



DEMOCRATIC AND POPULAR ALGERIAN REPUBLIC
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
CHADLI BENDJEDID EL TARF UNIVERSITY
كلية علوم الطبيعة والحياة
FACULTY OF NATURE AND LIFE SCIENCES
قسم البيولوجيا



Mémoire de Fin d'Études
Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en
«2^{ème} Année Master Toxicologie Industrielle et Environnement »

Thème

Évaluation spatiotemporelle de la pollution atmosphérique dans l'Est algérien

Présenté Par : Guellil Roumaissa et Messadeg Aya

Soutenue publiquement le : 17 juin 2026

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Brahmia Zahra	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Président
Aouadi Abdallah	MCB	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Directeur de thèse
Ayaichia Fethi	MCB	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Co-encadreur
Siouane Nourddine	MCB	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Université Chadli Bendjedid. BP : 73, El Tarf 36000 الجزائر 70333 الطارف-37 رقم
Algérie
Téléphone : +213 38 60 09 43 Fax : +213 38 60 14 17 :+213 38 60 18 93 الهاتف : [http://www. univ-eltarf.dz](http://www.univ-eltarf.dz)

Remerciement

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le soutien précieux de nombreuses personnes, que nous tenons à remercier chaleureusement.

On souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, Dr. Aouadi Abdallah et Dr. Ayaichia Fethi, pour leurs précieux conseils, leur disponibilité et leur accompagnement rigoureux tout au long de cette recherche. Leurs orientations m'ont permis de mener à bien ce travail et d'approfondir ma réflexion scientifique.

Nous remercions également Dr. Brahmia Zahra, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle me fait en présidant le jury de ce mémoire, ainsi que Dr. Siouane Noureddine, Examineur, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et de faire profiter de leur expertise.

Nos sincères remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants et chercheurs du département de biologie qui nous ont formé et accompagné tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, un grand merci à nos familles et à nos proches pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur patience tout au long de ces années d'études.

Résumé

La pollution atmosphérique constitue une menace majeure pour la santé publique et l'environnement, en particulier dans les régions industrialisées d'Afrique du Nord disposant de réseaux de surveillance limités. Cette étude vise à évaluer la pollution atmosphérique dans le Nord-Est algérien (wilayas d'Annaba, Guelma, Souk Ahras et El Tarf) à l'aide des données du satellite Sentinel-5P/TROPOMI sur la période 2019–2025. Les polluants analysés incluent le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone troposphérique (O₃), le dioxyde de soufre (SO₂), le formaldéhyde (HCHO) et le méthane (CH₄). Les traitements ont été réalisés sous Google Earth Engine, suivis d'analyses statistiques (ACP, ANOVA, test de Tukey HSD). Les résultats montrent des concentrations plus élevées de CO, NO₂ et HCHO à Annaba, traduisant une forte empreinte industrielle et urbaine. L'O₃ présente une distribution spatiale homogène, conforme à son caractère secondaire. Le SO₂ ne montre pas de différence spatiale significative mais une hausse notable en 2025, suggérant une reprise des activités industrielles post-COVID-19. Le CH₄ affiche une tendance à la hausse continue sur la période 2020–2024. L'analyse multivariée distingue clairement deux régimes de pollution : les polluants de combustion (CO, NO₂, O₃, HCHO) et les émissions soufrées (SO₂). Cette étude démontre le potentiel des données satellitaires Sentinel-5P pour la surveillance de la qualité de l'air dans les régions sous-équipées en stations au sol et plaide pour la mise en place d'un réseau intégré couplant télédétection et mesures in situ.

Mots-clés : Pollution atmosphérique, Sentinel-5P/TROPOMI, Nord-Est algérien, NO₂, O₃, analyse spatio-temporelle, Google Earth Engine.

Abstract

Air pollution is a major threat to public health and the environment, particularly in industrialized regions of North Africa with limited monitoring networks. This study aims to assess air pollution in northeastern Algeria (the wilayas of Annaba, Guelma, Souk Ahras, and El Tarf) using Sentinel-5P/TROPOMI satellite data over the period 2019–2025. The analyzed pollutants include carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), tropospheric ozone (O₃), sulfur dioxide (SO₂), formaldehyde (HCHO), and methane (CH₄). Data processing was carried out on Google Earth Engine, followed by statistical analyses (PCA, ANOVA, Tukey HSD test). The results show higher concentrations of CO, NO₂, and HCHO in Annaba, reflecting a strong industrial and urban footprint. O₃ exhibits a homogeneous spatial distribution, consistent with its secondary pollutant nature. SO₂ shows no significant spatial difference but a notable increase in 2025, suggesting a post-COVID-19 recovery of industrial activities. CH₄ displays a continuous upward trend over the 2020–2024 period. Multivariate analysis clearly distinguishes two pollution regimes: combustion-related pollutants (CO, NO₂, O₃, HCHO) and sulfur emissions (SO₂). This study demonstrates the potential of Sentinel-5P satellite data for air quality monitoring in regions with limited ground-based stations and advocates for the establishment of an integrated network combining remote sensing and in situ measurements.

Keywords: Air pollution, Sentinel-5P/TROPOMI, northeastern Algeria, NO₂, O₃, spatiotemporal analysis, Google Earth Engine.

الملخص

يشكل تلوث الهواء تهديداً رئيسياً للصحة العامة والبيئة، خاصة في المناطق الصناعية بشمال إفريقيا التي تفتقر إلى شبكات رصد كافية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تلوث الهواء في شمال شرق الجزائر (ولايات عنابة، قالمة، سوق أهراس والطارف) للفترة 2019–2025. تشمل الملوثات التي تم تحليلها أول Sentinel-5P/TROPOMI باستخدام بيانات القمر الصناعي ، (SO_2) ، وثاني أكسيد الكبريت (O_3) ، والأوزون التروبوسفيري (NO_2) ، وثاني أكسيد النيتروجين (CO) أكسيد الكربون ، تليها تحليلات Google Earth Engine تمت معالجة البيانات باستخدام (CH_4) ، والميثان ($HCHO$) والفورمالدهيد ، $HCHO$ و NO_2 و CO إحصائية (تحليل المكونات الرئيسية، تحليل التباين، اختبار توكي). أظهرت النتائج تركيزات أعلى من بتوزيع مكاني متجانس، وهو ما يتوافق مع طبيعته كثنائي. لم O_3 في عنابة، مما يعكس بصمة صناعية وحضرية قوية. يتميز فرقاً مكانياً معنوياً لكنه سجل ارتفاعاً ملحوظاً في عام 2025، مما يشير إلى استئناف الأنشطة الصناعية بعد SO_2 يظهر اتجاهًا تصاعدياً مستمراً خلال الفترة 2020–2024. يميز التحليل متعدد المتغيرات CH_4 جائحة كوفيد-19. كما أظهر تثبت هذه (SO_2) والانبعثات الكبريتية ($HCHO$ ، O_3 ، NO_2 ، CO) بوضوح بين نظامين للتلوث: ملوثات الاحتراق لرصد جودة الهواء في المناطق التي تعاني من نقص المحطات الأرضية، وتدعو إلى Sentinel-5P الدراسة إككانيات بيانات إنشاء شبكة متكاملة تجمع بين الاستشعار عن بعد والقياسات الميدانية

الكلمات المفتاحية:

Google Earth، تحليل مكاني-زمني، O_3 ، NO_2 ، شمال شرق الجزائر، Sentinel-5P/TROPOMI، تلوث الهواء، Engine.

Sommaire

Section	Page
Introduction	1
Chapitre 1 : Pollution atmosphérique	3
1. Définition de la pollution atmosphérique	4
2. Les gaz polluants (NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , CO), particules fines (PM _{2.5} , PM ₁₀)	5
3. Les sources de la pollution atmosphérique	5
4. Activités industrielles et de production d'énergie	7
5. Effets de la pollution sur la santé publique et l'environnement	7
6. Maladies respiratoires et cardiovasculaires	7
7. Polluants et mécanismes	8
8.1 Effets de la pollution sur l'environnement	8
8.2 Effets sur les écosystèmes et la biodiversité	9
9. Échelle mondiale et interactions	9
Chapitre 2 : Études précédentes dans des zones similaires	10
2.1. La surveillance et solutions à faible coût	11
2.2. Recherche sur la pollution de l'air à l'échelle mondiale et régionale	11
2.3. Comparaison des résultats en Algérie	12
2.4. Principaux domaines d'application	12

Section	Page
Matériel et Méthodes	14
Zone d'étude	15
Données satellitaires	15
Approche méthodologique	16
Traitement des données	16
Analyses statistiques	17
Résultats	19
Discussion	28
Conclusion	30
Références	31

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
Figure 01	La pollution atmosphérique	4
Figure 02	Les sources de pollution de l'air	6
Figure 03	Localisation de la zone d'étude dans le Nord-Est de l'Algérie (Annaba, El Tarf, Guelma et Souk Ahras)	15
Figure 04	Schéma méthodologique de l'analyse spatio-temporelle des polluants atmosphériques à partir des données Sentinel-5P (2019–2025)	17
Figure 05	Distribution spatiale du monoxyde de carbone (CO) dans le Nord-Est algérien	21
Figure 06	Répartition du formaldéhyde (HCHO) dans le Nord-Est algérien	21
Figure 07	Gradient spatial du dioxyde d'azote (NO ₂) dans le Nord-Est algérien	22
Figure 08	Distribution spatiale de l'ozone troposphérique (O ₃) dans le Nord-Est algérien	23
Figure 09	Distribution du dioxyde de soufre (SO ₂) dans le Nord-Est algérien	24
Figure 10	Évolution mensuelle des concentrations de méthane (CH ₄) et tendance linéaire, 2020-2023	25
Figure 11	Anomalies mensuelles des concentrations de méthane (CH ₄) par rapport à la moyenne de référence, 2020-2024	25
Figure 12	Biplots ACP des polluants atmosphériques (CO, NO ₂ , O ₃ , HCHO, SO ₂) selon l'année (a) et la wilaya (b)	27
Figure 13	Boxplots des concentrations (CO, HCHO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂) selon la wilaya (a) et l'année (b)	28

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	Page
Tableau 01	Polluants atmosphériques étudiés et variables Sentinel-5P (Google Earth Engine)	16
Tableau 02	Statistiques descriptives (moyenne $\pm$ écart-type) des polluants atmosphériques par wilaya dans le Nord-Est algérien	20
Tableau 03	Résultats du test de Tukey HSD : comparaisons par paires des concentrations de polluants entre les wilayas	28
Tableau 04	Résultats du test de Tukey HSD : comparaisons par paires des concentrations de polluants entre les années (2019–2025)	29

