



Research Article

Universal Journal of Life and Environmental Sciences

2024, Vol 6, Pages 99-109 Serie 1

Submission (02 September 2024) Accepted and Published (10 December 2024)

Pollution Atmosphérique en Zone Tropicale : Source d'Emission, Impact Sanitaire et Stratégies d'Atténuation des Effets Nocifs pour l'Homme et l'Environnement

Claudin Wamba Tchinda

E-mail: wambatchindaclaudin@yahoo.fr , Telephone: +237 672 427 146

Résumé

La pollution atmosphérique représente un défi environnemental et sanitaire majeur à l'échelle mondiale, avec des spécificités prononcées dans les régions tropicales. Cet article synthétise les connaissances actuelles sur les sources d'émissions prédominantes, l'influence des conditions météorologiques et climatiques tropicales, les impacts sanitaires, environnementaux et socio-économiques, ainsi que les stratégies d'atténuation et d'adaptation. Les feux de biomasse, l'industrialisation, l'urbanisation rapide et l'utilisation de combustibles solides pour la cuisson sont identifiés comme des contributeurs majeurs. Le fort ensoleillement, les températures élevées et les régimes de précipitations variables modifient la dispersion et la transformation des polluants. Les conséquences sur la santé humaine (maladies respiratoires, cardiovasculaires), les écosystèmes (dommages à la végétation, acidification) et l'économie sont significatives. L'article examine les politiques, technologies, solutions basées sur la nature et la sensibilisation publique comme leviers d'action, tout en soulignant les défis persistants et les perspectives de recherche future pour une gestion plus efficace de la qualité de l'air dans ces régions vulnérables.

Mots-clés : Pollution atmosphérique, Zone tropicale, Sources d'émissions, Impacts sanitaires, Écosystèmes, Stratégies d'atténuation, Adaptation, Changement climatique.

I. Introduction

L'air pur est un bien essentiel à la vie, et la qualité de l'atmosphère est un déterminant majeur de la santé humaine et de la pérennité des écosystèmes à travers le globe. Cependant, la pollution atmosphérique, résultant d'une complexité d'activités anthropiques et de processus naturels, constitue un défi environnemental croissant aux conséquences sanitaires, économiques et écologiques considérables (Cohen et al., 2017; Organisation Mondiale de la Santé, 2021; Landrigan et al., 2018). Cette problématique revêt une importance particulière dans les régions tropicales, caractérisées par une dynamique socio-économique et des conditions environnementales uniques qui exacerbent la vulnérabilité des populations et des écosystèmes locaux face à la dégradation de la qualité de l'air.

La pollution atmosphérique en zone tropicale présente des spécificités notables qui la distinguent des régions tempérées ou polaires. Les sources d'émissions y sont souvent dominées par la combustion de la biomasse, qu'il s'agisse de feux de forêt naturels ou anthropiques, des pratiques agricoles extensives basées sur le brûlis, ou de l'utilisation de combustibles solides pour la cuisson domestique. L'essor rapide de l'urbanisation et de l'industrialisation, souvent accompagné d'un parc automobile vieillissant et de normes environnementales moins strictes, contribue également significativement à la charge polluante.

Sur le plan environnemental, le fort ensoleillement caractéristique des tropiques favorise des réactions photochimiques intenses, menant à la formation d'ozone troposphérique et d'autres polluants secondaires. Les régimes de précipitations, souvent intenses et saisonniers, influencent la dispersion et le dépôt des particules et des gaz, tandis que les températures élevées peuvent accroître la volatilité de certains composés organiques. Ces conditions spécifiques peuvent amplifier les impacts de la pollution atmosphérique, potentiellement en synergie avec la prévalence de certaines maladies tropicales et en exerçant une pression accrue sur la biodiversité unique de ces régions, ainsi que sur les secteurs clés tels que l'agriculture et la sécurité alimentaire. Face à ces particularités, la question centrale qui guide cette analyse est la suivante : Comment les spécificités des sources d'émissions et des conditions environnementales en zone tropicale influencent-elles la nature, l'étendue et les impacts de la pollution atmosphérique, et quelles sont les stratégies d'atténuation et d'adaptation les plus efficaces dans ce contexte unique ?

Bien que la recherche sur la pollution atmosphérique soit un domaine en expansion, l'attention portée spécifiquement aux dynamiques et aux impacts en zone tropicale demeure relativement moins développée que dans les régions industrialisées. Les études existantes ont certes permis d'identifier des sources d'émissions clés et de caractériser

certaines polluants prédominants, mais des lacunes subsistent quant à la compréhension fine des processus physico-chimiques atmosphériques spécifiques aux tropiques, à l'évaluation précise des impacts sanitaires et environnementaux à long terme, et à l'efficacité des politiques et des interventions mises en œuvre. Des régions entières au sein de la zone tropicale restent sous-étudiées, et la complexité des interactions entre les différents types de polluants et les facteurs environnementaux locaux nécessite une investigation plus approfondie. C'est dans ce contexte que cette étude se justifie pleinement. Elle vise à synthétiser les connaissances actuelles sur la qualité de pollution de l'air atmosphérique en zone tropicale, à identifier les principales lacunes dans la recherche, et à mettre en lumière les défis et les opportunités pour de futures investigations.

Les objectifs spécifiques de cette revue sont multiples. Premièrement, nous nous attacherons à identifier et à caractériser les principales sources d'émissions de polluants atmosphériques spécifiques aux régions tropicales. Deuxièmement, nous analyserons en détail l'influence des conditions météorologiques et climatiques tropicales sur la dispersion, la transformation et le dépôt de ces polluants. Troisièmement, nous évaluerons les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé humaine, la biodiversité et les systèmes socio-économiques dans ces régions. Quatrièmement, nous examinerons les stratégies d'atténuation et d'adaptation qui ont été mises en œuvre ou proposées pour réduire la pollution atmosphérique en zone tropicale. Enfin, nous identifierons les défis persistants et les perspectives de recherche future qui nécessitent une attention particulière. La portée de cette étude englobera une analyse des différentes régions tropicales à travers l'Afrique, l'Asie et l'Amérique Latine, en mettant l'accent sur les polluants les plus préoccupants et les secteurs d'activité ayant un impact significatif sur la qualité de l'air.

Afin d'atteindre ces objectifs, cet article se déroulera en plusieurs sections. La section suivante présentera les Matériels et Méthodes. Ensuite, nous analyserons les Résultats et la Discussion. Enfin, nous conclurons en soulignant les principaux défis et en proposant des pistes pour de futures recherches dans ce domaine crucial.

