexe 1 : Test de Tendance Mensuelle NO₂

- Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
NO ₂	120	0	120	1,650	16,860	6,002	3,203

- Test de Mann-Kendall saisonnier / Période = 12 / Indépendance sérielle / Test bilatéral (NO₂):

Tau de Kendall	-0,200
S'	-108,000
Var(S')	1500,000
p-value (bilatérale)	0,006
alpha	0,100
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H₀ : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,1$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H₀, et retenir l'hypothèse alternative H_a.

La correction de continuité a été appliquée.

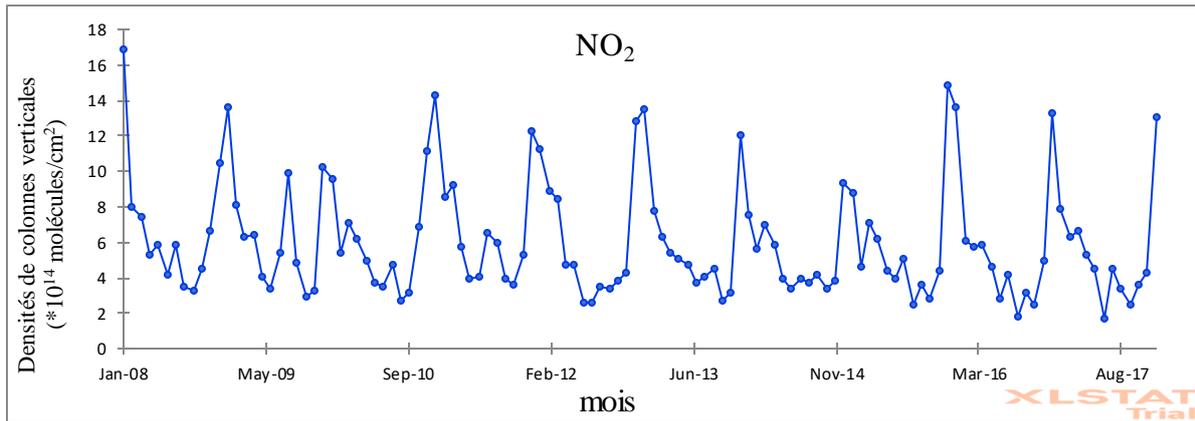


Figure : Tendence mensuelle de NO₂

- Synthèse :

Série\Test	Tau de Kendall	p-value	Pente de Sen
NO ₂	-0,200	0,006	-0,100

Annexe 2 : Test de tendance Mensuelle NH₃

- Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
NH ₃	120	11	109	0,550	65,716	21,848	16,432

- Test de Mann-Kendall saisonnier / Période = 12 / Indépendance sérielle / Test bilatéral (NH₃) :

Tau de Kendall	-0,113
S'	-51,000
Var(S')	1198,333
p-value (bilatérale)	0,149
alpha	0,100
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H₀ : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0,1, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

La correction de continuité a été appliquée.

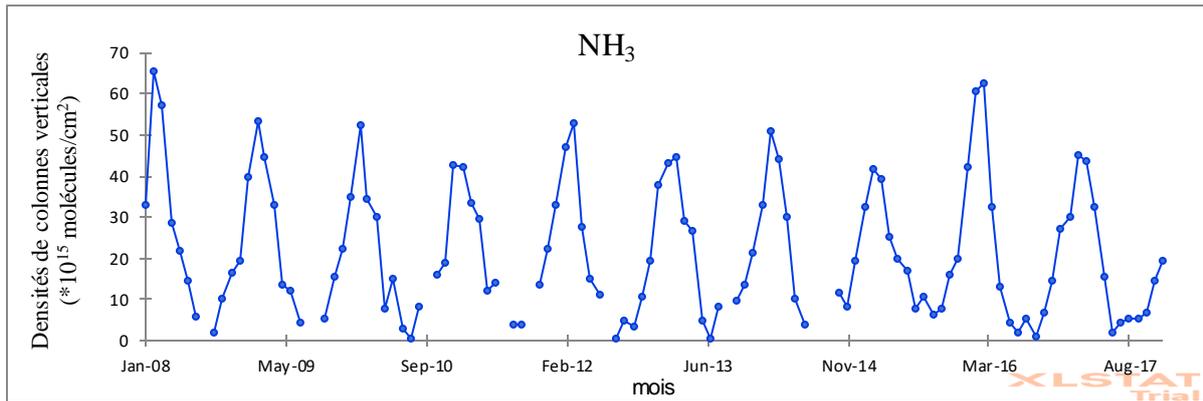


Figure : Tendence mensuelle de NH₃

- Synthèse :