Introduction

La pollution atmosphérique constitue aujourd'hui l'une des menaces environnementales et sanitaires les plus graves à l'échelle planétaire. Reconnue comme l'une des plus grandes menaces environnementales pesant sur la santé humaine, aux côtés du changement climatique (OMS, 2021), elle se définit comme l'introduction directe ou indirecte de substances nocives dans l'air par les activités humaines, altérant ainsi les caractéristiques physiques et chimiques du milieu naturel, conformément à la loi sur l'air du 30 décembre 1996 [1]. L'ampleur de ses conséquences sanitaires est alarmante. Chaque année, l'exposition à la pollution atmosphérique est estimée à l'origine de 7 millions de décès prématurés et entraîne la perte de millions d'années de vie en bonne santé, incluant chez l'enfant une réduction de la croissance pulmonaire, des infections respiratoires et de l'asthme aggravé [2]. La pollution atmosphérique se classe au quatrième rang des principaux facteurs de risque de morbidité et de mortalité mondiale, juste derrière l'hypertension, le tabagisme et les facteurs alimentaires [3]. L'évaluation de cet impact sanitaire repose principalement sur la concentration des particules fines PM10 et PM2.5 comme indicateurs de pollution, en lien avec des indicateurs de santé tels que la mortalité et la morbidité d'origine cardiovasculaire et respiratoire [4]. Les sources de cette pollution sont multiples et se regroupent en deux grandes catégories : les sources naturelles et les sources anthropiques. Parmi ces dernières figurent les activités industrielles, les transports, la combustion de carburants fossiles, l'agriculture et l'élevage, ainsi que la gestion des déchets [4]. En Algérie, la région du nord-est est particulièrement concernée par ce phénomène, notamment en raison de la présence de pôles industriels majeurs et d'une urbanisation croissante. À Annaba, ville côtière du nord-est algérien, les dépassements des normes OMS sont fréquents, notamment durant la saison estivale par situations de brise de mer, avec des concentrations de précurseurs comme le NO₂, le SO₂ et les COV particulièrement élevées au centre-ville [5]. Face à l'insuffisance des réseaux de mesure au sol dans les pays en développement, le recours aux données satellitaires a profondément transformé les approches de surveillance de la qualité de l'air. La télédétection est désormais considérée comme une alternative rentable et efficace, permettant d'obtenir des informations sur la qualité de l'air à grande échelle, là où les réseaux conventionnels sont inexistants ou insuffisants [6]. Le satellite Sentinel-5P, lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en 2017, emporte le TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), un spectromètre hyperspectral qui mesure le rayonnement solaire réfléchi

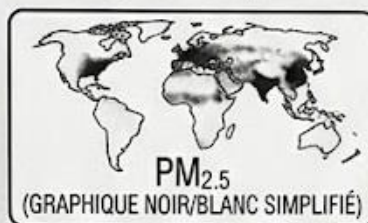
par l'atmosphère et la surface terrestre dans les bandes UV, visible, proche infrarouge et infrarouge à ondes courtes, permettant la restitution de gaz tels que le NO_2 , le SO_2 , l' O_3 , le CO , le CH_4 et le HCHO [7]. Plusieurs études ont ainsi démontré l'intérêt de Sentinel-5P pour quantifier les tendances à court terme des polluants et leurs variations spatiales dans diverses régions du monde, soulignant son rôle dans l'amélioration des évaluations de la qualité de l'air là où les données au sol sont rares ou inégalement réparties [8]. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif est d'évaluer la pollution atmosphérique dans le nord-est algérien à travers l'exploitation des données du satellite Sentinel-5P/TROPOMI. Cette région, encore peu couverte par des réseaux de mesure denses et fiables, représente un terrain d'étude particulièrement pertinent pour tester le potentiel de la télédétection satellitaire dans la caractérisation spatiale et temporelle des polluants atmosphériques.

CHAPITRE 1 POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

SOURCES (ORIGINES)



CONCENTRATION & RÉPARTITION (GLOBAL)



CONTEXTE Sentinel-5P



IMPACTS (EFFETS)



SANTÉ HUMAINE
(SYSTÈME RESPIRATOIRE
CONCEPTUEL)



ÉCOSYSTÈMES
(ARBRE DÉPÉRI
CONCEPTUEL)



CLIMAT
(FLUX RADIA
Conceptuel)

**MESURE ET
SURVEILLANCE**

CHAPITRE 4 & 5

1 Définition de la pollution atmosphérique :

De manière générale, la pollution atmosphérique se définit comme étant toute modification de l'atmosphère ambiante apparaissant sous trois formes, soit gazeuse par la présence de gaz nouveaux ou par l'augmentation de concentration de certains gaz, soit solide par la présence de poussières en suspension de taille plus ou moins grande, soit plus rarement liquide cause par les aérosols ou le brouillard. L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (O.C.D.E) définit la pollution atmosphérique comme « l'introduction par l'homme directe ou indirecte de substances ou d'énergie dans l'atmosphère qui entraîne des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux systèmes écologiques, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement ». En Algérie, les pouvoirs publics ont défini la pollution atmosphérique, à travers l'article 44 de la Loi N° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, comme suit : Constitue une pollution atmosphérique au sens de la présente loi, l'introduction, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances de nature à : - mettre en danger la santé humaine - influencer sur les changements climatiques ou appauvrir la couche d'ozone - nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes - compromettre la sécurité publique - incommoder la population - provoquer des nuisances olfactives - nuire à la production agricole et aux produits agro-alimentaires - altérer les constructions et porter atteinte au caractère des sites - détériorer les biens matériels[9] .



Figure 01: La pollution atmosphérique

2. Les gaz polluants (NO₂, SO₂, O₃, CO), particules fines (PM_{2.5}, PM₁₀) :

La pollution de l'air désigne la présence, dans l'atmosphère, de substances telles que des gaz polluants ou des particules fines, qu'elles soient d'origine naturelle ou liées aux activités humaines. Lorsque leur concentration devient élevée, ces éléments peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine, l'environnement ainsi que sur les constructions.[10] Parmi les substances les plus surveillées figurent plusieurs gaz polluants, tels que le NO₂, le SO₂, l'O₃ et le CO, ainsi que les particules fines, notamment les PM_{2,5} et les PM₁₀. [11]

2.1 Principaux gaz polluants : NO₂, SO₂, O₃, CO

2.1.1 NO₂ (dioxyde d'azote) : gaz principalement produit par le trafic routier et les processus de combustion. Il peut favoriser l'apparition d'infections respiratoires et aggraver l'asthme, en particulier chez les enfants[12]

2.1.2 SO₂ (dioxyde de soufre) : gaz libéré lors de la combustion de combustibles riches en soufre, comme le charbon et le fioul. Il peut provoquer des troubles respiratoires et accroître la résistance des voies aériennes, même chez des personnes en bonne santé.[13]

2.1.3 O₃ (ozone troposphérique) : polluant secondaire généré dans l'atmosphère à la suite de réactions photochimiques. Il peut atteindre les zones profondes des poumons, entraîner une inflammation des tissus respiratoires, accentuer les crises d'asthme et de BPCO, et augmenter le nombre d'hospitalisations liées à ces affections

2.1.4 CO (monoxyde de carbone) : gaz invisible produit lors d'une combustion incomplète. Une exposition, qu'elle soit brève ou prolongée, est associée à une augmentation

2.2 Particules fines PM_{2.5} et PM₁₀ :

2.2.1 PM₁₀ : particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 10 µm, capables d'être inhalées par les voies respiratoires.[14]

2.2.2 PM_{2,5} : particules en suspension dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 µm, généralement qualifiées de particules fines.[15]

3. Les sources de la pollution atmosphérique :

La pollution de l'air provient de diverses activités et phénomènes qui libèrent des gaz nocifs ainsi que des particules dans l'atmosphère. Les études scientifiques font généralement la distinction entre les sources naturelles et celles liées aux activités humaines (dites anthropiques). Elles différencient également les polluants primaires, émis directement dans l'air, des polluants secondaires qui se forment à la suite de réactions chimiques dans l'atmosphère.[16] Les sources naturelles de pollution atmosphérique incluent des phénomènes tels que les éruptions

volcaniques, les tempêtes de poussière, les embruns marins, les incendies de forêt, ainsi que la décomposition de la matière organique. À cela s'ajoutent la foudre et les émissions biologiques provenant des végétaux. L'ensemble de ces processus libère dans l'atmosphère différents gaz, comme les composés soufrés, les oxydes d'azote et le méthane, ainsi que des particules.[17] . Les particules d'origine naturelle comprennent des éléments comme la poussière minérale issue de la croûte terrestre, les sels marins, les grains de pollen, les spores fongiques et divers débris biologiques.[18] .Les sources d'origine anthropique sont généralement classées en plusieurs secteurs principaux.[19] .La production d'énergie et les activités industrielles — notamment la combustion des combustibles fossiles dans les centrales électriques, les usines, les raffineries, ainsi que les industries du ciment et de la métallurgie — émettent des polluants tels que les particules en suspension (PM), le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les métaux lourds et les gaz à effet de serre.[18]