II. Matériels et Méthodes

La méthodologie généralement employée pour l'étude des défis posés par la pollution atmosphérique en régions tropicales repose sur une approche systématique et intégrée. Elle englobe l'identification des sources, la modélisation de la dispersion, l'évaluation des impacts et l'analyse des stratégies d'atténuation, avec un accent particulier sur les techniques de collecte de données et les méthodes de modélisation.

a. Identification et Caractérisation des Sources d'Émissions

La collecte des données pour cette première étape implique l'extraction et l'analyse critique de base de données d'inventaires d'émissions globales et régionales (par exemple, EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) pour les émissions anthropiques mondiales ou MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China) pour l'Asie), complétées par des rapports nationaux et locaux. Des campagnes de mesure sur le terrain peuvent également être menées, utilisant des équipements de mesure directs (par

exemple, spectromètres à infra-rouge, systèmes d'échantillonnage d'air pour les COV, CH₄, CO, NO_x, particules) pour quantifier les émissions de sources clés comme la combustion de biomasse ou les émissions industrielles et des transports. Les données socio-économiques (par exemple, production agricole, consommation d'énergie) sont également collectées pour affiner les estimations d'émissions basées sur la formule :

$E = A \times EF$, où E est la quantité de polluant émise, A est le niveau d'activité, et EF est le facteur d'émission (Barn et al., 2011).

b. Analyse de l'Influence des Conditions Météorologiques et Climatiques avec les Méthodes de Modélisation de la Dispersion

La deuxième phase vise à analyser en détail l'influence des conditions météorologiques et climatiques tropicales sur la dispersion, la transformation et le dépôt de ces polluants. La collecte de données comprend les concentrations de polluants atmosphériques issues de réseaux de surveillance de la qualité de l'air (PM_{2.5}, O₃, NO₂, SO₂, CO), les données satellitaires (par exemple, colonnes de NO₂ et de SO₂ de Sentinel-5P, aérosols de MODIS et CALIPSO), et les données météorologiques (température, humidité, vent, précipitations) provenant de réanalyses atmosphériques globales (par exemple, ERA5 de l'ECMWF) ou de stations météorologiques locales. Ces données sont généralement des mesures horaires ou journalières.

Les méthodes de modélisation de la dispersion sont cruciales pour cette analyse. Elles se déclinent en plusieurs catégories :

Modèles Lagrangiens de Particules (LPMs) : Ces modèles simulent le mouvement de "particules" (représentant des polluants) dans l'atmosphère en suivant des trajectoires individuelles influencées par le champ de vent et la turbulence. Ils sont particulièrement utiles pour la rétro-trajectoire (déterminer l'origine d'une masse d'air polluée) ou pour des sources ponctuelles. Un exemple est le modèle HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) développé par la NOAA (Stein et al., 2015).

Modèles Eulériens de Grille (EGM) / Modèles de Transport Chimique Atmosphérique (CTMs) : Ces modèles divisent l'atmosphère en une grille tridimensionnelle et résolvent numériquement les équations de conservation de masse pour les polluants dans chaque cellule de la grille. Ils intègrent l'advection, la diffusion turbulente, les émissions, les réactions chimiques et le dépôt. Ils sont adaptés pour simuler la qualité de l'air à des échelles régionales et continentales. Des exemples largement utilisés incluent WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry), un modèle en ligne qui couple directement la météorologie et la chimie atmosphérique, permettant une rétroaction entre les processus. Il est très performant pour la simulation des épisodes de pollution et l'étude des interactions complexes (Grell et al., 2005).

GEOS-Chem, Un modèle hors ligne (offline) piloté par des champs météorologiques précalculés. Il est souvent utilisé pour des études à l'échelle global et continentale en raison de sa flexibilité et de sa représentation détaillée de la

chimie troposphérique (Bey et al., 2001).

CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions) ou CMAQ (Community Multiscale Air Quality), qui sont des modèles eulériens robustes, souvent utilisés pour des applications réglementaires et des études de scénarios à l'échelle régionale, intégrant des processus chimiques et physiques détaillés. La forme générique de l'équation de conservation de masse résolue par ces modèles est :

$$\partial t/\partial C = -\nabla \cdot (uC) + \nabla \cdot (K\nabla C) + E - D + R,$$

Où C, est la concentration du polluant, u le champ de vitesse du vent, K le coefficient de diffusion turbulente, E le terme d'émission, D le terme de dépôt et R le terme de réaction chimique.

Modèles Récepteurs (Receptor Models) : Bien qu'ils ne soient pas des modèles de dispersion au sens strict, les modèles récepteurs (comme la Positive Matrix Factorization - PMF) sont des outils d'analyse statistique utilisés pour déconvoluer les concentrations mesurées à un site récepteur en contributions de différentes sources d'émission. Ils sont complémentaires aux modèles de dispersion en aidant à valider les inventaires d'émissions et à identifier les sources majeures contribuant à la pollution observée (Paatero and Tapper, 1994). Des analyses de corrélation et de régression multivariée (par exemple, séries temporelles, analyse spectrale) sont ensuite effectuées pour quantifier l'impact des variables météorologiques (vents, précipitations, température, humidité relative, stabilité atmosphérique) sur les concentrations de polluants et pour identifier les conditions favorisant les épisodes de forte pollution.

c. Évaluation des Impacts

L'évaluation des impacts sur la santé humaine, la biodiversité et les systèmes socio-économiques est réalisée par la synthèse de revues épidémiologiques, d'études écologiques et d'analyses économiques. La collecte de données inclut les statistiques de santé publique (taux de morbidité et de mortalité liés aux maladies respiratoires et cardiovasculaires) auprès des ministères de la santé et des bases de données épidémiologiques. Les informations sur les impacts sur la biodiversité et les écosystèmes sont extraits de publications scientifiques et de rapports d'ONG. Pour les impacts socio-économiques, des données économiques (coûts des soins de santé, pertes de productivité agricole) sont recueillies auprès d'organismes statistiques nationaux et d'organisations internationales. L'évaluation quantitative des impacts sur la santé (QHIA) est une méthode clé, utilisant des fonctions dose-réponse (risques relatifs, RR) issues de la littérature épidémiologique (Lelieveld et al., 2015) pour calculer la fraction de risque attribuable

$$(AF = (RR-1) / RR).$$

Tableau 1.1: Estimations des émissions de polluants par les feux de forêt dans différentes régions tropicales

Région	Superficie brûlée (millions ha/an)	Émissions de PM2.5 (Tg/an)	Émissions de CO (Tg/an)	Référence
Amazonie	20	3	60	Artaxo et al. (2006)
Asie du Sud-Est	15	2.5	50	van der Werf et al. (2017)

d. Examen des Stratégies d'Atténuation et d'Adaptation

L'examen des stratégies d'atténuation et d'adaptation se fonde sur la collecte de documents de politique et réglementaires (lois, plans d'action), de rapports d'organisations internationales (UNEP, OMS), et d'études de cas documentant l'implémentation de projets d'atténuation (par exemple, énergies renouvelables, gestion des déchets) ou d'adaptation (par exemple, systèmes d'alerte précoce). Une analyse qualitative et des cadres d'analyse comparative sont utilisés pour évaluer leur efficacité et leur transférabilité. Cette approche globale et transdisciplinaire est essentielle pour développer une compréhension holistique et contextualisée des enjeux de la pollution atmosphérique dans les régions tropicales.