Série\Test	Tau de Kendall	p-value	Pente de Sen
NH ₃	-0,113	0,149	-0,122

Annexe 3 : Test de tendance Saisonier NO₂

- Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
Sèche	10	0	10	0.666	0.995	0.849	0.101
Humide	10	0	10	0.358	0.528	0.423	0.056

- ❖ Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (saison sèche) :

Tau de Kendall	-0.378
S	-17.000
Var(S)	125.000
p-value (bilatérale)	0.152
alpha	0.1
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H_0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.1$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

La correction de continuité a été appliquée.

- Pente de Sen :

	Valeur	Borne inférieure (90%)	Borne supérieure (90%)
Pente	-0.022	-0.038	0.002
Constante	45.943	21.057	61.855

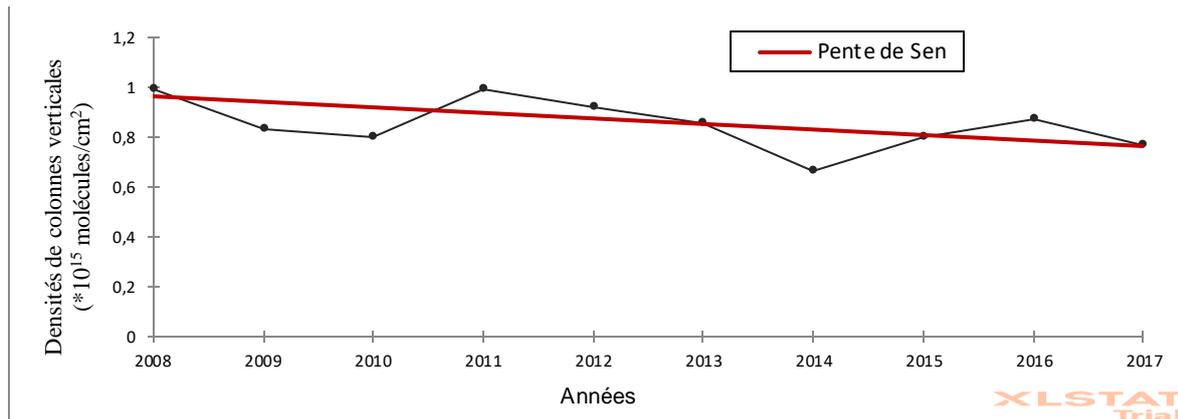


Figure : Tendance de la saison sèche.

❖ Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (saison humide) :

Tau de Kendall	-0.600
S	-27.000
Var(S)	125.000
p-value (bilatérale)	0.020
alpha	0.1
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H_0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.1$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a .

La correction de continuité a été appliquée.

- Pente de Sen :

	Valeur	Borne inférieure (90%)	Borne supérieure (90%)
Pente	-0.017	-0.024	-0.007
Constante	34.359	24.385	41.874