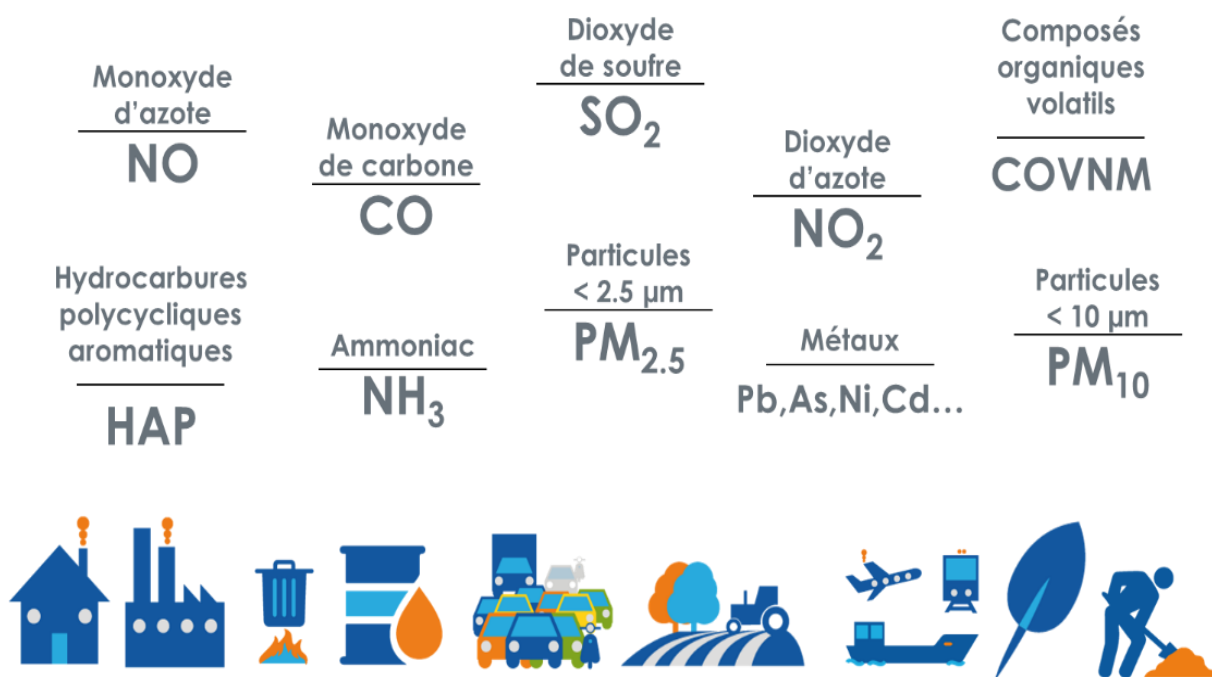


Figure 02: Les sources de pollution de l'air

4. Activités industrielles et de production d'énergie :

Les principales sources fixes comprennent les centrales électriques, les raffineries de pétrole, ainsi que les usines de fabrication de ciment, d'acier, de produits chimiques, d'engrais, de papier, de caoutchouc, de textiles et de métaux.[18] . Les principaux polluants atmosphériques comprennent les particules en suspension (PM10 et PM2,5), le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les métaux lourds, les polluants organiques persistants, ainsi que les gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄)[20] . Les générateurs industriels et les chaudières, en particulier ceux fonctionnant au fioul lourd ou au charbon, augmentent fortement les émissions de fumées et de particules en suspension.[18] . Les sources mobiles de transport comprennent la circulation routière—voitures, camions, bus et motos—ainsi que le transport ferroviaire, maritime et aérien, qui constituent d'importantes sources d'émissions.[21] . Les véhicules émettent des polluants tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV), les particules en suspension (PM), le carbone noir et le dioxyde de carbone (CO₂). Dans de nombreux milieux urbains, les voitures sont considérées comme responsables d'une part importante de la pollution de l'air.[17] . L'agriculture et l'élevage génèrent des émissions liées à l'utilisation d'engrais, à l'élevage des animaux, à la gestion du fumier, au brûlage des résidus de culture, à la préparation des sols, aux opérations de récolte, au traitement des grains, ainsi qu'à l'utilisation des machines agricoles.[22] . Les principaux polluants atmosphériques comprennent l'ammoniac (NH₃), le méthane (CH₄), les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV), les particules en suspension (PM10 et PM2,5), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), ainsi que les polluants organiques persistants.[23] . L'agriculture constitue une source importante d'ammoniac (NH₃), qui réagit dans l'atmosphère pour former des particules secondaires telles que le nitrate et le sulfate d'ammonium, pouvant représenter une part dominante de la pollution particulaire dans certaines régions.[23] . D'autres sources importantes comprennent la combustion domestique (cuisson et chauffage), le brûlage des déchets et les décharges, les incendies de forêts et de tourbières, les tempêtes de poussière, ainsi que les émissions naturelles d'origine volcanique, qui contribuent fortement à la pollution de l'air.[24]

5. Effets de la pollution sur la santé publique et l'environnement

La pollution atmosphérique ambiante est considérée comme l'un des principaux facteurs de risque pour la santé à l'échelle mondiale. En 2015, l'exposition aux particules fines (PM2.5) aurait été responsable d'environ 4,2 millions de décès et de plus de 100 millions d'années de vie ajustées sur l'incapacité (DALYs) dans le monde.[25]. Selon les estimations de l'Organisation mondiale de la

Santé, la pollution de l'air provoquerait environ 7 millions de décès par an lorsqu'on considère l'ensemble des expositions environnementales.[20]

6. Maladies respiratoires et cardiovasculaires

Une exposition de courte durée à la pollution de l'air entraîne une hausse des consultations aux urgences, des hospitalisations et des décès liés aux affections respiratoires et cardiovasculaires. De plus, chaque augmentation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ est associée à une élévation d'environ 1,5 à 2 % de la mortalité respiratoire. [26] .Une exposition prolongée à la pollution de l'air est liée à des maladies respiratoires et cardiovasculaires chroniques, telles que la BPCO, l'apparition et l'aggravation de l'asthme, le cancer du poumon, les accidents vasculaires cérébraux, les cardiopathies ischémiques, l'insuffisance cardiaque et les troubles du rythme cardiaque. [17] . Aucun seuil sûr n'a été clairement établi pour les $\text{PM}_{2,5}$, car des risques pour la santé subsistent même à des niveaux inférieurs aux normes actuelles. [25] .La pollution atmosphérique est associée à divers effets sanitaires extra pulmonaires, notamment le diabète, l'hypertension artérielle, les troubles neurologiques et mentaux, des issues défavorables de la grossesse, ainsi qu'une augmentation de la mortalité périnatale et infantile. [27] . Les enfants, les personnes âgées, les femmes enceintes et les individus atteints de maladies chroniques constituent des groupes particulièrement vulnérables aux effets néfastes [27]

7. Polluants et mécanismes

Les principaux polluants atmosphériques comprennent les particules en suspension ($\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10}), l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils ainsi que les métaux lourds. [28] . Les mécanismes en jeu incluent le stress oxydatif, l'inflammation systémique, une altération de la fonction endothéliale, un déséquilibre du système nerveux autonome ainsi que des états pro-thrombotiques, contribuant ainsi aux atteintes cardiovasculaires et multi-organiques.[29]

8.1 Effets de la pollution sur l'environnement.

Les gaz contenant du soufre et de l'azote réagissent dans l'atmosphère pour former des acides, tels que l'acide nitrique et l'acide sulfurique, qui retombent sous forme de pluies acides. Ce phénomène entraîne une acidification des sols et des eaux, affectant les organismes aquatiques, les arbres et les cultures, tout en provoquant la dégradation des bâtiments et des monuments[30] . Les particules fines diffusent la lumière dans l'atmosphère, provoquant la formation de brume et une diminution de la visibilité, ce qui altère la qualité des paysages naturels et des environnements urbains.[30] .

Certains polluants contribuent à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, entraînant une augmentation du rayonnement ultraviolet nocif, ce qui nuit aux cultures et à la végétation naturelle.[30] ;Les gaz à effet de serre ainsi que l'ozone troposphérique participent au changement

climatique, en modifiant les températures mondiales, en accélérant la fonte des glaces, en provoquant l'élévation du niveau de la mer et en perturbant la répartition des espèces et des maladies.[31] ; Les aérosols et le carbone noir modifient la manière dont l'atmosphère absorbe et réfléchit la lumière solaire, ce qui influence les températures et les régimes météorologiques.[31] ; La pollution de l'air entraîne la dégradation des bâtiments, des sculptures et du patrimoine culturel, notamment sous l'effet des dépôts acides et des particules en suspension.[32] ; Le smog et les mauvaises odeurs dégradent la qualité de vie et réduisent la valeur esthétique des villes ainsi que des espaces naturels.[33]

8.2 Effets sur les écosystèmes et la biodiversité

Dans les écosystèmes terrestres, l'ozone, ainsi que les dépôts d'azote et de soufre et les particules, peuvent réduire la photosynthèse, modifier la composition des sols et entraîner des changements dans les communautés végétales des prairies, des forêts, des landes et des milieux méditerranéens[34] ; La pollution particulaire dépose des métaux traces toxiques dans les sols et les plantes, leur permettant d'entrer dans les chaînes alimentaires et de nuire aux arbres urbains, aux cultures agricoles et aux forêts naturelles[16]

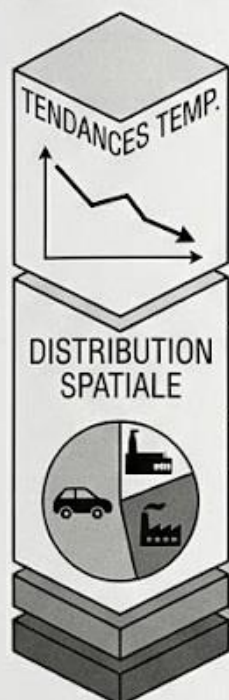
9. Echelle mondiale et interactions

Les polluants atmosphériques peuvent se déplacer sur de longues distances, affectant des régions éloignées de leurs sources d'émission et interagissant avec le changement climatique, les incendies et l'utilisation des terres, ce qui crée des rétroactions accentuant le stress sur les écosystèmes [35]

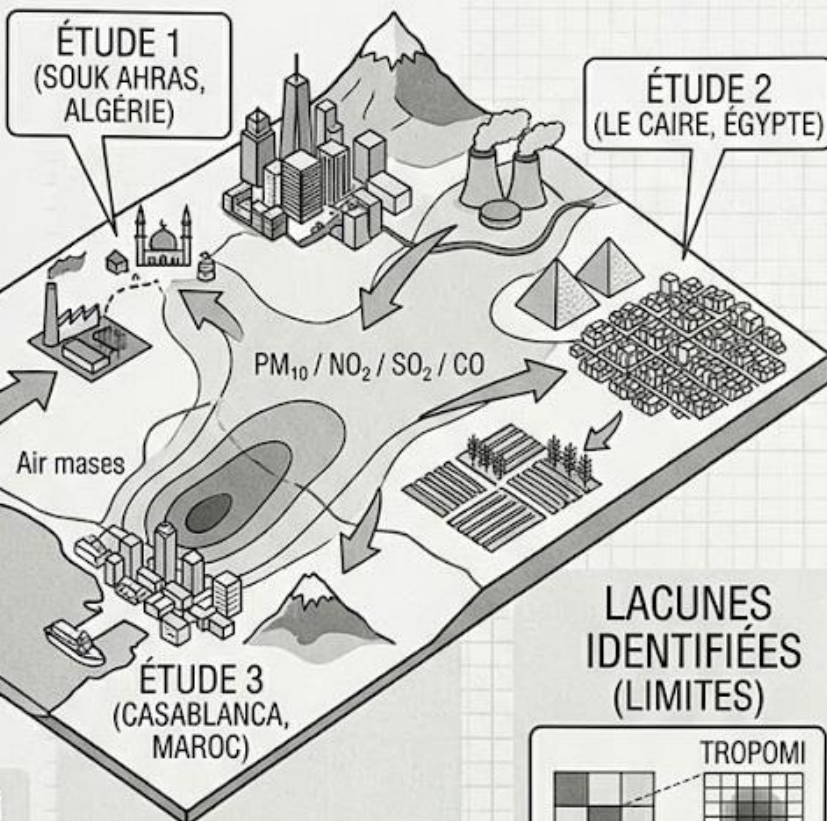
CHAPITRE 2

ÉTUDES PRÉCÉDENTES DANS DES ZONES SIMILAIRES

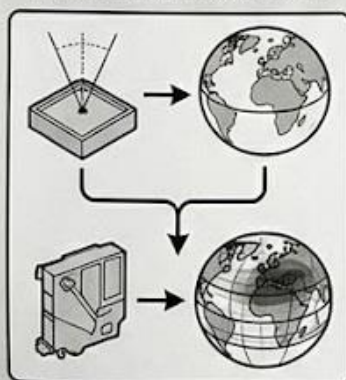
SYNTHÈSE
DES DONNÉES



ZONES SIMILAIRES

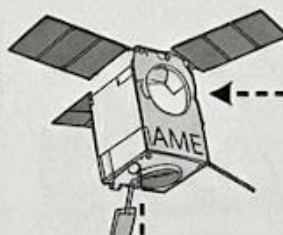
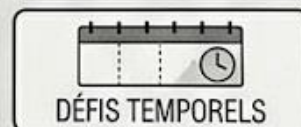
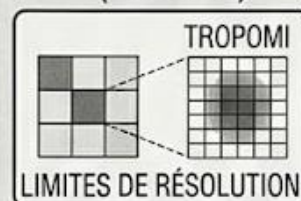