III. Résultats et Discussion

3.1. Sources d'Émissions de Pollution Atmosphérique en Zone Tropicale

Les régions tropicales sont caractérisées par un profil d'émissions distinct, souvent dominé par des sources spécifiques.

3.1.1. Combustion de la Biomasse

Les feux de forêt et de végétation dans les régions tropicales représentent une source considérable de pollution atmosphérique. Leurs origines sont doubles : naturelles (comme la foudre) et principalement anthropiques, résultant de pratiques telles que la déforestation et l'agriculture sur brûlis. La fumée issue de ces incendies est un mélange complexe de polluants, dont la composition évolue selon le type de biomasse brûlée (forêt dense, savane, tourbe) et les conditions de combustion (température, disponibilité en oxygène). Parmi les substances émises, on retrouve des particules fines (PM2.5, PM10), du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NOx), des composés organiques volatils (COV), ainsi que des gaz à effet de serre (GES), notamment le dioxyde de carbone (CO2) (Artaxo et al., 2006; van der Werf et al., 2017; Andreae, 1991). Pour mieux comprendre l'impact des feux de forêt et de végétation sur la qualité de l'air dans les régions tropicales, il est crucial d'estimer les quantités de polluants atmosphériques qu'ils libèrent. Le Tableau 1.1 présente une synthèse des émissions de polluants clés (tels que les particules fines, le monoxyde de carbone et les gaz à effet de serre) résultant de ces incendies dans différentes zones géographiques tropicales. Ces données sont essentielles pour évaluer l'empreinte environnementale de ces événements et leurs implications pour la santé humaine et le climat.

Afrique Subsaharienne	100	15	300	Andreae (1991)
--------------------------	-----	----	-----	----------------

Au-delà des estimations globales d'émissions de polluants, la répartition spatiale des feux est un élément crucial pour saisir pleinement leur impact. Pour illustrer cette hétérogénéité et identifier les zones les plus touchées, la Figure 1.1 présente une cartographie des points chauds de feux actifs détectés à l'échelle mondiale le 28 août 2019. Cette visualisation confirme que la distribution géographique de ces incendies est loin d'être uniforme. Elle révèle une prévalence notable en Afrique, en Amazonie et en Asie du Sud-Est, où des "points chauds" sont régulièrement observés. Ces zones correspondent souvent à des régions subissant une forte déforestation ou abritant de vastes savanes africaines, comme mentionné précédemment.

L'ampleur et la fréquence de ces incendies peuvent varier considérablement d'une année à l'autre, influencées par les conditions climatiques (notamment les périodes de sécheresse) et les méthodes de gestion des terres. Il est courant de se concentrer sur les incendies en Amazonie, mais les données satellitaires de la NASA, en particulier celles des instruments comme MODIS, révèlent une réalité bien plus étendue. Des milliers de feux actifs sont recensés mondialement, avec une proportion significative en Afrique. Ces feux soulignent l'ampleur de la pollution atmosphérique d'origine tropicale et la nécessité d'une attention globale (francetvinfo.fr, 2019).

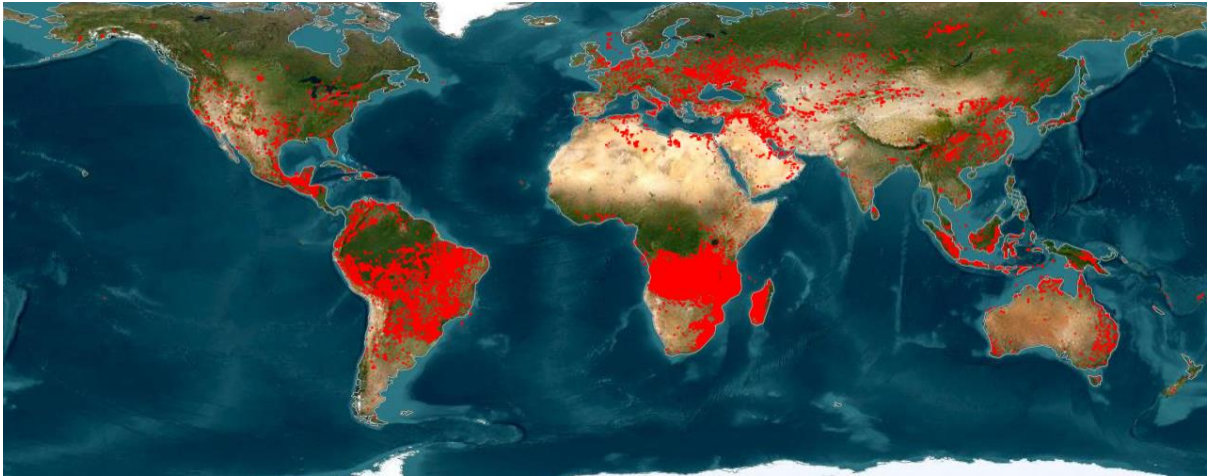


Figure 1.1 : Cartographie des points chauds de feux actifs dans le monde le 28 Aout 2019 (Source: FIRMS/NASA <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:2019-08-25..2019-08-26;@0.0,-0.0,2.3z>)

Si les feux de forêt peuvent avoir des origines naturelles, l'activité humaine est malheureusement la cause prédominante de leur propagation dans les régions tropicales. Parmi ces pratiques anthropiques, l'agriculture sur brûlis se distingue comme un facteur majeur et récurrent. Largement répandue dans les zones tropicales, cette technique consiste à défricher des terres par le feu, non seulement pour préparer le sol à des cultures comme le riz, le maïs, le manioc ou la canne à sucre, mais aussi pour y régénérer les nutriments et contrôler les parasites. Cependant, l'agriculture sur brûlis est une source significative de pollution atmosphérique, libérant d'importantes quantités de fumée et de divers polluants (Yevich & Logan, 2003;

Fearnside, 2005). L'efficacité et l'impact de cette pratique varient considérablement selon le type de végétation brûlée, les conditions météorologiques et les méthodes de gestion du feu. Bien que cette approche puisse sembler économique à court terme, elle entraîne à long terme une perte de fertilité des sols, une dégradation de la qualité de l'air et des risques sanitaires non négligeables. Pour approfondir notre compréhension de l'impact spécifique de l'agriculture sur brûlis, le Tableau 1.2 détaille les émissions typiques de polluants associées aux différents types de cultures. Ces données mettent en lumière la variabilité des émissions en fonction de la biomasse et des pratiques culturelles.