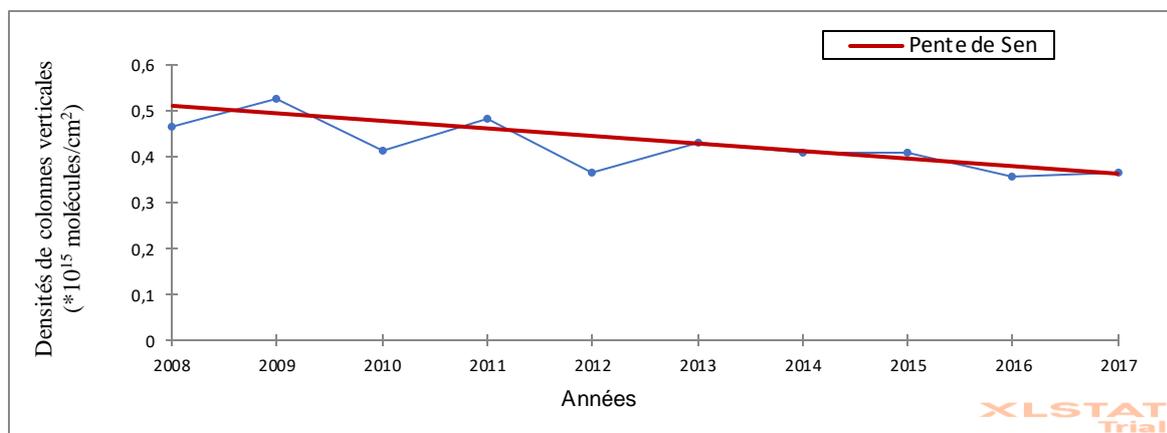


Figure : Tendence de la saison humide

Annexe 4 : Test de tendance saisonnier NH₃

- Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
Sèche	10	0	10	29,836	41,384	33,379	3,786
Humide	10	0	10	7,947	13,610	10,179	1,667

- ❖ Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (saison sèche) :

Tau de Kendall	-0,378
S	-17,000
Var(S)	125,000
p-value (bilatérale)	0,152
alpha	0,100
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H_0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,1$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

La correction de continuité a été appliquée.

- Pente de Sen :

	Valeur	Borne inférieure (90%)	Borne supérieure (90%)
Pente	-0,424	-0,919	0,098
Constante	885,294	359,868	1383,360

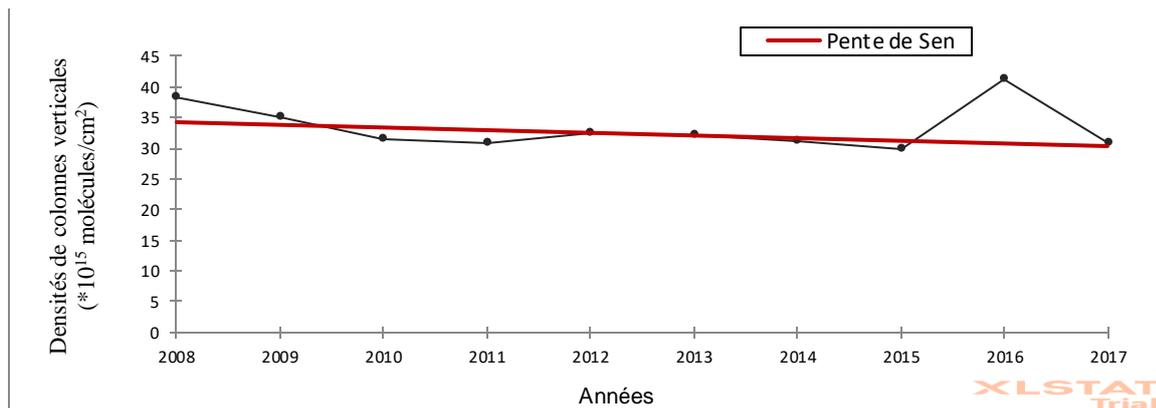


Figure : Tendence de la saison sèche.

❖ Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (saison humide) :

Tau de Kendall	-0,067
S	-3,000
Var(S)	125,000
p-value (bilatérale)	0,858
alpha	0,100
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H_0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,1$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

La correction de continuité a été appliquée.

- Pente de Sen :

	Valeur	Borne inférieure (90%)	Borne supérieure (90%)
Pente	-0,102	-0,363	0,271
Constante	214,931	-160,228	477,743