INSTRUMENTATION
ET MODÉLISATION



VALIDATION CROISÉE
CONCEPTUELLE

LACUNES
IDENTIFIÉES
(LIMITES)



LEÇONS POUR
SENTINEL-5P

DÉFINITION DES OBJECTIFS
DU CHAP. 3 & 4

À Algiers, des recherches menées sur des sites urbains et en bord de route ont analysé les particules PM_{10} , $PM_{2.5}$ et PM_{10} ainsi que les métaux lourds qui y sont associés. Les résultats indiquent que le trafic routier et les apports de poussières sahariennes constituent les principales sources, avec des concentrations parfois élevées de plomb dans les particules.[36] . Les études de modélisation montrent que les niveaux de PM_{10} et de NO_2 dépassent souvent les normes, en particulier dans les zones industrielles.[37] ; À Annaba, l'indice de qualité de l'air (IQA), basé sur les poussières, l' O_3 , le NO_2 et le SO_2 , est utilisé pour évaluer et classer l'impact des activités industrielles sur la qualité de l'air.[38] . En Afrique du Nord et au Moyen-Orient, la pollution de l'air figure parmi les principaux facteurs responsables de la perte d'années de vie en bonne santé. L'essentiel de ce fardeau est attribué aux particules fines ($PM_{2.5}$), qui touchent surtout les systèmes cardiovasculaire et respiratoire et entraînent une réduction de l'espérance de vie.[39]

2.1. la surveillance et solutions à faible coût

En Algeria, le nombre de stations de surveillance de la qualité de l'air est réduit et plusieurs ne fonctionnent pas de manière continue. Cela limite l'élaboration des politiques publiques ainsi que la recherche scientifique, et reflète un problème plus large en Africa, où les réseaux de suivi restent peu développés et souvent temporaires. [40] ; Des capteurs à faible coût sont envisagés comme une solution évolutive, et des projets pilotes sont déjà en cours en Algérie ainsi que dans plusieurs pays africains. [40]

2.2. Recherche sur la pollution de l'air à l'échelle mondiale et régionale

À l'échelle mondiale, environ 7,3 milliards de personnes sont exposées à des niveaux dangereux de $PM_{2.5}$. Parmi elles, près de 716 millions appartenant aux populations les plus défavorisées vivent dans des zones fortement polluées, en particulier en Afrique subsaharienne. [41] . Les tendances mondiales montrent que près de la moitié de la population mondiale est confrontée à une aggravation de la pollution de l'air. Les principales zones critiques incluent Asie centrale et Asie du Sud, l'Afrique subsaharienne, ainsi que l'Asie occidentale et l'Afrique du Nord, où les concentrations de $PM_{2.5}$ en milieu rural dépassent largement les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé [42] .

En Afrique du Nord et au Moyen-Orient, la pollution de l'air constitue l'un des principaux facteurs de risque pour la santé. Les particules fines représentent la part la plus importante de la charge de morbidité et, si elles ne sont pas réduites efficacement, elles pourraient diminuer l'espérance de vie moyenne d'environ 1,6 an. [39] . Les revues de littérature montrent que, bien que les preuves restent encore limitées, elles sont de plus en plus nombreuses concernant le lien entre la pollution de l'air en Afrique du Nord (y compris en Algérie) et des effets sanitaires tels que les maladies cardiovasculaires et respiratoires, l'asthme et les naissances prématurées.[43]

Des études géo-épidémiologiques estiment que plus de 130 000 à 290 000 décès attribuables aux $PM_{2.5}$ surviennent dans les pays africains francophones, y compris en Algérie[44] .

À l'échelle mondiale, la fumée issue des feux de paysage est associée à environ 1,75 million de décès par an, la charge la plus importante étant observée dans les pays à revenu faible et intermédiaire.[45]

2.3. Comparaison des résultats en Algérie

La combinaison des émissions liées au trafic, des activités industrielles et des poussières désertiques entraîne des niveaux persistants de particules dépassant les normes de l'OMS, un schéma fréquemment observé dans les pays d'Afrique du Nord et dans d'autres régions africaines.[43]

Comme dans d'autres régions, les données sur les effets directs sur la santé existent mais restent limitées ; les études soulignent la nécessité de renforcer la surveillance, d'améliorer les modèles et de mettre en place une réglementation ainsi qu'une application plus efficaces en Algérie et dans la région.[43] . Le satellite Sentinel-5P (Sentinel-5 Precursor), conçu par European Space Agency, a été mis en place pour assurer la continuité des observations atmosphériques entre la fin de la mission ENVISAT et le lancement prévu de Sentinel-5. Il embarque un seul instrument scientifique, le capteur TROPOMI, qui est un spectromètre imageur à visée nadir. Cet instrument mesure le rayonnement électromagnétique sur une large gamme de longueurs d'onde, allant de l'ultraviolet (UV) (270–320 nm) à l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) (2305–2385 nm), afin de surveiller la pollution atmosphérique[46]

2.4. Principaux domaines d'application :

2.4.1 Surveillance et cartographie de la qualité de l'air :

Cette application permet de suivre et de représenter la distribution de polluants tels que le NO₂, l'O₃, le CO, le SO₂, le CH₄, le HCHO ainsi que les aérosols et les particules fines (PM), à différentes échelles allant de la ville au niveau national. Elle s'appuie fréquemment sur des plateformes comme Google Earth Engine et des outils de systèmes d'information géographique (SIG) pour analyser et visualiser les données.[46] ; Permet d'identifier les zones vulnérables dans les régions à forte densité de population et de développer des indicateurs intégrés de la pollution de l'air.[6] ; Analyse des tendances à long terme et saisonnières sur plusieurs années dans différents pays, notamment l'Arabie saoudite, la France, la Croatie et la Pologne.[47]

2.4.2 Intégration avec les modèles, les données de terrain et les outils :

2.4.2.1 Validation et fusion des données : de nombreuses études ont comparé les observations de Sentinel-5P avec des stations de mesure au sol, mettant en évidence des corrélations modérées à fortes, et ont utilisé ces données pour améliorer les estimations des concentrations de surface ainsi que les modèles de réanalyse atmosphérique.[6]

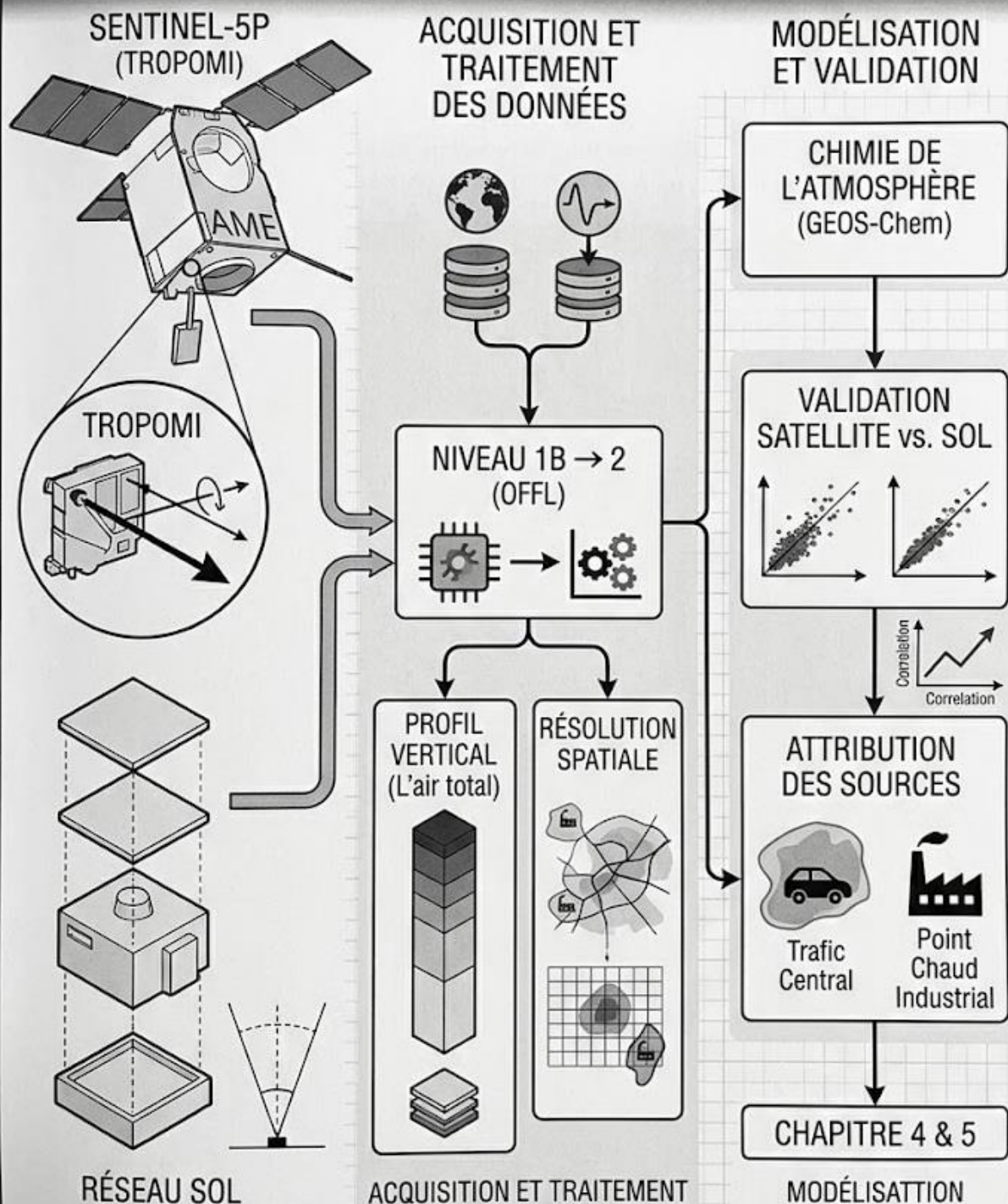
2.4.2.2 Modélisation de la qualité de l'air : les données de NO₂ issues de Sentinel-5P sont utilisées pour évaluer et ajuster des modèles régionaux tels que CAMS, ainsi que pour améliorer les algorithmes de restitution, notamment avec des produits mis à jour comme la version 2.2 du NO₂. [48]

2.4.2.3 Plateformes cloud : Google Earth Engine est largement utilisé pour la cartographie automatisée à grande échelle des séries temporelles et le développement d'applications destinées aux utilisateurs. [49]

2.4.3 Politiques, santé et aide à la prise de décision :

Les données de Sentinel-5P constituent un support fondamental pour les ensembles de données sur la qualité de l'air utilisés dans les recherches en santé publique et en épidémiologie, en particulier en France et en Roumanie. [47] . L'amélioration de la qualité de l'air est évaluée sur le plan économique et contribue à orienter les politiques publiques, notamment à travers des études menées au Brésil et des revues à l'échelle mondiale [50]. Le suivi réglementaire des émissions maritimes permet d'identifier les zones portuaires fortement polluées et de repérer les principaux points chauds de pollution. [51]

MATÉRIEL ET MÉTHODES



Matériels et Méthodes

Zone d'étude

L'étude a été conduite dans le Nord-Est de l'Algérie, couvrant les wilayas de Annaba, Guelma, Souk Ahras et El Tarf. Cette région présente un gradient bioclimatique méditerranéen allant du semi-aride au humide, combiné à une forte pression anthropique (activités industrielles, trafic routier et agriculture intensive).