Tableau 1.2 : Émissions typiques par type de culture sur brûlis

Culture	Biomasse brûlée (t/ha)	Émissions de PM10 (kg/ha)	Référence
Riz	5-10	10-20	Yevich & Logan (2003)

Maïs	3-7	5-15	Fearnside (2005)
Manioc	2-5	3-10	Fearnside (2005)

Outre les feux de forêt et l'agriculture sur brûlis, une autre source significative, et souvent sous-estimée, de pollution atmosphérique dans les régions tropicales réside dans l'utilisation quotidienne de combustibles solides pour la cuisson au sein des ménages.

Dans de nombreuses régions tropicales, en particulier dans les zones rurales et périurbaines des pays en développement, une grande partie de la population dépend encore fortement de combustibles tels que le bois, le charbon de bois et les résidus agricoles pour leurs besoins de cuisson et de chauffage domestique. La combustion inefficace de ces matériaux dans des foyers traditionnels entraîne des niveaux alarmants de pollution de l'air intérieur. Cette exposition concerne particulièrement les femmes et les enfants, qui inhalent alors

des concentrations importantes de particules fines, de monoxyde de carbone (CO), de composés organiques volatils (COV) et d'autres polluants nocifs (Pope et al., 2015; Bruce et al., 2015; Fullerton et al., 2008). Cette pollution domestique est une cause majeure de maladies respiratoires, de maladies cardiovasculaires et d'autres problèmes de santé, contribuant significativement au fardeau global des maladies. Pour illustrer l'ampleur de ce problème de santé publique, le Tableau 1.3 présente les concentrations typiques de polluants mesurées à l'intérieur des habitations selon le type de combustible utilisé pour la cuisson. Ces données mettent en évidence les risques sanitaires spécifiques liés à chaque mode de combustion domestique.

Tableau 1.3 : Concentrations typiques de polluants dans les habitations utilisant différents combustibles

Combustible	Concentration de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration de CO (ppm)	Référence
Bois	300-1000	50-100	Bruce et al. (2015)
Charbon de bois	200-800	40-80	Duncan G. Fullerton et al. (2008)

3.1.2. Émissions Liées aux Activités Industrielles et Extractives

L'industrialisation rapide dans de nombreuses régions tropicales a entraîné une augmentation significative des émissions de polluants atmosphériques provenant des activités manufacturières. Les industries clés comprennent la production de ciment, la sidérurgie, la production d'électricité, le raffinage du pétrole et la production chimique. Ces industries libèrent divers polluants, notamment le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), les particules (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) (Molina et al., 1974). La concentration et la composition de ces émissions varient considérablement en fonction du type d'industrie, des technologies utilisées, des contrôles de la pollution en place, de la réglementation environnementale. Les zones industrielles sont souvent des points chauds de pollution, affectant la qualité de l'air locale et régionale.

L'extraction de minerais, de pétrole et de gaz naturel dans les régions tropicales contribue également à la pollution atmosphérique. Les activités telles que l'exploitation minière à ciel ouvert, le concassage et le broyage de minerais génèrent d'importantes quantités de poussières, souvent chargées de métaux lourds et d'autres polluants dangereux (e.g., arsenic, plomb) (World Health Organization, 2006).

En Afrique équatoriale, plusieurs pays sont particulièrement concernés. En République Démocratique du Congo (RDC), l'extraction de cuivre et de cobalt est liée à une déforestation significative et à la contamination des sols et de l'eau (CIFOR-ICRAF, 2024). Au Cameroun, l'exploitation minière artisanale de l'or est associée à la pollution de l'eau, à la déforestation et à la perte de biodiversité (Mimba, M. E. et al., 2023). Concernant le pétrole et le gaz, des pays comme le Gabon, la Guinée Équatoriale et le Congo sont d'importants producteurs, où les activités d'extraction et de raffinage libèrent des composés organiques volatils (COV), des oxydes d'azote (NO_x) et du dioxyde de soufre (SO_2) (Disclose.ngo, 2023). Ces activités ont des impacts locaux significatifs sur la qualité de l'air, contribuent à la contamination des sols et de l'eau, et peuvent entraîner des effets néfastes sur la santé des travailleurs et des communautés environnantes.

3.1.3. Émissions du Secteur des Transports

L'urbanisation rapide et la croissance économique dans de nombreuses villes tropicales ont entraîné une augmentation significative du nombre de véhicules en circulation. Les caractéristiques de ce parc automobile – son âge, le type de véhicules et les normes d'émission – varient considérablement d'une région à l'autre. Dans de nombreux pays en développement, une proportion importante des véhicules est souvent ancienne, mal entretenue et équipée de technologies de contrôle des émissions moins efficaces. L'utilisation de carburants de qualité inférieure, avec une teneur élevée en soufre, contribue également à des émissions plus importantes (EEA, 2019; Wright et al., 2017).. Par ailleurs, la congestion routière exacerbe la pollution de l'air en prolongeant le temps que les véhicules passent au ralenti, ce qui augmente la consommation de carburant et, par conséquent, les émissions par unité de distance parcourue. Pour mieux appréhender la contribution du secteur des transports à la pollution atmosphérique, le Tableau 1.4 présente les facteurs d'émission typiques associés à différents types de véhicules. Ces données permettent de quantifier les polluants émis en fonction du véhicule et de son carburant.

