



UNIVERSITÉ DU BURUNDI
FACULTÉ DES SCIENCES
GROUPE POLYTECHNIQUE
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

RAPPORT DE STAGE EFFECTUÉ AU CENTRE DE RECHERCHE EN
MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUE ET RÉDIGÉ POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME DE BACCALAURÉAT EN SCIENCES PHYSIQUES

MESURE ET ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES AÉROSOLS : OUTILS ET APPLICATIONS

Par

NDAYIZEYE Ernest

Sous l'encadrement de :
Dr Salomon MUGISHA
MSc Eugène NDENZAKO

Service d'accueil : Groupe de Recherche sur l'Air
Propre au BURUNDI ou Clean Air Research Group in
BURUNDI en anglais
Période de stage : Du 19 Août au 19 Septembre 2024
Année académique : 2023-2024

Bujumbura, Septembre 2024

Tables de matières

DEDICACE	iii
REMERCIEMENT	iv
SIGLES ET ABREVIATIONS	v
1 INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 Présentation Générale du Centre de Recherche en Mathématiques et Physique(CRMP)	2
1.1.1 Situation géographique	2
1.1.2 Historique et Mission	2
1.2 Objectifs du stage	2
1.3 Compétences visées	3
2 DESCRIPTION DU PHOTOMÈTRE SOLAIRE CIMEL	4
2.1 Historique	4
2.1.1 Origine et développement.	4
2.1.2 Cadre de Coopération entre l ' Université du Burundi et l ' Université de Lille	5
2.2 Institut de l'aéronomie Spatiale de Belgique en collaboration avec l'Université du BURUNDI	6
2.2.1 Acquisition des instruments et mise en oeuvre de la collaboration .	6
2.2.2 Résultats et Impact de la Coopération entre l'Université du Burundi et l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)	6
3 COMPREHENSION DES PARTICULES PM2.5 ET PM10	8
3.1 Introduction	8
3.2 Caractéristiques des particules PM2.5 et PM10	8
3.2.1 Définition et Classification	8
3.2.2 Sources d'Émission	9
3.2.3 Composition Chimique et Physique des Particules PM2.5 et PM10 .	9
3.3 Méthode de Mesure et de Surveillance des Particules PM2.5 et PM10 . . .	10
3.3.1 Instruments et Techniques de Mesure des Particules PM2.5 et PM10	10
3.4 Réseaux de Surveillance de la Qualité de l'Air	11
3.4.1 Réseaux nationaux et internationaux	11
3.4.2 Stations de surveillance	11
3.4.3 Données collectées	11
3.5 Impact sur la Santé Publique	11
3.6 Impact Environnemental des Particules PM2.5 et PM10	12
4 ETUDES DE CAS ET APPLICATIONS PRATIQUES DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS(AOD)	14
4.1 Méthodologie de mesure de l'AOD	14

4.1.1	Longueurs d'Onde dans les mesures d'AOD	14
4.1.2	Importance des longueurs d'Onde	15
4.1.3	Protocoles de collecte des données	15
4.2	Relation entre l'AOD et les longueurs d'onde	15
4.3	Applications Pratiques de l'AOD pour longueurs d'onde	16
4.4	Effets des aérosols sur le climat	16
4.5	Comparaison des données AOD par longueur d'onde	17

DEDICACE

A Dieu tout puissant,
A nos très chers parents,
A nos frères et sœurs ,
A toute la famille,
A nos camarades de classe,
A nos amis et connaissances,
Nous dédions ce rapport.

NDAYIZEYE Ernest

REMERCIEMENTS

Je remercie mon Seigneurs DIEU qui est tout puissant.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce rapport de stage intitulé **MESURE ET ANALYSE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES AEROSOLS : OUTILS ET APPLICATIONS**.

Je souhaite tout particulièrement remercier **Msc NDENZAKO Eugène**, dont l'aide précieux concernant le réseau AERONET au sein du **Groupe de Recherche sur l'Air Propre au Burundi ou Clean Air Research Group in BURUNDI en anglais** a été déterminante durant mon stage. Sa disponibilité et son expertise m'ont grandement enrichi.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement **Msc Eugène NDENZAKO** et **Dr Salomon MUGISHA**, mes encadreurs principaux, pour leur soutien indéfectible, leurs conseils avisés et leur expertise. Leur encadrement a été précieux tout au long de cette expérience, et j'ai énormément appris grâce à leur disponibilité et à leur bienveillance.

Je souhaite également adresser mes remerciements à **Dr Janvier Pesser NTAHOM-VUKIYE**, Directeur général du Centre de Recherche en Mathématiques et Physique. Sa confiance et son encouragement ont grandement facilité mon intégration au sein de l'équipe et ont enrichi mon parcours. Je remercie tous mes collègues et amis qui ont partagé cette aventure avec moi ; leur camaraderie et leur enthousiasme ont rendu cette expérience encore plus enrichissante.

Enfin, j'adresse toutes mes gratitudes à mes parents, mes frères et sœurs qui me ont apporté soutien et encouragement tout au long de mes études.

Merci à tous !

SIGLES ET ABREVIATIONS

1. CRMP : Centre de Recherche en Mathématiques et Physique
2. UB : Université du Burundi
3. AERONET : Aerosol Robotic Network en anglais
4. AOD : Epaisseur Optique des Aérosols(Aerosol Optique Depht en anglais)
5. IASB : Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique
6. NASA : National Aeronautics and Space Administration en anglais ou Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace en français

Chapitre 1

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte mondial marqué par les préoccupations croissantes liées au changement climatique et à la dégradation de la qualité de l'air, l'étude des aérosols s'impose comme un domaine de recherche essentiel. C'est dans cette optique que j'ai choisi d'effectuer mon stage au sein de l'institut de **Centre de Recherche en Mathématique et Physique (CRMP en Sigle)** précisément à l'institution du **Groupe de Recherche de l'Air Propre au BURUNDI ou Clean Air Research Group in BURUNDI en anglais**, un organisme reconnu pour ses travaux de recherche sur l'environnement et la santé publique. Cette institution offre un cadre idéal pour approfondir mes connaissances sur les impacts des aérosols, en raison de son expertise et de ses ressources dédiées à l'analyse de la qualité de l'air.

Le choix du thème : **Mesure et analyse des propriétés physiques des aérosols : Outils et Applications** découle de mes intérêts pour les interactions complexes entre les particules en suspension dans l'air et leurs effets sur notre écosystème.