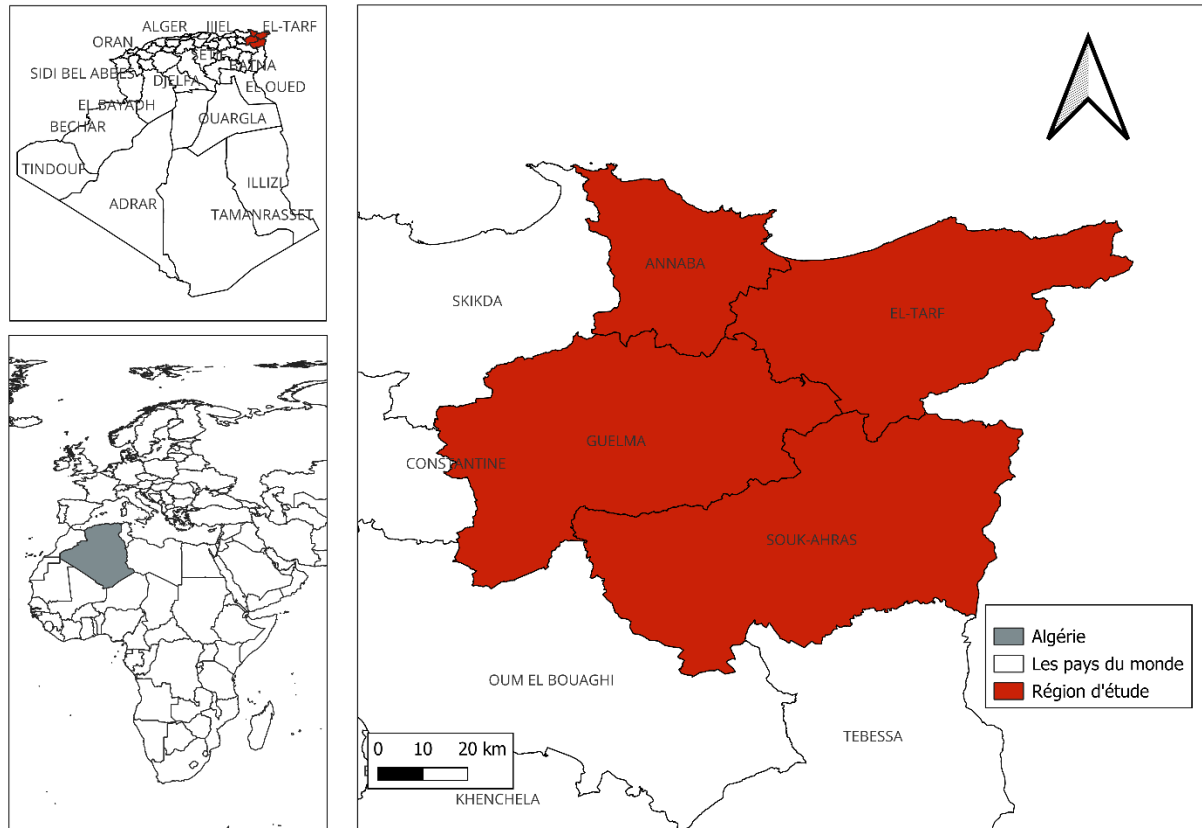


Figure03 : Localisation de la zone d'étude dans le Nord-Est de l'Algérie (Annaba, El Tarf, Guelma et Souk Ahras)

Données satellitaires

Les données atmosphériques ont été obtenues à partir du satellite Sentinel-5P, équipé du capteur TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), qui fournit des observations quotidiennes des gaz traces à l'échelle globale avec une résolution spatiale fine (~1 km après agrégation). Les produits de niveau 3 (L3), accessibles via la plateforme Google Earth Engine, ont été utilisés sur la période 2019–2025. Ces produits sont issus du retraitement des observations TROPOMI et sont adaptés aux analyses environnementales régionales [7]

Les polluants atmosphériques sélectionnés ainsi que leurs variables associées sont présentés dans le tableau suivant ci-dessous.

Tableau 01 : Polluants atmosphériques étudiés et variables Sentinel-5P (Google Earth Engine)

Polluant	Variable GEE	Description
NO ₂	NO2_column_number_density	Densité de colonne troposphérique
O ₃	O3_column_number_density	Densité de colonne
CO	CO_column_number_density	Densité de colonne
SO ₂	SO2_column_number_density	Densité de colonne
CH ₄	CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air	Rapport de mélange en air sec
HCHO	Tropospheric HCHO_column_number_density	Densité de colonne troposphérique

Approche méthodologique

L'approche adoptée repose sur l'exploitation de séries temporelles satellitaires pour caractériser la dynamique spatio-temporelle des polluants atmosphériques. L'utilisation des données TROPOMI permet une couverture homogène et continue, particulièrement adaptée aux analyses environnementales à l'échelle régionale (**Figure 04**).

Traitement des données

Les traitements ont été réalisés dans l'environnement JavaScript de Google Earth Engine à l'aide de scripts automatisés. Pour chaque polluant, les collections d'images ont été filtrées annuellement entre le 1er janvier et le 31 décembre. Des composites annuels ont été générés par calcul de la moyenne pixel par pixel), une approche largement utilisée pour réduire la variabilité journalière et améliorer la robustesse des estimations atmosphériques [52]. Les images ont ensuite été découpées selon l'emprise de la zone d'étude. Les cartes résultantes ont été exportées au format GeoTIFF avec une résolution spatiale de 1000 m. Une analyse statistique zonale a été réalisée afin d'extraire les concentrations moyennes annuelles de chaque polluant. Pour cela, la fonction `reduceRegion` avec le réducteur a été appliquée sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les données de méthane issues du satellite Sentinel-5P ont été filtrées sur la période 2020–2024 et restreintes à la zone d'étude afin de calculer des moyennes mensuelles. Une série temporelle a ensuite été générée pour analyser la dynamique du CH₄, incluant le calcul d'une moyenne globale, des anomalies (écarts à la moyenne) et l'identification des anomalies positives. Enfin, une analyse de tendance basée sur le coefficient de corrélation de Kendall a été appliquée pour détecter les évolutions temporelles du méthane, et les résultats ont été visualisés sous forme de cartes et de graphiques, avec export des anomalies positives pour une exploitation ultérieure.

Figure 1. Schéma méthodologique de l'étude.

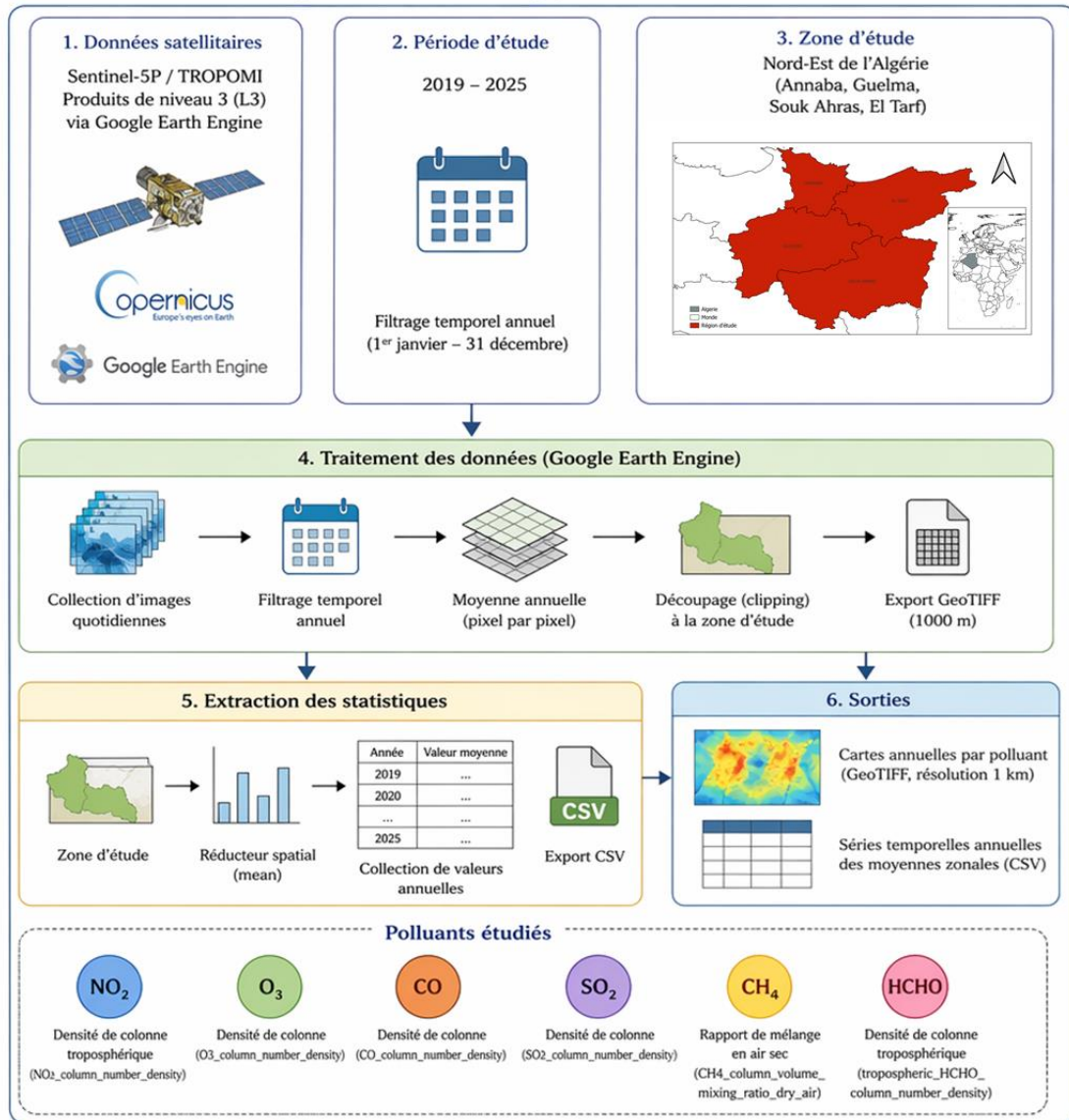


Figure 04 : Schéma méthodologique de l'analyse spatio-temporelle des polluants atmosphériques à partir des données Sentinel-5P (2019–2025)