Tableau 1.4 : Facteurs d'émission typiques pour différents types de véhicules

Type de véhicule	Âge moyen (années)	Facteur d'émission de NOx (g/km)	Référence
Voiture essence	10	0.5	EEA (2019)
Voiture diesel	8	1.5	EEA (2019)
Bus diesel	12	5	Wright et al. (2017)

Bien que le transport routier soit une source dominante de pollution atmosphérique dans de nombreuses villes tropicales, le transport aérien et maritime peut également contribuer de manière significative, en particulier dans les régions avec des aéroports et des ports importants. Les avions émettent des NOx, des particules et d'autres polluants pendant le décollage, l'atterrissage et la croisière, affectant la qualité de l'air locale autour des aéroports et contribuant potentiellement à la pollution troposphérique à plus grande échelle (International Civil Aviation Organization (ICAO)). Les navires de mer, en particulier ceux qui utilisent des carburants lourds à forte teneur en soufre, émettent de grandes quantités de SO₂, de NOx et de particules, contribuant à la pollution atmosphérique côtière et régionale (International Maritime Organization (IMO)).

3.1.4. Autres Sources d'Émissions

En plus des sources anthropiques majeures et des transports urbains, d'autres facteurs contribuent également à la pollution atmosphérique dans les régions tropicales :

a) Déchets

L'élimination inadéquate des déchets, et en particulier l'incinération à ciel ouvert, est une source significative de pollution atmosphérique dans de nombreuses régions tropicales. La combustion non contrôlée de déchets solides libère une grande variété de polluants, incluant des particules, du monoxyde de carbone (CO), des composés organiques volatils (COV), ainsi que des substances hautement toxiques comme les dioxines et les furanes (Vidonish et al., 2016). Par

ailleurs, les décharges sont également des émettrices de méthane (CH₄), un puissant gaz à effet de serre, et de COV, qui peuvent contribuer à la formation d'ozone troposphérique.

b) Émissions d'Origine Naturelle

Outre les sources anthropiques, certaines émissions d'origine naturelle peuvent contribuer de manière significative à la pollution atmosphérique dans certaines régions tropicales. Les tempêtes de poussière, notamment celles provenant du Sahara et d'autres régions arides, peuvent transporter de grandes quantités de particules fines sur de longues distances, affectant la qualité de l'air dans des régions éloignées. Les éruptions volcaniques libèrent aussi des quantités massives de dioxyde de soufre (SO₂), de particules et de cendres, ce qui peut avoir des impacts locaux, régionaux et même mondiaux sur la qualité de l'air et le climat (Prospero, 1999).

3.2. Influence des Facteurs Météorologiques et Climatiques sur la Pollution Atmosphérique Tropicale

Les conditions météorologiques et climatiques des tropiques modulent de manière significative la dynamique des polluants.

3.2.1. Rayonnement Solaire et Réactions Photochimiques

Le fort ensoleillement caractéristique des régions tropicales joue un rôle crucial dans la chimie atmosphérique. L'énergie solaire intense favorise des réactions photochimiques rapides et efficaces. Ces réactions transforment les polluants primaires (comme les oxydes d'azote - NOx, et les composés organiques volatils - COV) en polluants secondaires plus nocifs, tels que l'ozone

troposphérique (O₃) et les particules secondaires (Crutzen, 1970). La formation d'ozone troposphérique est un problème majeur de qualité de l'air dans de nombreuses villes tropicales, entraînant des pics de pollution particulièrement prononcés pendant les périodes de fort ensoleillement. Pour une meilleure compréhension de ce processus

complexe, la Figure 2.1 illustre le cycle de formation de l'ozone troposphérique en conditions tropicales. Cette figure détaille les interactions photochimiques clés qui mènent à la production de ce polluant secondaire sous l'effet du rayonnement solaire intense.

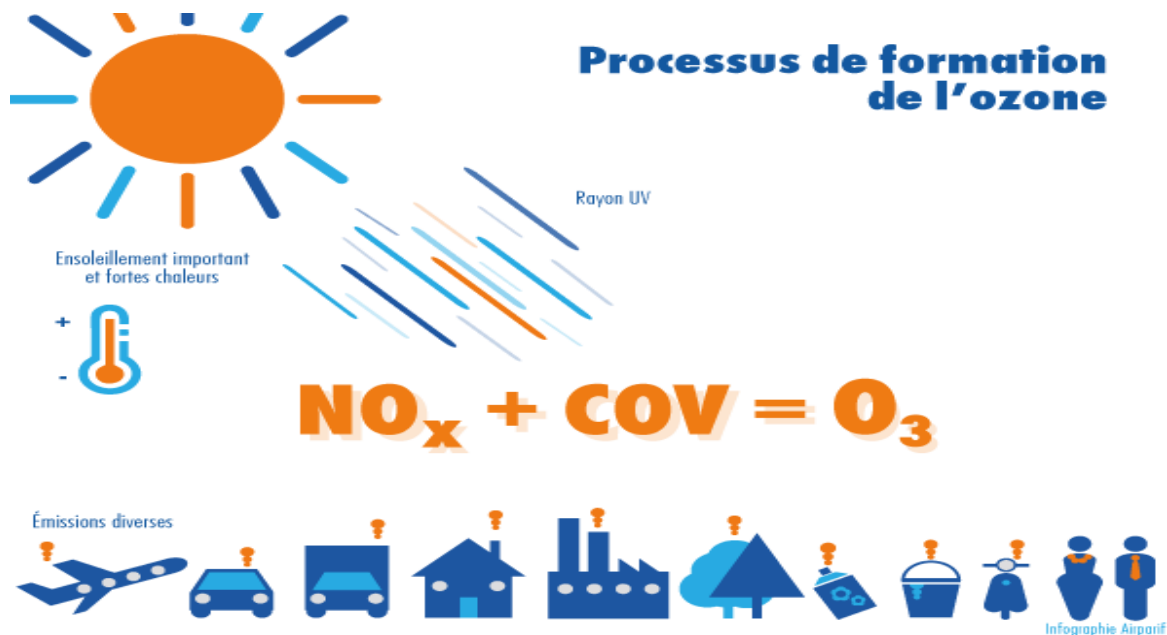


Figure 2.1 : Cycle de formation de l'ozone troposphérique en conditions tropicales (source: <https://www.airparif.fr/actualite/2020/prevision-dun-episode-lozone> consulté le)

L'ozone est un polluant secondaire dont la formation est principalement due à des réactions photochimiques initiées par le rayonnement UV solaire agissant sur des polluants primaires tels que les oxydes d'azote et les composés organiques volatils (Figure 2.1). Le fort ensoleillement caractéristique des régions tropicales intensifie ces réactions, entraînant une transformation rapide et efficace des polluants primaires en ozone troposphérique, un polluant secondaire nocif. Par conséquent, la formation d'ozone troposphérique constitue un problème majeur de qualité de l'air dans de nombreuses villes tropicales, avec des pics de pollution observés lors des périodes de fort ensoleillement.