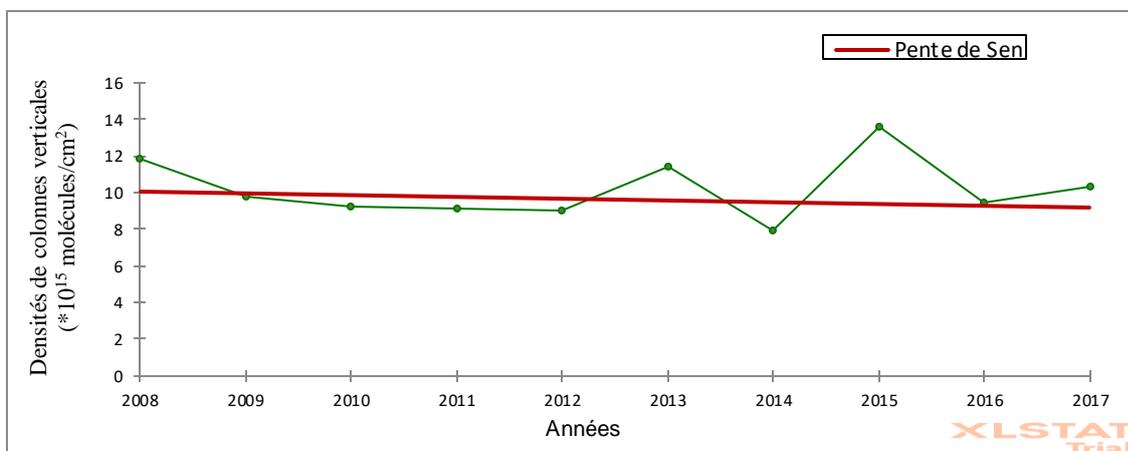


Figure : Tendence de la saison humide.

- ❖ Synthèse :

Série\Test	Tau de Kendall	p-value	Pente de Sen
Sèche	-0,378	0,152	-0,424
Humide	-0,067	0,858	-0,102

Annexe 5 : Test de tendance interannuelle

- Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
NO ₂	10	0	10	5,154	6,971	6,002	0,612
NH ₃	10	0	10	18,859	25,017	21,935	1,997

- ❖ Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (NO₂) :

Tau de Kendall	-0,556
S	-25,000
Var(S)	125,000
p-value (bilatérale)	0,032
alpha	0,100
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H₀ : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,1$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H₀, et retenir l'hypothèse alternative H_a.

La correction de continuité a été appliquée.

- Pente de Sen :

	Valeur	Borne inférieure (90%)	Borne supérieure (90%)
Pente	-0,151	-0,276	-0,062
Constante	310,174	220,007	435,883

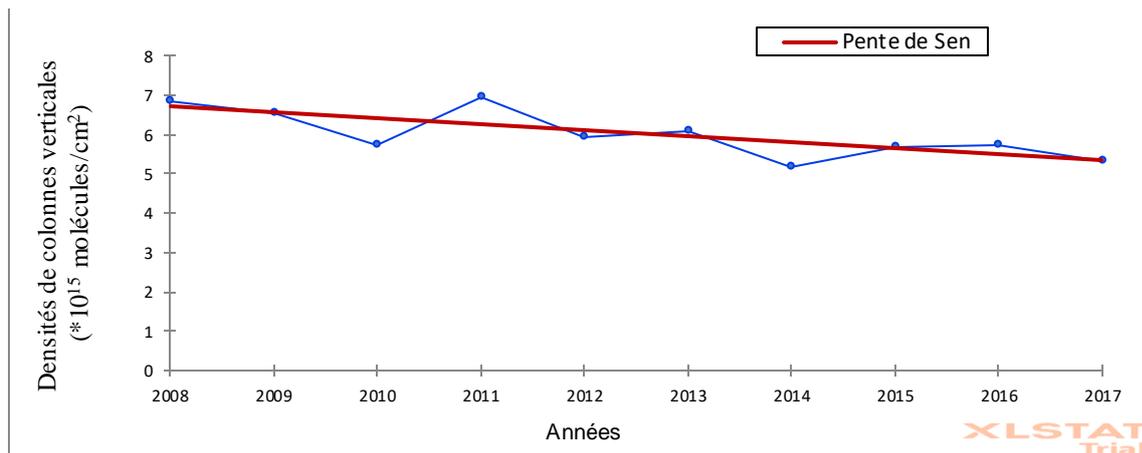


Figure : Tendance interannuelle de NO₂

❖ Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (NH3) :

Tau de Kendall	-0,378
S	-17,000
Var(S)	125,000
p-value (bilatérale)	0,152
alpha	0,100
Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.	

- Interprétation du test :

H₀ : Il n'y a pas de tendance dans la série

H_a : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,1$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

La correction de continuité a été appliquée.

- Pente de Sen :

	Valeur	Borne inférieure (90%)	Borne supérieure (90%)
Pente	-0,375	-0,734	0,045
Constante	776,122	353,635	1137,435