Les aérosols jouent un rôle crucial dans le bilan énergétique de la Terre et peuvent avoir des conséquences significatives sur la santé humaine. En me concentrant sur le photomètre de Bujumbura, j'ai souhaité explorer les données locales et contribuer à la compréhension des enjeux environnementaux spécifiques à cette région.

Au cours de ce stage, mes missions ont consisté à analyser les données collectées par le photomètre solaire CIMEL, à évaluer les tendances et à examiner les impacts des aérosols sur le climat et la santé publique. Cette expérience j' a permis de développer des compétences en recherche et en analyse de données, tout en collaborant avec des experts du domaine.

Ce rapport de stage est structuré en plusieurs sections. Dans un premier temps, je présenterai le cadre théorique entourant les aérosols et leur importance. Ensuite, j' aborderai la méthodologie utilisée pour la collecte et l'analyse des données. Enfin, je présenterai les résultats obtenus, suivis d'une discussion sur leurs implications pour le climat, l'environnement et la santé, avant de conclure sur les perspectives futures. Ainsi, ce rapport se veut une contribution à la recherche sur les aérosols et une réflexion sur leur impact dans notre société.

1.1 Présentation Générale du Centre de Recherche en Mathématiques et Physique(CRMP)

1.1.1 Situation géographique

Le Centre de Recherche en Mathématiques et Physique de l'Université du Burundi(UB) est situé à Bujumbura, l'ancienne capitale du pays, dans le campus de la Faculté des Sciences. Ce cadre géographique offre un environnement propice à la recherche et à l'enseignement, avec un accès facile à diverses infrastructures académiques et à des ressources nécessaires pour les chercheurs et les étudiants. La proximité des institutions gouvernementales et des organisations non gouvernementales renforce également les possibilités de collaboration et d'échange.

1.1.2 Historique et Mission

Le Centre de Recherche en Mathématiques et Physique a été fondé au début des années 2000 dans le but de promouvoir la recherche scientifique au Burundi. Sa création est née d'un besoin croissant d'expertise dans les domaines des mathématiques et de la physique, qui sont essentiels pour le développement socio-économique du pays. Depuis sa fondation, le centre a contribué à la formation de chercheurs et à l'élaboration de projets de recherche innovants, établissant des partenariats avec d'autres institutions académiques à l'échelle nationale et internationale.

La mission du Centre de Recherche en Mathématiques et Physique est de promouvoir l'excellence en recherche et en enseignement dans ces disciplines fondamentales. Le centre vise à former des chercheurs compétents capables de répondre aux défis scientifiques et technologiques du Burundi et de la région. Il s'engage à mener des recherches de pointe, à publier des résultats significatifs et à organiser des séminaires et des ateliers pour diffuser les connaissances.

En outre, il aspire à renforcer la qualité de l'enseignement des mathématiques et de la physique à l'université, en intégrant la recherche dans le processus éducatif et en encourageant l'innovation.

1.2 Objectifs du stage

L'un des principaux objectifs de ce stage est de décrire en détail le photomètre solaire utilisé pour la mesure des aérosols. Les stagiaires apprendront à comprendre le fonctionnement de cet instrument, ses composants techniques et les principes de mesure. Cette connaissance leur permettra d'appréhender l'importance de cet outil dans l'évaluation de la qualité de l'air et du climat, tout en leur fournissant les compétences nécessaires pour utiliser le photomètre dans des contextes pratiques.

Un autre objectif essentiel est d'analyser l'épaisseur optique des aérosols ainsi que de comprendre les particules qui les composent. Les stagiaires seront formés à effectuer des mesures précises de l'épaisseur optique et à interpréter ces données en relation avec les types de particules présentes dans l'atmosphère. Cela leur permettra de mieux saisir comment ces particules influencent les conditions environnementales et climatiques, et d'évaluer leur impact sur la santé publique.

Enfin, le stage vise à explorer des études de cas et des applications pratiques de l'AOD (Aerosol Optical Depth en anglais). Les stagiaires examineront des exemples concrets

d'utilisation des données sur l'AOD pour évaluer la qualité de l'air dans différentes régions. Ils pourront également analyser les implications de ces données dans des contextes variés, tels que la gestion de la pollution et la sensibilisation des communautés. Cet objectif permettra aux stagiaires de relier la théorie à la pratique, tout en développant des recommandations basées sur leurs observations.

1.3 Compétences visées

L'une des compétences clés développées au cours de ce stage est la maîtrise de l'utilisation du photomètre solaire. Les stagiaires apprendront à manipuler cet instrument, à comprendre ses composants et à réaliser des mesures précises des aérosols. Cette compétence est essentielle pour garantir la fiabilité des données collectées.

Une autre compétence importante concerne la compréhension de l'épaisseur optique des aérosols et des particules qui les composent. Les stagiaires seront formés à analyser les résultats des mesures et à interpréter les données relatives aux différentes particules présentes dans l'atmosphère. Cela leur permettra de mieux appréhender les impacts environnementaux et climatiques des aérosols.

Enfin, le stage vise à développer des compétences en analyse des études de cas et des applications pratiques de l'AOD. Les stagiaires auront l'occasion d'explorer des exemples concrets d'utilisation des données sur l'AOD pour évaluer la qualité de l'air. Ils apprendront à formuler des recommandations basées sur ces analyses, renforçant ainsi leur capacité à relier théorie et pratique dans le domaine de la mesure des aérosols.

Chapitre 2

DESCRIPTION DU PHOTOMÈTRE SOLAIRE CIMEL

L'étude des aérosols atmosphériques et leur impact sur le climat et la qualité de l'air est devenue une priorité mondiale en raison de leurs effets significatifs sur la santé publique et l'environnement.