3.2.2. Température et Humidité

Les températures élevées dans les régions tropicales augmentent la volatilité de nombreux composés organiques, ce qui entraîne une concentration accrue de COV dans l'atmosphère et favorise la formation d'ozone. L'humidité joue un rôle complexe dans la pollution atmosphérique. Des niveaux d'humidité élevés peuvent favoriser la formation de particules secondaires par absorption d'eau et réactions chimiques en phase aqueuse. Cependant, l'humidité peut également faciliter le dépôt humide des polluants, contribuant ainsi à leur élimination de l'atmosphère (Jacobson, M. Z. (2002)).

3.2.3. Régimes de Précipitations

Les précipitations jouent un rôle important dans l'élimination des polluants atmosphériques par dépôt humide. Les fortes pluies tropicales peuvent lessiver efficacement les

particules et les gaz solubles de l'atmosphère, améliorant temporairement la qualité de l'air. Cependant, les régimes de précipitations dans les régions tropicales sont souvent très variables, avec des saisons sèches prolongées où la pollution peut s'accumuler (Lelieveld et al., 2001). Les changements climatiques, avec une modification des régimes de précipitations (augmentation des sécheresses, intensification des pluies), pourraient modifier significativement la dispersion et la concentration des polluants. Selon Y. Chen et al. (2020), les grandes mégapoles connaissent des concentrations nocturnes de PM_{2.5} plus élevées avec moins de variation le matin, et une heure de pointe matinale qui s'étend jusqu'à 10 heures en hiver, contrairement à 9 heures dans d'autres villes. Cette prolongation hivernale de l'heure de pointe pourrait être attribuée à un trafic plus dense et à la taille étendue de ces villes, impactant la fluidité des déplacements (Alam et Ahmed, 2013; Srinivas, 2018). Ces observations suggèrent que l'amélioration des systèmes de transport public est cruciale pour atténuer la pollution par les PM_{2.5}, particulièrement dans les grandes agglomérations.

3.2.4. Circulation Atmosphérique Locale et Régionale

Les systèmes de vents tropicaux, tels que les alizés et les moussons, jouent un rôle crucial dans la dispersion et le transport des polluants. Les alizés, par exemple, peuvent transporter la pollution sur de longues distances à travers les océans. Les moussons, avec leur alternance de vents secs et humides, influencent la dispersion saisonnière des contaminants atmosphériques. De plus, les inversions thermiques, fréquentes dans certaines zones urbaines

tropicales en raison de la topographie et des conditions météorologiques, peuvent piéger les polluants près de la surface, entraînant de graves épisodes de pollution (Holton et al., 2012).

Le transport à longue distance est un phénomène bien établi, comme en témoigne le déplacement de la poussière saharienne à travers l'Atlantique, qui peut avoir des impacts significatifs sur la qualité de l'air dans des régions éloignées. La distance parcourue par les polluants atmosphériques dépend de plusieurs facteurs, notamment l'intensité de l'émission, l'altitude d'injection, la taille des particules et leur stabilité chimique. Ce transport peut même s'étendre de la troposphère à la stratosphère et à la mésosphère, expliquant

l'accumulation de certains polluants aux pôles. Ainsi, la dispersion des polluants est influencée à la fois par des mécanismes globaux capables d'acheminer des substances stables vers des zones reculées, et par des systèmes de vents régionaux et des conditions météorologiques locales qui affectent leur concentration et leur répartition, particulièrement dans les régions tropicales.

Le Tableau 2.1 et la Figure 2.2 illustrent plus en détail ces mécanismes complexes de transport et de dispersion des polluants atmosphériques.

Tableau 2.1 : Principaux types de transport atmosphérique des polluants (d'après Miller et Robinson, 1989).

Échelle de distance	Mécanismes de transport	Mécanismes d'élimination
Locales (0-50 km)	Vents dominants	Dépôt
Moyennes (50-1 000 km)	Mélanges verticaux dans la troposphère, critères climatiques régionaux	Dépôt, resuspension, photochimie
Globale	Circulation générale	Puits océaniques et arctiques

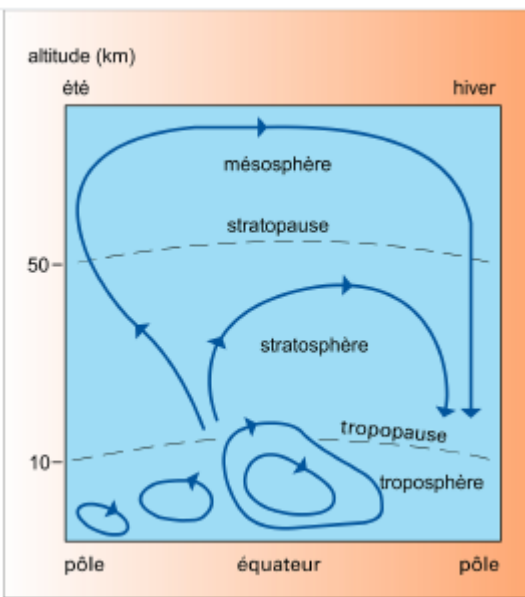


Figure 2.2 : Schéma de la circulation stratosphérique expliquant le transport d'aéropolluants émis dans l'hémisphère Nord vers la stratosphère antarctique (d'après F. Ramade, « Écotoxicologie », Masson, 1992).

3.3. Impacts de la Pollution Atmosphérique en Zone Tropicale

La pollution atmosphérique engendre des conséquences graves sur la santé, les écosystèmes et les économies des régions tropicales.

3.3.1. Impacts sur la Santé Humaine

La pollution atmosphérique a de graves conséquences sur la santé humaine, contribuant à un large éventail de maladies et à une mortalité prématurée. Les particules fines (PM2.5) sont particulièrement préoccupantes car, en raison de leur petite taille, elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et même passer dans la circulation sanguine. Cette infiltration provoque ou aggrave des maladies respiratoires (comme l'asthme, la bronchite chronique et les infections respiratoires), des maladies cardiovasculaires (telles que les crises cardiaques et les accidents vasculaires cérébraux), et le cancer du poumon

(GBD Air Pollution Collaborators, 2020). L'exposition à l'ozone troposphérique (O3) peut également causer des problèmes respiratoires et réduire la fonction pulmonaire. Au-delà de ces affections, la pollution atmosphérique peut avoir des effets néfastes sur la grossesse, le développement infantile et la santé neurologique. Il est important de noter que les populations vulnérables, y compris les enfants, les personnes âgées et celles atteintes de maladies préexistantes, sont particulièrement à risque face à ces menaces (Pope et al., 2015). Pour quantifier l'ampleur de ces répercussions sanitaires, le Tableau 3.1 présente des estimations de la charge de morbidité et de mortalité directement attribuables à la pollution atmosphérique dans diverses régions tropicales. Ces données soulignent l'impact dévastateur de ce fléau environnemental sur la santé publique à travers le monde tropical.