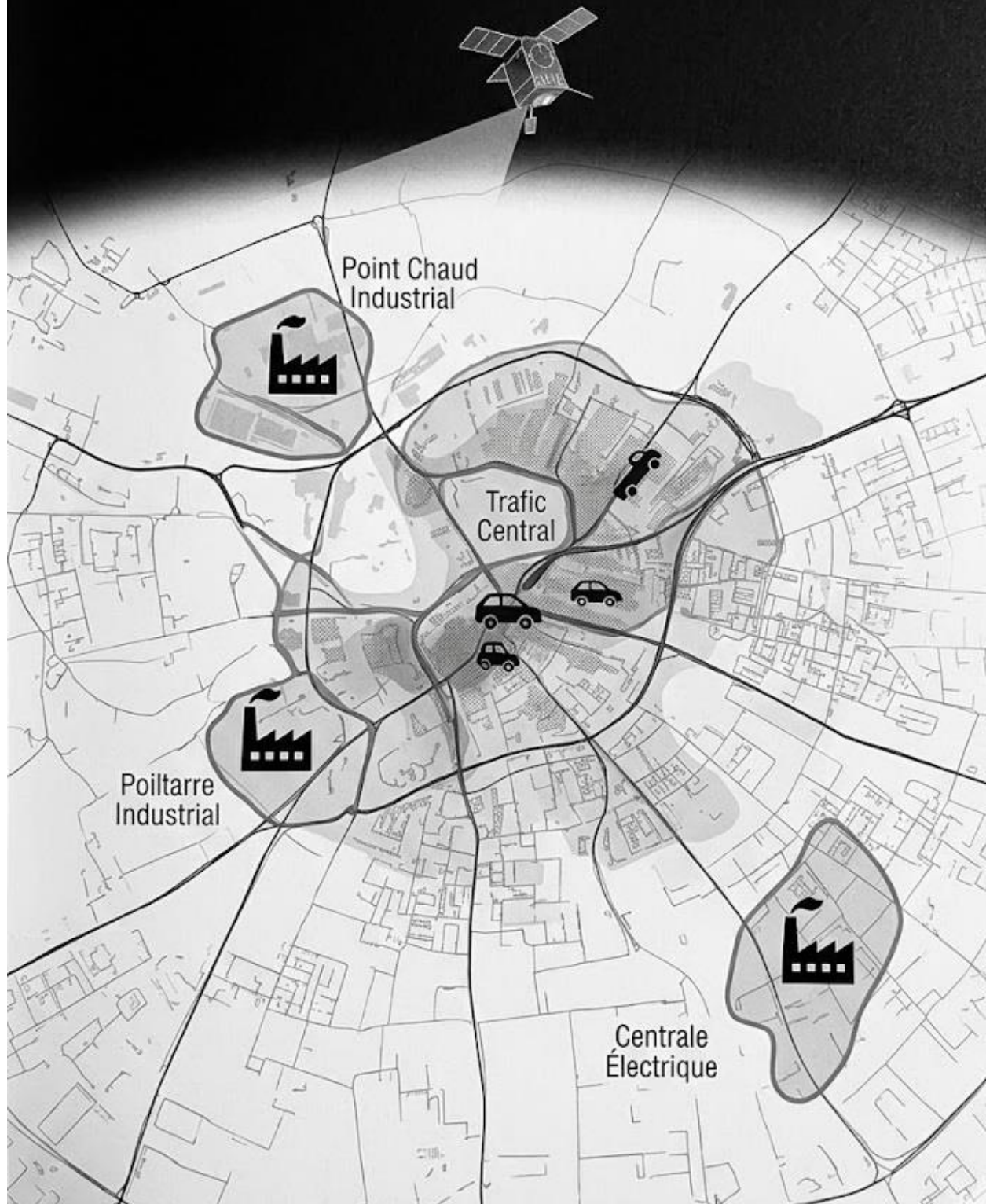
Analyses statistiques

Dans un premier temps, une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée à l'aide du package FactoMineR [53]. afin d'explorer la structure multivariée des données atmosphériques et d'identifier les principales sources de variabilité entre polluants (NO₂, O₃, CO, SO₂ et HCHO). Les variables ont été centrées et réduites avant l'analyse afin d'assurer leur comparabilité. L'interprétation des axes principaux s'est appuyée sur les contributions des variables et la projection des individus dans l'espace factoriel [54]. Dans un second temps, des analyses de variance (ANOVA à un facteur), ont été réalisées afin de tester l'existence de différences

significatives des concentrations moyennes des polluants entre les groupes étudiés (par exemple : années ou zones).

Lorsque l'ANOVA révélait un effet significatif ($p < 0,05$), un test post-hoc de Tukey HSD a été appliqué afin d'identifier les différences significatives entre paires de groupes. Ces analyses ont été conduites séparément pour chaque polluant (SO_2 , CO, NO_2 , O_3 et HCHO). Les conditions d'application de l'ANOVA, notamment la normalité des résidus et l'homogénéité des variances, ont été vérifiées préalablement. L'ensemble des analyses a été interprété avec un seuil de significativité fixé à $\alpha = 0,05$. Les analyses statistiques ont été réalisées sous l'environnement R (version 4.2.2).

CHAPITRE 4: RÉSULTATS



Résultats

Les concentrations montrent une variabilité spatiale entre les wilayas. Le CO est légèrement plus élevé à Annaba et diminue vers Souk Ahras. Le NO₂ suit une tendance similaire avec des valeurs maximales à Annaba et minimales à Souk Ahras. L'O₃ reste globalement homogène entre les sites. Le HCHO et le SO₂ présentent des différences très faibles, indiquant une distribution relativement uniforme à l'échelle régionale (Tableau 02).

Tableau 02. Statistiques descriptives (moyenne $\pm$ écart-type) des polluants atmosphériques par wilaya dans le Nord-Est algérien

Polluant	Wilaya	Mean $\pm$ SD (Mol/m ²)
CO	ANNABA	0.0326 $\pm$ 0.00119
	ELTARF	0.0312 $\pm$ 0.00111
	GUELMA	0.0295 $\pm$ 0.00102
	Souk ahras	0.0285 $\pm$ 0.00100
HCHO	ANNABA	0.000101 $\pm$ 0.0000041
	ELTARF	0.000101 $\pm$ 0.0000031
	GUELMA	0.000108 $\pm$ 0.0000042
	Souk ahras	0.000096 $\pm$ 0.0000056
NO ₂	ANNABA	0.000083 $\pm$ 0.0000033
	ELTARF	0.000074 $\pm$ 0.0000028
	GUELMA	0.000078 $\pm$ 0.0000029
	Souk ahras	0.000069 $\pm$ 0.0000024
O ₃	ANNABA	0.1410 $\pm$ 0.00241
	ELTARF	0.1410 $\pm$ 0.00242
	GUELMA	0.1400 $\pm$ 0.00234
	Souk ahras	0.1400 $\pm$ 0.00227
SO ₂	ANNABA	0.000161 $\pm$ 0.0000513
	ELTARF	0.000169 $\pm$ 0.0000553
	GUELMA	0.000155 $\pm$ 0.0000536
	Souk ahras	0.000153 $\pm$ 0.0000572

La concentration en monoxyde de carbone (CO) (Figure 05) atteint son niveau le plus élevé à Annaba (0,0326 mol/m²), ce qui reflète l'intensité des activités industrielles et du trafic urbain dans cette wilaya. Une tendance décroissante est observée en allant vers l'intérieur, avec des valeurs minimales à Souk Ahras (0,0285 mol/m²).

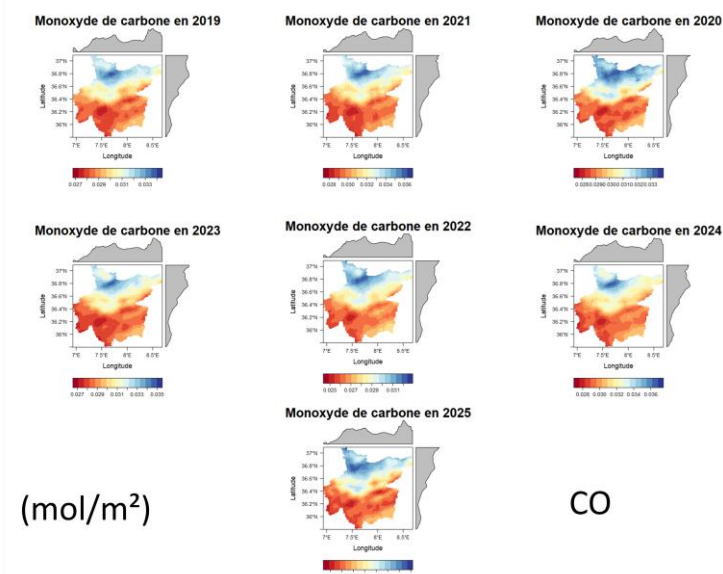


Figure 05. Distribution spatiale du monoxyde de carbone dans le Nord-Est algérien

Le formaldéhyde (HCHO) présente une concentration légèrement plus élevée à Guelma (0,000108 mol/m²) par rapport aux autres wilayas. Les valeurs les plus basses sont enregistrées à Souk Ahras (0,000096 mol/m²), bien que les différences restent très faibles à l'échelle régionale. La distribution globalement uniforme (Figure 06).

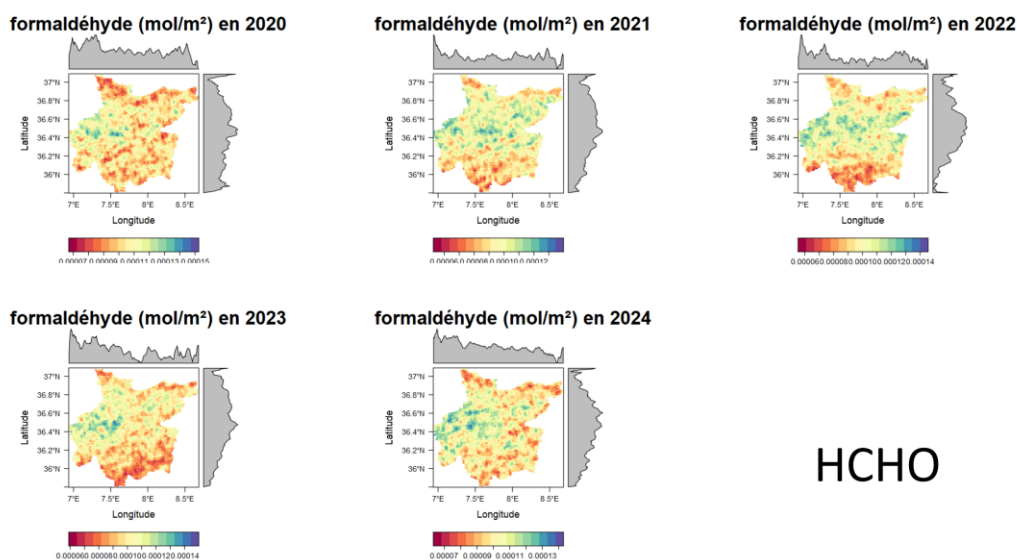


Figure 06. Répartition du formaldéhyde dans le nord est algérien

Le dioxyde d'azote présente sa concentration maximale à Annaba (0,000083 mol/m²), ce qui est cohérent avec la présence de zones industrielles et d'un trafic routier dense. Les valeurs diminuent progressivement vers Souk Ahras (0,000069 mol/m²). La variabilité inter-wilaya est modérée et suit un gradient géographique est-ouest bien marqué (Figure 07).