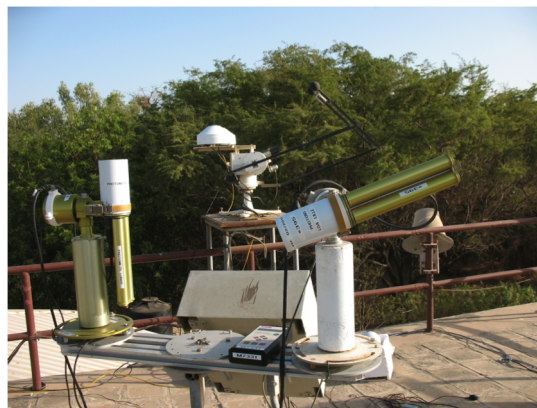
Dans ce contexte, les photomètres solaires CIMEL se sont imposés comme des outils essentiels pour mesurer les propriétés optiques des aérosols. Depuis leur installation dans le cadre du réseau AERONET, ces instruments ont permis de collecter des données précieuses à l'échelle mondiale. L'Université du Burundi, en collaboration avec des partenaires internationaux, a intégré un photomètre CIMEL dans ses activités de recherche, marquant un tournant important dans la surveillance de la qualité de l'air dans la région des Grands Lacs africains. Dans cette perspective, j' examinerai l'historique des photomètres solaires CIMEL depuis leur installation, ainsi que le cadre de coopération entre l'Université du Burundi et ses partenaires, mettant en lumière l'importance de cette initiative pour la recherche scientifique et la sensibilisation aux enjeux environnementaux.

2.1 Historique

L'historique du photomètre solaire CIMEL retrace le développement et l'évolution de cet instrument crucial, qui a été conçu pour améliorer la compréhension des propriétés optiques des aérosols et de l'irradiance solaire, contribuant ainsi de manière significative à la recherche climatique et environnementale à l'échelle mondiale.

2.1.1 Origine et développement.

Le photomètre solaire CIMEL a été développé dans un contexte des années 1990, répondant à la demande croissante de mesures précises des propriétés optiques des aérosols, alors que les scientifiques cherchaient à mieux comprendre leur impact sur le climat et la qualité de l'air. Conçu en France, le CIMEL a été pensé comme un instrument léger, portable et automatisé, capable de fournir des données fiables sur l'absorption et la diffusion de la lumière solaire à différentes longueurs d'onde. Les premiers déploiements des photomètres ont eu lieu dans le cadre de projets de recherche en France, garantissant une calibration rigoureuse et le développement de protocoles standardisés pour la collecte de données.



Les figures de l'appareil du photomètre solaire CIMEL

Intégration dans le Réseau AERONET

Le lancement du réseau AERONET (Aerosol Robotic Network en anglais) en 1993 par la NASA (National Aeronautics and Space Administration en anglais) a marqué une étape importante dans la collecte de données sur les aérosols à l'échelle mondiale, avec l'intégration des photomètres CIMEL pour standardiser les mesures à travers différents sites. Au cours des années 1990 et 2000, AERONET a élargi son réseau pour inclure des milliers de sites à travers le monde, ce qui a permis une collecte de données variées sur les aérosols et leur impact sur l'atmosphère. Les instruments CIMEL sont rapidement devenus essentiels pour ce réseau, fournissant des données précieuses sur l'épaisseur optique des aérosols (AOD) et d'autres propriétés atmosphériques, facilitant ainsi la recherche climatique et améliorant notre compréhension des interactions entre les aérosols et le climat.

Innovations Technologiques du Photomètre Solaire CIMEL

Entre 2000 et 2010, les modèles de photomètres CIMEL ont bénéficié de plusieurs innovations technologiques significatives, notamment l'intégration de détecteurs plus sensibles et de systèmes de calibrage automatique, ce qui a renforcé la fiabilité des mesures. Parallèlement, les logiciels associés aux photomètres ont été mis à jour pour inclure des algorithmes avancés, permettant un traitement plus efficace des données et une meilleure visualisation des résultats. De plus, les nouvelles versions des CIMEL intègrent des options de connectivité pour la transmission des données en temps réel, facilitant ainsi l'accès aux informations pour la communauté scientifique à l'échelle mondiale et améliorant la collaboration dans le domaine de la recherche sur les aérosols.

2.1.2 Cadre de Coopération entre l'Université du Burundi et l'Université de Lille

Le cadre de coopération entre l'Université du Burundi et l'Université de Lille vise à renforcer la recherche sur les aérosols à travers l'utilisation conjointe des photomètres solaires CIMEL, facilitant ainsi l'échange de connaissances, de données et de ressources entre les deux institutions.

L'établissement de cette coopération entre l'Université ces deux institutions a commencé en 2015, avec l'initiation d'un partenariat visant à renforcer la recherche sur les aérosols et la qualité de l'air dans la région des Grands Lacs. En 2016, l'Université de Lille a assisté l'Université du Burundi dans l'acquisition et l'installation d'un photomètre CIMEL sur

son campus, garantissant ainsi une configuration optimale. Pour assurer une utilisation efficace de cet instrument, des sessions de formation ont été organisées en 2017, permettant au personnel burundais de se familiariser avec son fonctionnement, la calibration et l'analyse des données. Des ateliers supplémentaires en 2018 ont approfondi ces compétences, intégrant des études de cas pratiques.

Entre 2019 et 2021, des projets de recherche conjoints ont été lancés pour mesurer les niveaux d'aérosols et analyser leurs impacts sur la santé publique et le climat local, donnant lieu à plusieurs publications scientifiques. En 2022, les résultats de ces recherches ont été publiés dans des revues scientifiques et présentés lors de conférences internationales, augmentant ainsi la visibilité des travaux réalisés par les deux institutions et contribuant à l'avancement des connaissances dans le domaine des aérosols.

2.2 Institut de l'aéronomie Spatiale de Belgique en collaboration avec l'Université du BURUNDI

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) et l'Université du Burundi ont établi un partenariat stratégique visant à renforcer la recherche sur les aérosols et la qualité de l'air dans la région des Grands Lacs. Ce partenariat s'inscrit dans le cadre de projets scientifiques internationaux qui ont pour objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes atmosphériques et d'évaluer leur impact sur l'environnement et la santé publique. En collaborant étroitement, les deux institutions espèrent développer des méthodologies avancées et partager des données précieuses, contribuant ainsi à des solutions durables pour la gestion de la qualité de l'air dans la région.

2.2.1 Acquisition des instruments et mise en oeuvre de la collaboration

En 2018, l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) a acquis des photomètres solaires CIMEL pour les installer à l'Université du Burundi. Cette acquisition a pour objectif de fournir des outils de mesure de haute précision, essentiels pour l'étude des aérosols et de leur impact sur l'environnement. Dans le cadre de cette initiative, des experts de l'IASB ont également organisé des sessions de formation pour le personnel de l'Université du Burundi, les formant à l'utilisation des instruments ainsi qu'à l'analyse des données, afin d'assurer une maîtrise adéquate des technologies mises à leur disposition. En parallèle, des projets collaboratifs ont été lancés pour étudier les niveaux d'aérosols et évaluer leur impact sur la santé publique et l'environnement. Ces projets renforcent non seulement les capacités de recherche de l'Université du Burundi, mais contribuent également à une compréhension approfondie des enjeux liés à la qualité de l'air dans la région des Grands Lacs, favorisant ainsi le développement de solutions durables pour la gestion environnementale.