Tableau 3.1 : Estimations de la charge de morbidité et de mortalité attribuables à la pollution atmosphérique dans différentes régions tropicales

Région	Décès prématurés attribuables à la PM2.5 (par an)	Prévalence de l'asthme infantile liée à la pollution (%)	Référence
Asie du Sud-Est	500 000	10	GBD (2019)
Afrique Subsaharienne	200 000	8	GBD (2019)

3.3.2. Impacts sur les Écosystèmes et la Biodiversité

La pollution atmosphérique a également des impacts significatifs sur les écosystèmes et la biodiversité des régions tropicales. L'ozone troposphérique peut endommager la végétation, réduisant la croissance des plantes, la photosynthèse et les rendements des cultures. Les dépôts acides (formés par les émissions de SO2 et de NOx) peuvent acidifier les sols et les eaux, affectant les organismes aquatiques et terrestres. Les particules et les polluants gazeux peuvent affecter les habitats et perturber les cycles biogéochimiques, menaçant la riche biodiversité des écosystèmes tropicaux (Fowler et al., 1999).

3.3.3. Impacts Socio-économiques

Les impacts de la pollution atmosphérique vont au-delà de la santé et de l'environnement, entraînant des coûts socio-économiques importants. Les coûts des soins de santé liés aux maladies attribuables à la pollution, la perte de productivité due à la morbidité et à la mortalité prématurée, les dommages causés aux cultures et aux écosystèmes, et les effets négatifs sur le tourisme peuvent représenter une lourde charge pour les économies, en particulier dans les pays en développement où les ressources sont limitées (World Bank, 2016).

3.4. Stratégies d'Atténuation et d'Adaptation en Zone Tropicale

Des approches multiples sont nécessaires pour lutter contre la pollution atmosphérique.

3.4.1. Politiques et Réglementations

Diverses politiques et réglementations sont mises en œuvre dans les régions tropicales pour lutter contre la pollution atmosphérique (United Nations Environment Programme). Celles-ci comprennent des normes de qualité de l'air ambiant, des réglementations des émissions par secteur (industriel, transport, agricole), et des instruments économiques tels que les taxes sur les émissions et les subventions pour les technologies propres. Cependant, l'efficacité de ces politiques varie considérablement en fonction du contexte local, de la capacité de mise en œuvre, de la gouvernance, des ressources financières et des priorités politiques.

3.4.2. Technologies et Mesures de Contrôle des Émissions

Un large éventail de technologies et de mesures sont disponibles pour réduire les émissions de polluants atmosphériques. Celles-ci comprennent l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie et les transports, l'adoption de technologies de combustion plus propres, l'installation de dispositifs de contrôle des émissions (filtres, laveurs) dans les installations industrielles, une meilleure gestion des déchets, la promotion de modes de transport plus propres (véhicules électriques, transports en commun), et le passage à des sources d'énergie renouvelables (Seinfeld et al., 2016).

3.4.3. Solutions Basées sur la Nature

Les solutions basées sur la nature, telles que l'augmentation de la végétation urbaine, la gestion durable des forêts et la restauration des écosystèmes dégradés,

peuvent contribuer à atténuer la pollution atmosphérique en séquestrant les polluants et en améliorant la qualité de l'air locale (Grar et al., 2015).

3.4.4. Sensibilisation et Éducation du Public

La sensibilisation et l'éducation du public sont essentielles pour informer les gens sur les risques de la pollution atmosphérique et les encourager à prendre des mesures pour réduire leur exposition et leur contribution aux émissions (Kahneman, D. 2011).

3.4.5. Adaptation aux Impacts de la Pollution Atmosphérique

En complément des efforts d'atténuation des émissions, des stratégies d'adaptation sont cruciales pour protéger les populations vulnérables contre les impacts de la pollution atmosphérique. Ceci est particulièrement vrai dans les régions tropicales où les niveaux de pollution sont déjà élevés ou devraient s'aggraver en raison du changement climatique (Ebi et al., 2018). Ces stratégies comprennent la mise en place de systèmes d'alerte précoce en cas de pics de pollution, la promotion de mesures de protection individuelle (comme l'utilisation de masques ou la réduction des activités en extérieur), et une planification urbaine qui intègre la qualité de l'air dès la conception des villes.

Pour relever efficacement le défi de la pollution atmosphérique en zone tropicale, il est impératif d'identifier les lacunes dans les connaissances actuelles et de définir les priorités de recherche future. Cela inclut le développement de modèles de prévision plus précis, le renforcement des réseaux de surveillance de la qualité de l'air, et la conduite d'études épidémiologiques approfondies pour mieux comprendre les liens entre pollution et santé. Enfin, une collaboration internationale et interdisciplinaire est essentielle pour partager les meilleures pratiques, les technologies et les données afin d'aborder ce problème environnemental et sanitaire complexe.

IV. Conclusion

La pollution atmosphérique en zone tropicale est un phénomène complexe, influencé par des sources d'émissions spécifiques et des conditions météorologiques et climatiques uniques. Les feux de biomasse, l'industrialisation, l'urbanisation rapide et l'utilisation de combustibles solides pour la cuisson sont les principaux moteurs de cette pollution, entraînant des impacts sanitaires, environnementaux et socio-économiques dévastateurs. Le fort ensoleillement favorise la formation de polluants secondaires comme l'ozone, tandis que les régimes de précipitations et la circulation atmosphérique influencent la dispersion et l'accumulation des polluants.

Malgré une reconnaissance croissante de cette problématique, des lacunes subsistent dans la compréhension fine des processus atmosphériques tropicaux, l'évaluation précise des impacts à long terme et l'efficacité des interventions. Pour relever ce défi, une approche holistique est impérative, combinant des politiques et réglementations robustes, l'adoption de technologies de contrôle des émissions, le recours à des solutions basées sur la nature, et une sensibilisation accrue du public. L'adaptation aux impacts inévitables est également cruciale pour protéger les populations vulnérables.