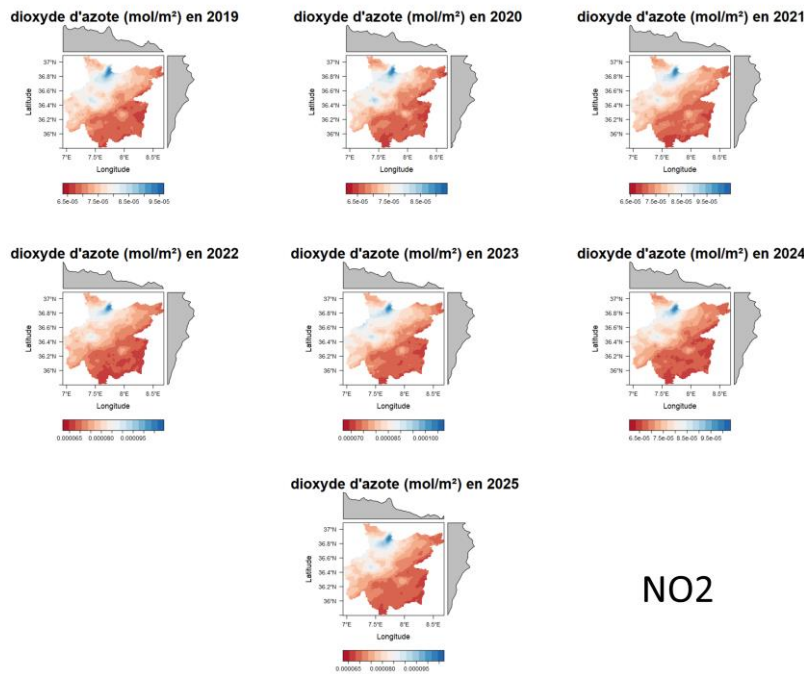
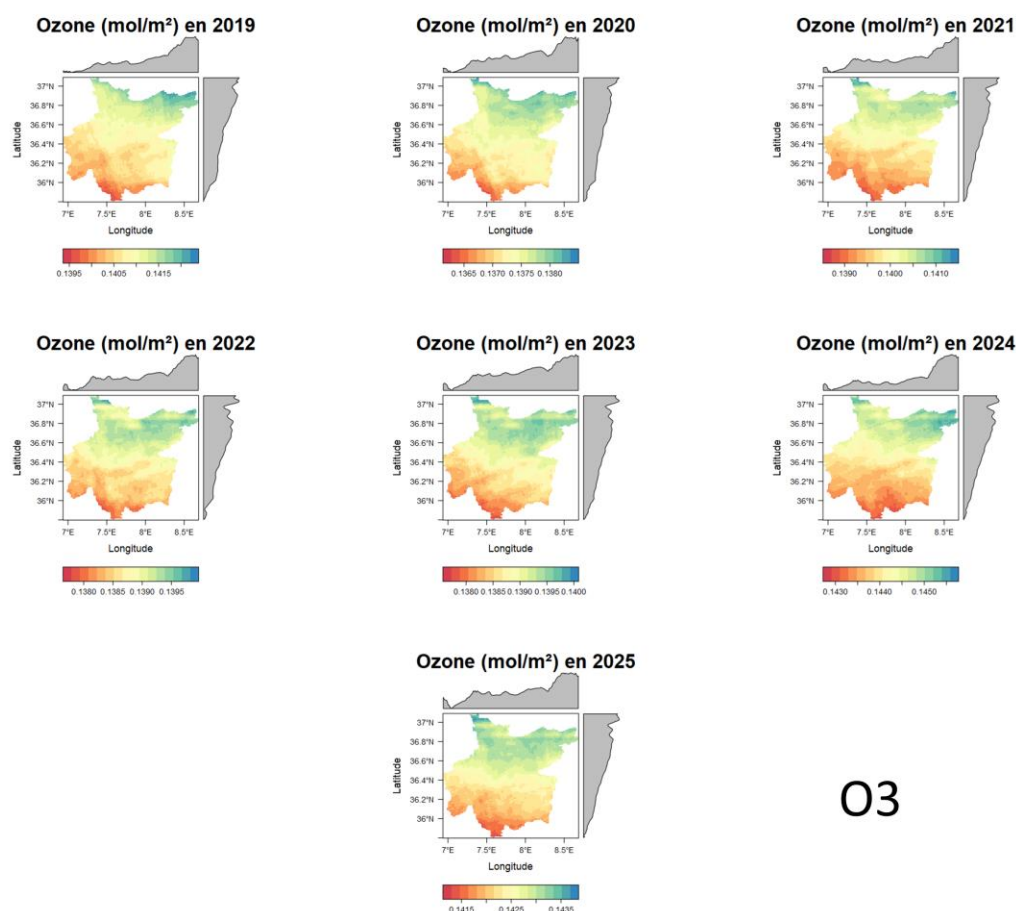


Figure 07. Gradient spatial du dioxyde d'azote dans le nord est algérien

L'ozone troposphérique affiche une distribution remarquablement homogène sur l'ensemble de la région, avec des valeurs quasi identiques entre Annaba et El-Tarf (0,1410 mol/m²) et Guelma et Souk Ahras (0,1400 mol/m²). Les faibles écarts-types indiquent également une stabilité temporelle de ce polluant dans la zone étudiée (Figure 08).

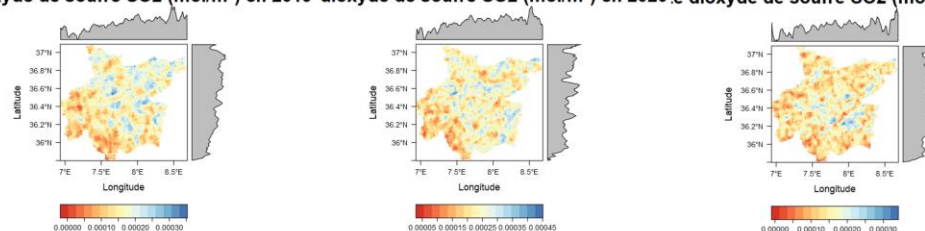


03

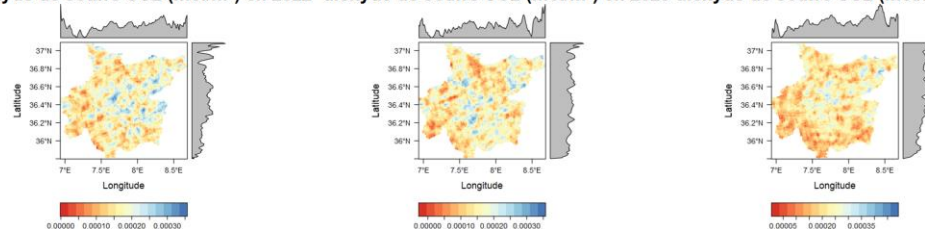
Figure 08. Distribution spatiale de l'ozone troposphérique à l'échelle régionale du nord est algérien

Le dioxyde de soufre présente une particularité notable : ses concentrations les plus élevées se trouvent à El-Tarf (0,000169 mol/m³) et non à Annaba. Les valeurs les plus faibles sont observées à Souk Ahras (0,000153 mol/m³), avec une variabilité spatiale très limitée entre les quatre wilayas. Les écarts-types relativement élevés indiquent toutefois une certaine irrégularité temporelle des émissions de SO₂ dans la région (Figure 09).

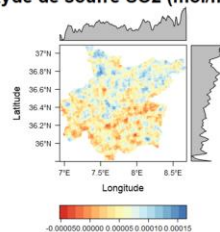
dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 2019 dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 2020 e dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 202



dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 2022 dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 2023 dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 2024



dioxyde de soufre SO₂ (mol/m³) en 2025



SO₂

Figure 09. Distribution du dioxyde de soufre à l'échelle régionale du nord est algérien

Ce graphique (Figure 10) présente l'évolution des concentrations de méthane atmosphérique de janvier 2020 à décembre 2023, exprimées en parties par milliard. Une tendance linéaire verte révèle une augmentation continue des niveaux de CH₄, passant d'environ 1 875 ppb à près de 1 905 ppb sur la période observée. La courbe bleue met en évidence une variabilité saisonnière marquée, caractérisée par des minima hivernaux et des maxima atteints en fin d'année. Les pics saisonniers deviennent progressivement plus élevés d'année en année, confirmant la croissance soutenue des concentrations.

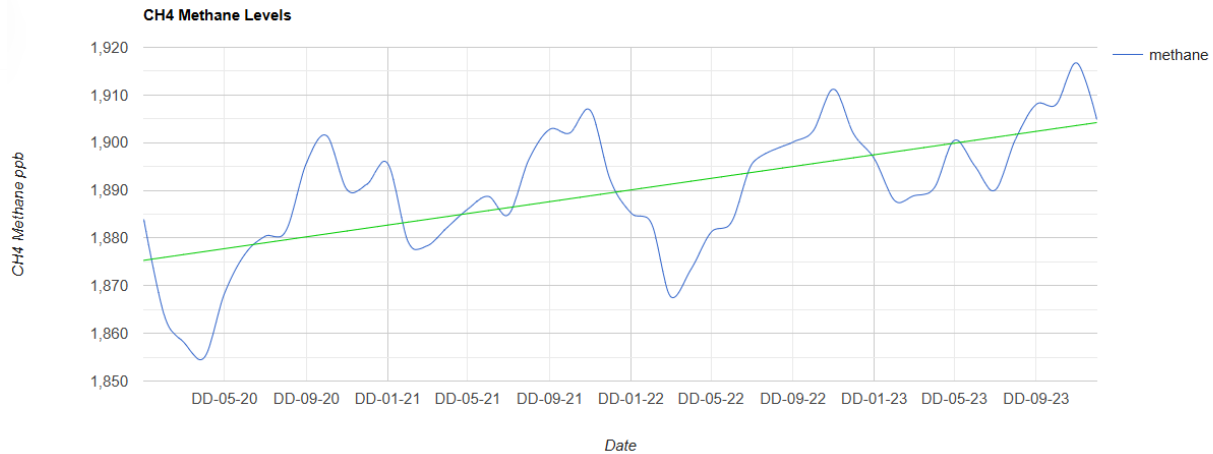


Figure 10. Évolution mensuelle des concentrations de méthane atmosphérique (CH₄) et tendance linéaire, 2020-2023

Le graphique ci-dessous (Figure 11) illustre les anomalies de méthane par rapport à une moyenne de référence sur la même période. En 2020, les anomalies sont majoritairement négatives, atteignant parfois -30 ppb, ce qui traduit des concentrations inférieures à la normale historique. À partir de 2021, les écarts s'inversent et deviennent de plus en plus positifs, avec des valeurs dépassant +20 ppb à la fin de l'année 2023. Cette accélération des anomalies positives, confirmée par la pente croissante de la tendance verte, indique que les niveaux actuels de méthane s'éloignent désormais significativement par le haut de la tendance historique.