2.2.2 Résultats et Impact de la Coopération entre l'Université du Burundi et l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB)

. La coopération entre l'Université du Burundi et l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) a conduit à un renforcement significatif des capacités de recherche à l'Université du Burundi. Grâce à l'acquisition des photomètres solaires CIMEL et à la formation dispensée au personnel, les chercheurs burundais ont acquis des compétences techniques essentielles pour mener des études de qualité sur les aérosols. Cette montée en

compétences a permis de créer un environnement propice à l'innovation et à la recherche scientifique.

L'installation des photomètres CIMEL a également permis la collecte de données précises sur les niveaux d'aérosols et leurs propriétés optiques, des informations cruciales pour comprendre l'impact des aérosols sur la qualité de l'air, la santé publique et le climat local. Ces données sont devenues un atout majeur pour les chercheurs, leur permettant d'analyser et de quantifier les effets des aérosols dans la région des Grands Lacs. Cette collecte de données a ainsi renforcé la base scientifique sur laquelle reposent les études environnementales.

Enfin, les projets de recherche collaboratifs ont abouti à plusieurs publications scientifiques dans des revues internationales, augmentant la visibilité des travaux réalisés par les chercheurs burundais et contribuant à la communauté scientifique mondiale. De plus, les sessions de formation et les ateliers ont sensibilisé le personnel académique et les étudiants aux enjeux environnementaux liés aux aérosols, favorisant une culture de recherche et d'innovation au sein de l'université. Ce partenariat a ouvert la voie à d'autres collaborations internationales et a le potentiel d'influencer les politiques environnementales au Burundi, en fournissant des données scientifiques essentielles pour élaborer des stratégies de gestion de la qualité de l'air.

En résumé, le photomètre solaire CIMEL se distingue par sa capacité à fournir des mesures précises et fiables des propriétés optiques des aérosols et de l'irradiance solaire. Grâce à ses caractéristiques techniques avancées et à son design robuste, cet instrument joue un rôle essentiel dans la recherche atmosphérique et environnementale. En facilitant la collecte de données de haute qualité, le CIMEL contribue non seulement à une meilleure compréhension des phénomènes atmosphériques, mais aussi à l'élaboration de politiques environnementales éclairées. Son intégration dans des réseaux de surveillance tels qu'AE-RONET souligne son importance pour la science climatique mondiale et la protection de la santé publique.

Chapitre 3

COMPREHENSION DES PARTICULES PM2.5 ET PM10

3.1 Introduction

Les particules en suspension dans l'air, en particulier les PM2.5 et PM10, constituent l'un des principaux enjeux environnementaux contemporains. Ces particules, dont les dimensions respectives sont inférieures à 2,5 micromètres et 10 micromètres, peuvent provenir de diverses sources, tant naturelles qu'anthropiques, et sont omniprésentes dans notre environnement. Leur présence dans l'atmosphère soulève des préoccupations majeures en matière de santé publique, car elles sont capables de pénétrer profondément dans le système respiratoire, entraînant des effets néfastes sur la santé des individus, en particulier des populations vulnérables.

Ce chapitre vise à offrir une compréhension approfondie des particules PM2.5 et PM10, en explorant leurs caractéristiques, leurs sources, et les méthodes de mesure utilisées pour évaluer leur concentration dans l'air. Nous examinerons également les impacts de ces particules sur la santé humaine et l'environnement, ainsi que les stratégies mises en place pour leur gestion et leur réduction. À travers des études de cas et une analyse des données, nous mettrons en lumière l'importance d'une surveillance continue de la qualité de l'air et l'urgence d'adopter des politiques efficaces pour protéger la santé publique et préserver notre environnement. Ce travail vise ainsi à sensibiliser le lecteur à la gravité de la problématique des aérosols et à la nécessité d'une action concertée pour minimiser leur impact.

3.2 Caractéristiques des particules PM2.5 et PM10

Les particules PM2.5 et PM10, en raison de leur taille et de leur origine variée, présentent des éléments essentiels à étudier pour comprendre leur impact sur la santé humaine et l'environnement, ainsi que les défis qu'elles posent en matière de qualité de l'air.

3.2.1 Définition et Classification

Les particules PM2.5 et PM10 désignent des particules en suspension dans l'air, classées selon leur diamètre. Les PM2.5 sont des particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres, tandis que les PM10 incluent des particules de diamètre inférieur à 10 micromètres. Cette classification est essentielle, car la taille des particules influence leur

comportement atmosphérique, leur capacité à pénétrer dans le système respiratoire et leurs effets sur la santé humaine et l'environnement.

3.2.2 Sources d'Émission

Les particules PM2.5 et PM10 proviennent de diverses sources d'émission, tant naturelles qu'anthropiques, chacune contribuant de manière significative à la pollution atmosphérique et, par conséquent, à des enjeux de santé publique et environnementaux.

Elles peuvent être divisées en deux catégories :

Les particules PM2.5 et PM10 proviennent de plusieurs **sources naturelles** qui contribuent à leur présence dans l'atmosphère. Parmi celles-ci, **les éruptions volcaniques** jouent un rôle significatif en libérant des cendres et des gaz qui se transforment en particules. De plus, **les tempêtes de poussière**, soulevées par le vent, entraînent des particules provenant de sols arides ou dénudés, contribuant ainsi à la pollution de l'air. **Les pollens et spores**, résultant des processus naturels des plantes, représentent également une source de particules biologiques qui peuvent affecter la qualité de l'air.

En parallèle, **les sources anthropiques** constituent une part importante des émissions de PM2.5 et PM10. **La combustion de combustibles fossiles**, que ce soit à travers les véhicules, les centrales électriques ou les processus industriels, génère des émissions considérables de particules. **Les activités agricoles**, telles que l'utilisation de pesticides, le labourage et le brûlage des résidus de culture, contribuent également à l'émission de particules. Par ailleurs, les activités industrielles engendrent des poussières et des émissions lors de la production manufacturière, tandis que la construction et la démolition génèrent une quantité significative de poussières, exacerbant ainsi la pollution atmosphérique. Ensemble, ces sources naturelles et anthropiques jouent un rôle crucial dans la dynamique des particules PM2.5 et PM10 dans l'environnement.