Les perspectives de recherche future doivent se concentrer sur l'amélioration de la modélisation et de la surveillance de la qualité de l'air dans les tropiques, la réalisation d'études

épidémiologiques plus approfondies pour quantifier les impacts sanitaires spécifiques, et l'évaluation de l'efficacité des stratégies d'atténuation et d'adaptation dans des contextes locaux variés. Une collaboration internationale et interdisciplinaire sera essentielle pour développer des solutions durables et adaptées aux spécificités des régions tropicales, garantissant ainsi un air plus sain pour les générations futures.

Références

- Alam, M. A., & Ahmed, F. (2013). Urban transport systems and congestion: a case study of indian cities. *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific*, 82, 33-43.
- Andreae, M. O. (1991). Biomass burning: Its history, use, and distribution, and its impact on environmental quality and global climate. In *Global biomass burning: Atmospheric, climatic, and biospheric implications* (pp. 3-21). MIT Press.
- Artaxo, P., Hansson, H. C., Rizzo, L. V., Sherrill, J. T., & Andreae, M. O. (2006). Amazonian aerosols: characterization of sources and spatial distribution. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 4793-4809.
- Barn, P., Jackson, P., Suzuki, N., Kosatsky, T., Jennejohn, D., Henderson, S., McCormick, W., Millar, G., Plain, E., Poplawski, K., & Setton, E. (2011). [Outils d'évaluation de la qualité de l'air: Guide pour les praticiens de la santé publique](#). Centre de collaboration nationale en santé environnementale.
- Bruce, N., Rehfuess, E. A., Mehta, S., & Smith, K. R. (2015). Indoor smoke from household fuel combustion and childhood pneumonia: Global and regional burden of disease. *Environmental health perspectives*, 122(1), 84-90.
- CIFOR-ICRAF. (2024). Mining in the Congo rainforest causes more deforestation than previously assumed. <https://forestsnews.cifor.org/89558/mining-in-the-congo-rainforest-causes-more-deforestation?fnl=>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates of global, regional, and national morbidity, mortality, and disability-adjusted life years due to air pollution, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918.
- Crutzen, P. J. (1970). The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(408), 320-325.
- Duncan G. Fullerton, N., Bruce, N., & Gordon, S. B. (2008). Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 102(9), 843-851.
- Disclose.ngo. (2023). Revealed: Perenco's damaging oil spills in Gabon. <https://disclose.ngo/en/article/revealed-perencos-damaging-oil-spills-in-gabon>
- Ebi, K. L., Shindell, D., Oppenheimer, M., & Mills, E. (2018). Preparing for climate change impacts on human health in the United States. *Environmental Health*, 17(1), 1-

12. European Environment Agency (EEA). (2019). EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Publications Office of the European Union.
- Fearnside, P. M. (2005). Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and environmental consequences. *Environmental Conservation*, 32(04), 291-301.
- Fowler, D., Pitcairn, C., & Sutton, M. (1999). The deposition of atmospheric pollutants in semi-natural ecosystems. *Advances in environmental science*.
- GBD 2019 Air Pollution Collaborators. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223-1249.
- Grar, S. L., Mitchell, R., De Vries, S., & Maas, J. (2015). How characteristics of neighbourhood green space influence children's play, social interactions, and physical activity: An observational study. *Social science & medicine*, 137, 68-75.
- Holton, J. R., Hakim, G. J., & Kundu, P. K. (2012). An introduction to dynamic meteorology. Academic press.
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (Non daté). Publications et normes relatives aux émissions des aéronefs.
- International Maritime Organization (IMO). (Non daté). Réglementations sur la prévention de la pollution de l'air par les navires.
- Jacobson, M. Z. (2002). Atmospheric pollution: history, science, and regulation. Cambridge university press.
- Kahneman, D. (2011). Thinking, fast and slow. Farrar, Straus and Giroux.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Amann, M., Balakrishnan, N., Bose-O'Reilly, C., Brauer, M., ... & Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512.
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371.
- OECD. (2003). Environment Policy Committee (EPOC): OECD Environmental Indicators: Towards Sustainable Development. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Lelieveld, J., Crutzen, P. J., Ramanathan, V., Andreae, M. O., Brenninkmeijer, C. A. M., Feichter, J., ... & Williams, J. (2001). The Indian Ocean experiment: widespread air pollution from South Asia. *Science*, 291(5506), 1031-1036.
- Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810-812.
- Mimba, M. E., Mbafor, P. U. T., Fils, S. C. N., & Nforba, M. T. (2023). Environmental impact of artisanal and small-scale gold mining in East Cameroon, Sub-Saharan Africa: an overview. *Ore and energy resource geology*, 15, 100031.
- Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2021). Lignes directrices de l'OMS sur la qualité de l'air : Particules, ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone.
- Pope D, Diaz E, Smith-Sivertsen T, Lie RT, Bakke P, Balmes JR, Smith KR, Bruce NG. (2015). Exposure to household air pollution from wood combustion and association with respiratory symptoms and lung function in nonsmoking women: results from the RESPIRE trial, Guatemala. *Environ Health Perspect*. 123(4):285-92.
- Prospero, J. M. (1999). Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Implications of African dust for air quality in the southeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D13), 15947-15957.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons.
- Srinivas, A., 2018. How Traffic Flow Affects Travel Time in Delhi and Mumbai. *livemint*.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (Non daté). Publications et rapports sur la pollution de l'air.
- UNEP. (2019). Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions. United Nations Environment Programme.
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., ... & van Oijen, M. (2017). Global fire emissions estimates based on GFED4 model results for burnt area, carbon losses, and smoke production for 1997-2016. *Earth System Science Data*, 9(2), 697-720.
- Vidonish, D. J., Jacobson, M. Z., & Malm, W. C. (2016). Improved global estimates of particulate matter, trace gas and air toxics emissions from open burning of domestic waste. *Environmental science & technology*, 50(9), 5074-5085.
- Vidonish, J. E., Fox, A., Cloyd, T., & Hristovski, K. (2016). A review of environmental and health impacts of open burning of municipal solid waste and its alternatives. *Environmental Engineering Science*, 33(10), 735-748.
- World Bank. (2016). The cost of air pollution: Strengthening the economic case for action. World Bank Publications.
- Wright, M., Hickman, R., & Banister, D. (2017). The carbon impacts of urban passenger transport: Comparing scenarios, policies and models. *Journal of Transport Geography*, 64, 42-54.
- World Health Organization. (2006). Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Geneva: World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/107823>