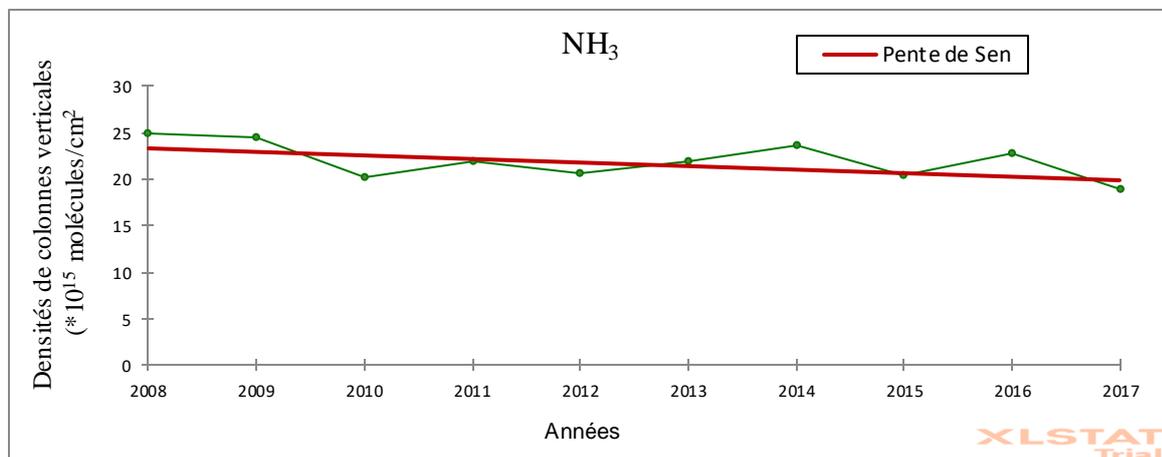


Figure : Tendence interannuelle de NH_3

- Synthèse :

Série\Test	Tau de Kendall	p-value	Pente de Sen
NO_2	-0,556	0,032	-0,151
NH_3	-0,378	0,152	-0,375

RESUME

L'azote, omniprésent dans la nature, est le constituant majeur de l'atmosphère, et le quatrième composant en quantité des êtres vivants après le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. Cependant, seule une petite fraction de l'azote est immédiatement disponible pour ces derniers. De plus, une simple molécule d'azote réactif peut avoir de multiples conséquences sur l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Or, la problématique de l'azote atmosphérique est un sujet très peu documenté en Afrique de manière générale, et en Afrique tropicale humide en particulier. La présente étude a porté sur l'analyse des variations et tendances des gaz azotés NO_2 et NH_3 par mesures satellitaires à Lamto. Pour ce faire, une base de données mensuelle de mesures satellitaires de colonnes de NO_2 , NH_3 et de hauteurs de pluies à Lamto sur une période de 10 ans de mesures (2008-2017) a été utilisée. Cette analyse a permis de déterminer les variations et tendances mensuelles, saisonnière et interannuelles en relation avec les sources. Dans un deuxième temps, ils montrent une diminution continue des densités de colonne verticale des gaz azotés NO_2 et NH_3 dans la zone de Lamto. La principale cause de cette diminution est la baisse due aux émissions provenant de la combustion de la biomasse et aux sources biogéniques présentes dans la zone d'étude. On note également une influence assez considérable des activités humaines sur l'évolution des profils verticaux des gaz NO_2 et NH_3 .

Mots clés : Gaz azotés, Mesures satellitaires, Densité de colonne verticale, Savane humide.

ABSTRACT

Nitrogen, ubiquitous in nature, is the major constituent of the atmosphere, and the fourth largest component in quantity of living beings after carbon, hydrogen and oxygen. However, only a small fraction of nitrogen is immediately available to living things. Moreover, a single molecule of reactive nitrogen can have multiple consequences on the atmosphere, the hydrosphere and the biosphere. However, the problem of atmospheric nitrogen is a very little documented subject in Africa in general, and in humid tropical Africa in particular. The present study focused on the analysis of variations and trends of the nitrogen gases NO_2 and NH_3 by satellite measurements at Lamto. For this purpose, a monthly database of satellite measurements of NO_2 , NH_3 columns and rainfall heights at Lamto over a 10-year period of measurements (2008-2017) was used. This analysis allowed the determination of monthly, seasonal and interannual variations and trends in relation to the sources. In a second step, they show a continuous decrease in the vertical column densities of the nitrogen gases NO_2 and NH_3 in the Lamto area. The main cause of this decrease is the decrease due to emissions from biomass combustion and biogenic sources present in the study area. There is also a rather considerable influence of human activities on the evolution of the vertical profiles of the NO_2 and NH_3 gases.

Keywords: Nitrogenous gases, Satellite measurements, Vertical column density, Wet savannah.