3.2.3 Composition Chimique et Physique des Particules PM2.5 et PM10

La composition chimique et physique des particules PM2.5 et PM10 joue un rôle essentiel dans leur comportement atmosphérique, leur capacité à affecter la santé humaine et leur impact environnemental, rendant leur étude indispensable pour comprendre les enjeux liés à la pollution de l'air. Elle varie selon leur source et les conditions environnementales. Les particules PM2.5 et PM10 se composent de plusieurs éléments clés, notamment les sulfates et les nitrates, qui proviennent souvent de réactions chimiques dans l'atmosphère, ainsi que le carbone noir, un produit de la combustion incomplète de divers combustibles. De plus, ces particules peuvent contenir des métaux lourds tels que le plomb, le cadmium et le mercure, souvent d'origine industrielle, ce qui accentue leur potentiel nocif pour la santé humaine et l'environnement.

Sur le plan physique, les particules PM2.5 et PM10 présentent plusieurs propriétés importantes, notamment la taille et la forme, qui influencent leur comportement dans l'air ainsi que leur capacité à pénétrer dans les voies respiratoires. Leur densité et leur solubilité ont également un impact significatif sur le transport atmosphérique et le dépôt des particules. De plus, le comportement optique de ces particules leur permet d'interagir avec la lumière, ce qui affecte la qualité de l'air et contribue à des phénomènes tels que le brouillard et la pollution visuelle.

3.3 Méthode de Mesure et de Surveillance des Particules PM2.5 et PM10

La méthode de mesure et de surveillance des particules PM2.5 et PM10 est essentielle pour évaluer leur impact sur la santé publique et l'environnement, en utilisant des instruments sophistiqués et des protocoles rigoureux pour garantir la précision et la fiabilité des données recueillies.

3.3.1 Instruments et Techniques de Mesure des Particules PM2.5 et PM10

Les instruments et techniques de mesure des particules PM2.5 et PM10 jouent un rôle crucial dans l'évaluation de la qualité de l'air, permettant de quantifier ces particules nocives avec précision et d'analyser leur impact sur la santé humaine et l'environnement.

Types d'Instruments

Les instruments utilisés pour mesurer les particules PM2.5 et PM10 jouent un rôle crucial dans l'évaluation de la qualité de l'air. Parmi les dispositifs les plus courants, les photomètres se distinguent par leur capacité à mesurer la concentration de particules en utilisant la lumière diffusée par celles-ci. Ces appareils fournissent des données en temps réel, ce qui les rend particulièrement utiles pour des études de qualité de l'air. En complément, les analyseurs de particules offrent des analyses détaillées en mesurant la taille et la concentration des particules grâce à des méthodes optiques ou acoustiques. Les compteurs de particules, quant à eux, permettent de classer les particules selon leur taille, ce qui est essentiel pour surveiller la pollution de l'air. Enfin, les appareils de filtration capturent les particules sur un filtre, facilitant une analyse gravimétrique ultérieure pour déterminer la concentration.

Technique de mesure

Les techniques de mesure des particules sont variées et adaptées à différents objectifs de recherche. Les méthodes gravimétriques consistent à collecter l'air à travers un filtre qui retient les particules, permettant ainsi de peser le filtre avant et après la collecte pour quantifier la masse des particules. En parallèle, les méthodes optiques mesurent la diffusion de la lumière par les particules, fournissant des données sur leur concentration et leur taille. De plus, les techniques de filtration et d'analyse chimique permettent de capturer les particules afin de déterminer leur composition, évaluant ainsi leur impact potentiel sur la santé et l'environnement.

Calibration et validation

Pour garantir la fiabilité des mesures, la calibration et la validation des instruments sont des étapes essentielles. Les instruments de mesure doivent être calibrés régulièrement à l'aide d'étalons de référence, ce qui implique des procédures standardisées pour ajuster les appareils en fonction des conditions de fonctionnement. En outre, la validation des méthodes de mesure est nécessaire pour s'assurer de la précision et de la reproductibilité des résultats, ce qui inclut des comparaisons avec d'autres méthodes ainsi que des tests en milieu contrôlé. Ces pratiques garantissent que les données recueillies sont fiables et utiles pour la recherche sur les particules PM2.5 et PM10.

3.4 Réseaux de Surveillance de la Qualité de l’Air

Les réseaux de surveillance de la qualité de l’air sont des infrastructures essentielles qui permettent de collecter, analyser et diffuser des données sur la pollution atmosphérique, contribuant ainsi à la protection de la santé publique et à la gestion environnementale.

3.4.1 Réseaux nationaux et internationaux

Les réseaux de surveillance de la qualité de l’air jouent un rôle essentiel dans la collecte de données sur les particules PM_{2.5} et PM₁₀, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la pollution atmosphérique. Parmi les réseaux les plus connus, on trouve l’AERONET (Aerosol Robotic Network), qui est un réseau mondial fournissant des données sur les aérosols et leur impact sur le climat. Ce réseau permet aux chercheurs d’accéder à des données précieuses pour étudier les effets des aérosols sur le changement climatique. Un autre exemple est AIRNOW, un réseau basé aux États-Unis qui surveille la qualité de l’air et fournit des informations en temps réel au public, permettant ainsi aux citoyens de prendre des décisions éclairées concernant leur santé.

3.4.2 Stations de surveillance

Les stations de surveillance sont des éléments clés de ces réseaux, étant stratégiquement situées pour mesurer la qualité de l’air dans différentes régions. Leur localisation est cruciale, car elles doivent être placées dans des zones représentatives afin de capter les variations de pollution de l’air. Chaque station est équipée d’une combinaison d’instruments de mesure, adaptés aux conditions locales et aux besoins spécifiques des études. Ces stations suivent des protocoles rigoureux pour la collecte de données, garantissant ainsi la fiabilité des informations recueillies.

3.4.3 Données collectées

Les données collectées par ces réseaux comprennent diverses informations, notamment les concentrations de PM_{2.5} et PM₁₀, ainsi que d’autres paramètres environnementaux tels que la température, l’humidité et la vitesse du vent. L’accès à ces données est essentiel, car elles sont souvent mises à disposition du public, des chercheurs et des décideurs. Cela facilite une meilleure compréhension des problèmes de qualité de l’air et permet de mettre en place des réponses appropriées pour atténuer les effets de la pollution sur la santé et l’environnement.

3.5 Impact sur la Santé Publique

Les particules PM_{2.5} et PM₁₀ sont étroitement associées à divers problèmes de santé respiratoire. Leur inhalation peut provoquer des maladies telles que l’asthme, la bronchite chronique et d’autres affections pulmonaires. Ces particules fines entraînent une inflammation des voies respiratoires, ce qui peut réduire la fonction pulmonaire et exacerber les symptômes chez les personnes déjà atteintes de maladies respiratoires. Cette interaction souligne la nécessité de surveiller et de limiter l’exposition à ces polluants pour protéger la santé des individus concernés.

En outre, plusieurs études ont établi un lien entre l’exposition aux PM_{2.5} et PM₁₀ et le développement de maladies cardiovasculaires, comme les crises cardiaques et les accidents vasculaires cérébraux. Ces particules peuvent provoquer des inflammations systémiques

qui affectent le système circulatoire, augmentant ainsi le risque de complications cardiaques. Les effets délétères sur le système cardiovasculaire soulignent l'importance d'une intervention proactive pour réduire les niveaux de pollution de l'air.

Les groupes vulnérables, notamment les enfants, les personnes âgées et ceux souffrant de maladies chroniques, sont particulièrement exposés aux effets néfastes des PM_{2.5} et PM₁₀. Les enfants, en raison de leur développement pulmonaire, peuvent subir des effets à long terme sur leur santé respiratoire et cognitive. De plus, des recherches émergentes suggèrent que l'exposition aux PM_{2.5} peut nuire au développement neurologique chez les enfants, contribuant à des problèmes cognitifs et comportementaux. Par ailleurs, l'exposition à la pollution de l'air a également été liée à des troubles de santé mentale, tels que l'anxiété et la dépression, en raison des effets du stress oxydatif et de l'inflammation sur le système nerveux central.

Enfin, les conséquences sur la santé publique engendrent des coûts sociaux et économiques considérables. Ces coûts incluent les dépenses liées aux soins de santé, l'absentéisme au travail et la perte de productivité, mettant en évidence l'importance de mettre en œuvre des politiques visant à réduire les émissions de particules fines. En somme, la compréhension des impacts des PM_{2.5} et PM₁₀ sur la santé est cruciale pour élaborer des stratégies efficaces de gestion de la qualité de l'air et protéger la santé des populations.

3.6 Impact Environnemental des Particules PM_{2.5} et PM₁₀

Les particules PM_{2.5} et PM₁₀ ont des effets environnementaux significatifs qui méritent d'être examinés de près. Leur présence dans l'air contribue à la dégradation de la qualité de l'air, exacerbant les problèmes de pollution atmosphérique. Cela peut entraîner des violations des normes de qualité de l'air, avec des conséquences néfastes pour la santé des écosystèmes. De plus, ces particules peuvent se déposer sur le sol et les surfaces aquatiques, affectant les plantes et la faune. Elles modifient les propriétés du sol, nuisent à la photosynthèse des plantes et contaminent les sources d'eau, ce qui peut entraîner des perturbations dans les chaînes alimentaires et menacer la biodiversité.

Les particules, en particulier les PM_{2.5}, influencent également le climat en affectant l'albédo de la Terre et en modifiant le cycle de l'eau. Elles agissent comme noyaux de condensation pour la formation de nuages, impactant ainsi les régimes de précipitations et le climat régional. En outre, ces particules peuvent contenir des métaux lourds et d'autres polluants chimiques, contribuant à l'acidification des sols et des eaux, ce qui nuit aux organismes aquatiques et dégrade les habitats naturels.

Les particules qui se déposent dans les systèmes aquatiques peuvent affecter la qualité de l'eau et perturber les habitats aquatiques. Elles peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire, menaçant la santé des espèces aquatiques et des consommateurs humains. En somme, les impacts environnementaux des particules PM_{2.5} et PM₁₀ sont variés et profonds, soulignant la nécessité d'une gestion efficace de ces polluants pour préserver la santé de notre environnement.

Enfi, les particules PM_{2.5} et PM₁₀ représentent des enjeux majeurs pour la santé publique et l'environnement. Leur capacité à pénétrer profondément dans le système respiratoire constitue un risque significatif, entraînant des problèmes de santé variés, allant des affections respiratoires aiguës aux maladies chroniques, telles que l'asthme et les maladies

cardiovasculaires. De plus, ces particules ont des impacts environnementaux notables, affectant la qualité de l'air, contribuant à la dégradation des écosystèmes et influençant le climat global.

Chapitre 4

ETUDES DE CAS ET APPLICATIONS PRATIQUES DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS(AOD)

L'Aerosol Optical Depth en anglais (AOD) ou Épaisseur Optique des Aérosols en français est un paramètre essentiel dans la compréhension de la dynamique atmosphérique et de la qualité de l'air. Mesurant l'atténuation de la lumière due aux particules en suspension dans l'atmosphère, l'AOD offre des insights précieux sur la concentration et la nature des aérosols. Ce chapitre se propose d'explorer les études de cas et les applications pratiques de l'AOD, en mettant en lumière son rôle crucial dans divers contextes environnementaux et sanitaires. A travers une série d'études de cas, nous examinerons comment l'AOD peut être utilisé pour évaluer les impacts des aérosols sur la santé publique, la qualité de l'air, et le climat. Des exemples concrets illustreront l'application des mesures d'AOD dans des situations réelles, allant de la pollution urbaine aux effets des incendies de forêt et des éruptions volcaniques. En outre, nous analyserons les données d'AOD recueillies à différentes longueurs d'onde — 675 nm, 870 nm, 1020 nm et 1640 nm — pour comprendre comment ces variations influencent les résultats et les interprétations.

L'objectif de ce chapitre est de démontrer non seulement l'importance scientifique de l'AOD, mais aussi son utilité pratique dans la formulation de politiques environnementales et de stratégies de gestion de la qualité de l'air. En intégrant théorie et pratique, nous espérons fournir une vision complète des enjeux liés aux aérosols et à leur mesure, ainsi que des perspectives pour des recherches futures.

4.1 Méthodologie de mesure de l'AOD

La mesure de l'Épaisseur Optique des Aérosols ou Aerosol Optical Depth (AOD) en anglais constitue une étape essentielle pour évaluer la présence et l'impact des aérosols dans l'atmosphère, en s'appuyant sur des techniques et des instruments précis pour fournir des données fiables et pertinentes.

4.1.1 Longueurs d'Onde dans les mesures d'AOD

Les mesures de l'Épaisseur Optique des Aérosols ou Aerosols Optical Depth en anglais (AOD) en anglais sont réalisées à différentes longueurs d'onde, ce qui est crucial pour comprendre les propriétés optiques des aérosols et leur interaction avec la lumière. Chaque

longueur d'onde offre des informations distinctes sur la composition et le comportement des particules en suspension dans l'atmosphère.

4.1.2 Importance des longueurs d'Onde

Les aérosols absorbent et diffusent la lumière de manière variable en fonction de leur taille, de leur forme et de leur composition chimique. Par conséquent, mesurer l'AOD à différentes longueurs d'onde permet de caractériser ces interactions.

Longueurs d'onde spécifiques

Les mesures d'Épaisseur Optiques des aérosols ou Aerosol Optical Depth en anglais (AOD) à différentes longueurs d'onde fournissent des informations cruciales sur les aérosols dans l'atmosphère : à 675 nm, qui se situe dans le spectre visible, on étudie principalement les particules fines sensibles aux aérosols de petite taille ; à 870 nm, cette longueur d'onde permet une meilleure compréhension des aérosols organiques et des particules issues de la biomasse, souvent liées à des processus naturels ; à 1020 nm, l'analyse se concentre sur les aérosols dans des conditions de faible visibilité et sur les particules d'origine anthropique ; enfin, à 1640 nm, qui se situe dans l'infrarouge proche, on détecte efficacement les aérosols d'eau et les particules plus lourdes, ce qui fournit des informations pertinentes sur l'humidité atmosphérique.

Applications pratiques des mesures à différentes longueurs d'onde

Les données d'AOD à ces longueurs d'onde permettent de modéliser le forçage radiatif, d'évaluer la qualité de l'air et de surveiller les impacts environnementaux des aérosols. En combinant les mesures à plusieurs longueurs d'onde, les chercheurs peuvent également mieux caractériser la taille et la composition des particules, facilitant ainsi une compréhension plus approfondie de leur comportement atmosphérique.

4.1.3 Protocoles de collecte des données

Les protocoles de collecte de données pour l'Aerosol Optical Depth (AOD) sont essentiels pour garantir la précision et la fiabilité des mesures. Ils commencent par la calibration rigoureuse des instruments, tels que les photomètres CIMEL, afin d'assurer que les mesures soient comparables à des standards de référence. Les données doivent être recueillies dans des conditions atmosphériques optimales, idéalement lors de journées dégagées, pour minimiser les interférences dues à la pollution ou aux précipitations. Les protocoles incluent également des instructions spécifiques sur le positionnement des instruments, la fréquence des mesures et la documentation des conditions environnementales au moment de la collecte. Cette approche systématique permet d'obtenir des données d'AOD robustes et reproductibles, essentielles pour les analyses environnementales et climatiques ultérieures.

4.2 Relation entre l'AOD et les longueurs d'onde

La relation entre l'Aerosol Optical Depth (AOD) et les longueurs d'onde est essentielle pour comprendre les propriétés optiques des aérosols dans l'atmosphère. L'AOD mesure la quantité de lumière solaire atténuée par les particules en suspension, et cette atténuation varie en fonction de la longueur d'onde. En général, l'AOD tend à être plus élevé aux longueurs d'onde courtes, comme 675 nm, en raison de la plus grande sensibilité des petites particules aux variations de lumière dans ce spectre. À mesure que l'on s'éloigne

vers des longueurs d'onde plus longues, comme 870 nm, 1020 nm et 1640 nm, l'AOD peut diminuer, car les particules deviennent moins efficaces pour disperser la lumière à ces longueurs d'onde.

Cette variation est influencée par plusieurs facteurs, notamment la taille, la composition et la concentration des aérosols. Par exemple, les aérosols organiques et les particules de carbone peuvent avoir des effets différents sur l'AOD selon la longueur d'onde mesurée. De plus, les mesures à différentes longueurs d'onde permettent de distinguer les types d'aérosols présents dans l'atmosphère, offrant ainsi des informations cruciales pour les études de pollution de l'air et de climat. En intégrant ces données dans des modèles atmosphériques, les chercheurs peuvent mieux prédire l'impact des aérosols sur la qualité de l'air, la santé publique et les changements climatiques. Ainsi, la compréhension de la relation entre l'AOD et les longueurs d'onde est fondamentale pour évaluer les effets des aérosols sur l'environnement.

4.3 Applications Pratiques de l'AOD pour longueurs d'onde

L'application pratique de l'Aerosol Optical Depth (AOD) à différentes longueurs d'onde est essentielle pour mieux comprendre le rôle des aérosols dans l'atmosphère et leur impact sur la santé et l'environnement. En mesurant l'AOD à des longueurs d'onde spécifiques telles que 675 nm, 870 nm, 1020 nm et 1640 nm, les chercheurs peuvent obtenir des informations détaillées sur les propriétés optiques des aérosols. Chaque longueur d'onde fournit des perspectives uniques sur la composition et la taille des particules, permettant une analyse plus approfondie des sources de pollution et de leurs effets.

Les mesures d'AOD à 675 nm, par exemple, sont particulièrement utiles pour évaluer la pollution urbaine, car cette longueur d'onde est sensible aux particules fines émises par les véhicules et les activités industrielles. De même, les données à 870 nm sont souvent utilisées pour examiner les effets des aérosols dans les zones rurales, où l'agriculture et les feux de biomasse peuvent influencer la qualité de l'air. L'AOD mesuré à 1020 nm est crucial pour les études sur les aérosols d'origine naturelle, tels que ceux provenant des éruptions volcaniques ou des tempêtes de poussière, tandis que les données à 1640 nm peuvent fournir des informations sur les aérosols organiques et l'humidité atmosphérique.

Ces mesures d'AOD sont intégrées dans des modèles climatiques pour prédire les impacts des aérosols sur le forçage radiatif et les changements climatiques. En utilisant des données d'AOD, les scientifiques peuvent évaluer comment les aérosols influencent la température de la surface terrestre et les schémas météorologiques. De plus, les informations sur l'AOD sont essentielles pour développer des stratégies de gestion de la qualité de l'air, en permettant aux décideurs de suivre les niveaux de pollution et de prendre des mesures appropriées pour protéger la santé publique.

4.4 Effets des aérosols sur le climat

Les aérosols jouent un rôle complexe dans le système climatique en influençant la quantité de lumière solaire qui atteint la surface de la Terre et en modifiant les propriétés des nuages. À différentes longueurs d'onde, les effets des aérosols varient considérablement, ce qui a des implications importantes pour notre compréhension du climat.

À une longueur d'onde de 675 nm, les aérosols absorbent et diffusent la lumière solaire, affectant ainsi la température de l'atmosphère. Les particules plus sombres, comme le carbone suie, peuvent absorber la lumière, contribuant à un réchauffement localisé. En revanche, les aérosols de sulfates, qui sont plus réfléchissants, tendent à refroidir l'atmosphère en renvoyant la lumière solaire dans l'espace. Cette interaction entre absorption et réflexion est essentielle pour modéliser la réponse climatique aux variations de concentration d'aérosols. À 870 nm, les aérosols ont une influence significative sur la formation et les propriétés des nuages. Les aérosols agissent comme des noyaux de condensation, favorisant la formation de gouttelettes d'eau. Cela peut mener à des nuages plus réfléchissants, augmentant le forçage radiatif négatif. Cependant, les aérosols peuvent également réduire la taille des gouttelettes, ce qui diminue l'efficacité de la pluie, affectant ainsi le cycle hydrologique.

Les longueurs d'onde de 1020 nm et 1640 nm, qui se situent dans l'infrarouge, sont également importantes. À ces longueurs d'onde, les aérosols peuvent influencer la quantité de chaleur émise par la surface de la Terre. Les aérosols absorbants, tels que les particules de carbone, peuvent piéger la chaleur dans l'atmosphère, contribuant ainsi à un réchauffement. En revanche, les aérosols réfléchissants continuent à jouer un rôle dans le refroidissement, créant un équilibre délicat qui peut varier selon les régions et les saisons.

4.5 Comparaison des données AOD par longueur d'onde

La comparaison des données d'Aerosol Optical Depth (AOD) à différentes longueurs d'onde est essentielle pour comprendre les propriétés optiques des aérosols et leur impact sur l'environnement. Pour mener à bien cette comparaison, il est important de suivre une méthodologie rigoureuse.

Tout d'abord, assurez-vous de collecter des données d'AOD à plusieurs longueurs d'onde, notamment 675 nm, 870 nm, 1020 nm et 1640 nm. Utilisez des instruments de mesure tels que des photomètres CIMEL ou des satellites, qui fournissent des données fiables et précises. Vérifiez que les conditions de mesure sont similaires pour chaque longueur d'onde afin de minimiser les biais. Cela inclut des périodes de collecte de données avec une atmosphère stable et des niveaux de pollution similaires.

Ensuite, effectuez une calibration appropriée des instruments avant la collecte de données. Cela garantit que les mesures sont comparables entre les différentes longueurs d'onde. Une fois les données collectées, il est crucial de procéder à une validation en les croisant avec d'autres sources de données, comme les mesures in situ ou les données satellitaires, afin de confirmer leur précision.

Lors de l'analyse des données, utilisez des graphiques et des statistiques descriptives pour visualiser les variations de l'AOD en fonction de la longueur d'onde. Cela permettra d'identifier des tendances et des anomalies. Par exemple, examinez comment l'AOD varie en fonction des conditions atmosphériques ou des événements spécifiques, tels que des incendies de forêt ou des éruptions volcaniques.

Enfin, interprétez les résultats en tenant compte des propriétés des aérosols. Les variations de l'AOD à différentes longueurs d'onde peuvent refléter des différences dans la taille, la composition et la concentration des particules en suspension. Cette analyse approfondie contribuera à une meilleure compréhension des effets des aérosols sur la qualité

de l'air et le climat.

Conclusion Générale

Au terme de mon stage au sein du **Groupe de Recherche sur l'Air Propre au Burundi**, j'ai eu l'opportunité d'explorer le thème **Mesure et analyse des propriétés physiques des aérosols : Outils et applications**. Cette expérience m'a permis d'approfondir mes connaissances sur le photomètre solaire CIMEL, en étudiant son historique, son origine, et le cadre de coopération entre l'Université du Burundi et l'Université de Lille, ainsi que l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique. J'ai également pu comprendre en détail les particules PM_{2.5} et PM₁₀, ainsi que l'importance de leur mesure pour évaluer la qualité de l'air. Les études de cas sur l'épaisseur optique des aérosols ont enrichi mes connaissances pratiques, en mettant en lumière la méthodologie de mesure de l'AOD, la relation entre l'AOD et la longueur d'onde, ainsi que les applications pratiques de l'AOD dans le contexte climatique.

Cette immersion dans la recherche m'a permis d'acquérir une expérience approfondie d'un secteur d'activité dynamique, tout en me donnant une vision globale de l'institution, de sa structure et de ses activités. J'ai pu assimiler des connaissances pratiques sur la méthodologie de mesure et développer des compétences analytiques. Cependant, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. Il serait bénéfique de renforcer la formation continue et d'encourager des collaborations plus étroites avec d'autres institutions de recherche pour enrichir les compétences des chercheurs. De plus, des initiatives de sensibilisation sur les impacts des aérosols devraient être intégrées dans les programmes éducatifs pour promouvoir une meilleure compréhension des enjeux environnementaux.

En considérant l'avenir de l'institution, il est évident que la recherche sur les aérosols et la qualité de l'air est d'une importance vitale, surtout face aux défis posés par les changements climatiques. Je suis persuadé que le groupe continuera à jouer un rôle fondamental dans cette recherche et dans la sensibilisation des communautés. Ce stage s'intègre harmonieusement dans mon parcours académique et mes aspirations professionnelles, consolidant ainsi mon engagement à œuvrer dans le secteur de l'environnement et de la santé publique. Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à mes encadreurs et à l'ensemble de l'équipe du centre pour leur soutien inestimable et leur accompagnement durant cette expérience enrichissante.

Références

- Holben, B. N., et al. (1998). AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. Remote Sensing of Environment,
- Smirnov, A., et al. (2000). Global Aerosol Optical Depth Database from AERONET. Remote Sensing of Environment,
- Dubovik, O., et al. (2000). Accuracy of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky radiance measurements. Journal of Geophysical Research,
- [AERONET - Aerosol Robotic Network](<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)
- <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547614>)
- [EPA - Particulate Matter (PM) Basics](<https://www.epa.gov/pm>)
- [NASA - Aerosols and Climate](<https://climate.nasa.gov/solutions/adaptation-mitigation/aerosols/>)