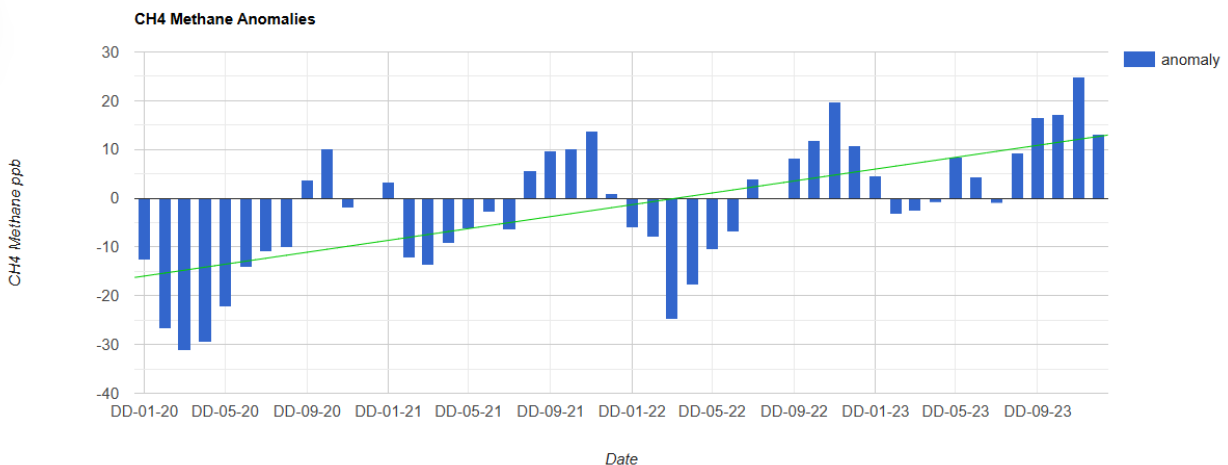


Figure 11. Anomalies mensuelles des concentrations de méthane atmosphérique (CH₄) par rapport à la moyenne de référence, 2020-2024

L'analyse en composantes principales (**Figure 12**) explique 63 % de la variance totale (Dim1 : 36,9 % ; Dim2 : 26,1 %), indiquant une structure multivariée robuste au sein des données de pollution atmosphérique. Le premier axe oppose les polluants d'origine photochimique et combustion (CO, NO₂, O₃, HCHO) aux émissions soufrées (SO₂), reflétant deux régimes d'émission distincts à l'échelle régionale. L'analyse par année révèle une évolution temporelle significative, avec une dispersion progressive des observations de 2019 à 2025, suggérant une dynamique interannuelle croissante des concentrations en polluants. Par wilaya, Annaba se distingue nettement des autres sites par sa forte association avec CO, NO₂ et O₃, confirmant l'empreinte anthropique marquée de cette wilaya industrialo-urbaine, tandis que Souk Ahras s'en dissocie, traduisant un profil de pollution plus atténué en milieu semi-rural.

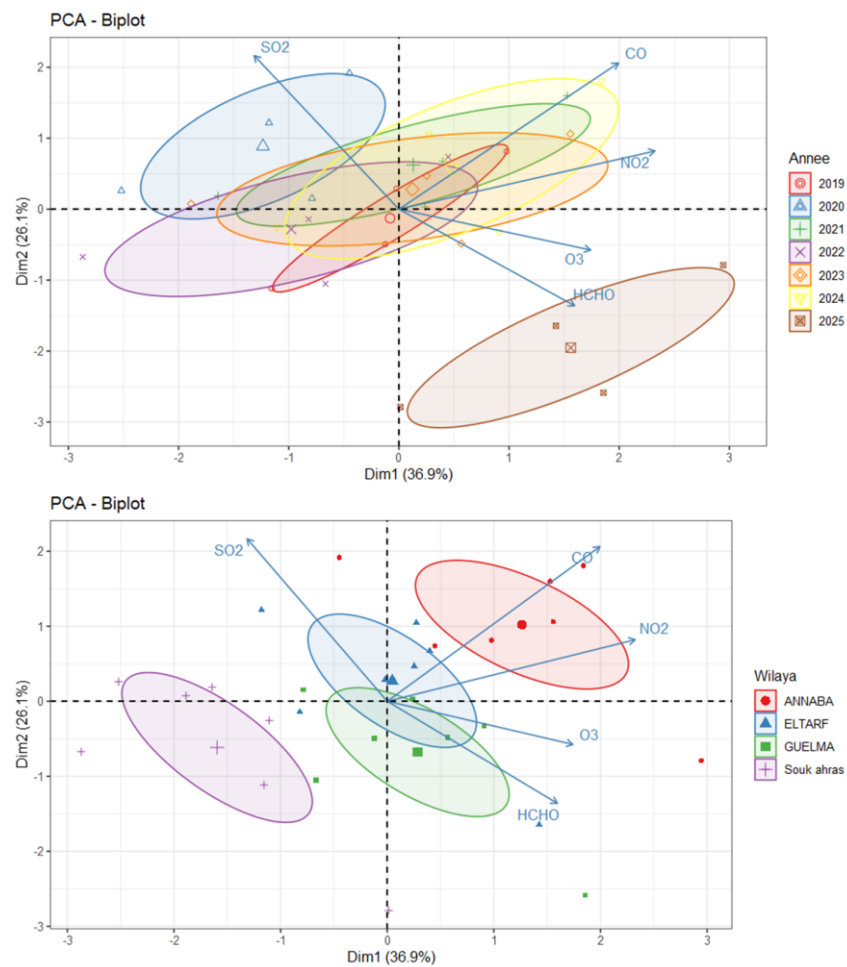


Figure 12. Biplots ACP des polluants atmosphériques (CO, NO₂, O₃, HCHO, SO₂) dans le Nord-Est algérien selon l'année d'observation (a) et la wilaya (b)

L'ANOVA révèle des différences inter-wilayas hautement significatives pour le CO ($p < 0.001$), le NO₂ ($p < 0.001$) et le HCHO ($p = 0,00155$), avec des moyennes systématiquement plus élevées à Annaba. L'O₃ et le SO₂ ne présentent pas de différences spatiales significatives entre les quatre wilayas. Sur le plan temporel, l'ANOVA indique une variation interannuelle significative uniquement pour l'O₃ et le SO₂ ($p < 0,001$), l'O₃ affichant une tendance décroissante après 2020 et le SO₂ une hausse notable en 2025. Le CO, le HCHO et le NO₂ ne montrent pas de variation temporelle significative ($p > 0,05$), reflétant une stabilité de leurs niveaux de concentration sur la période 2019–2025 (Figure 13).

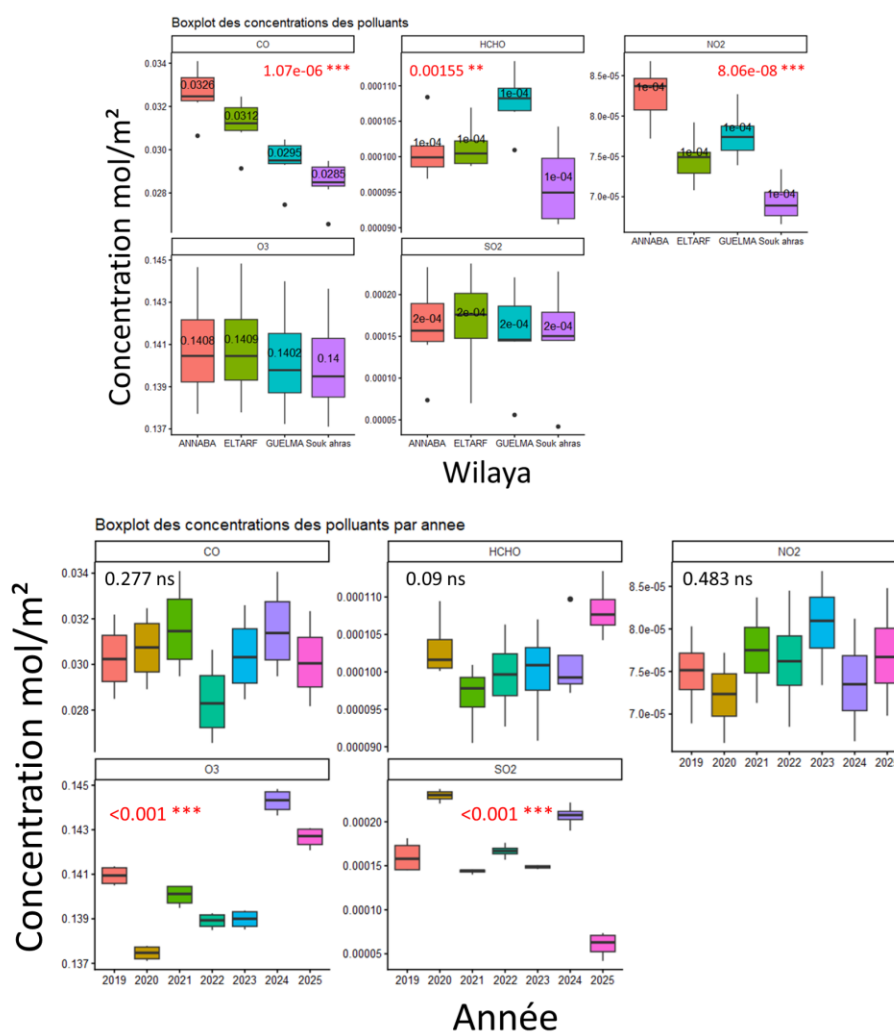


Figure 13. Boxplots des concentrations atmosphériques (CO, HCHO, NO₂, O₃, SO₂) selon la wilaya (a) et l'année (b) dans le Nord-Est algérien ; les p-values indiquent les résultats des tests de comparaison inter-groupes (ANOVA; ns : non significatif, ** p < 0,01, *** p < 0,001).

Le test de Tukey (Tableau 03) révèle que pour le CO, Annaba se distingue significativement de Guelma et Souk Ahras (p < 0,001), tandis qu'aucune différence significative n'est détectée entre Souk Ahras et Guelma (p = 0,339), suggérant un regroupement de ces deux wilayas à faibles concentrations. Pour le NO₂, Annaba présente des concentrations significativement supérieures à toutes les autres wilayas, et Souk Ahras se différencie également de Guelma (p < 0,001), indiquant un gradient de pollution décroissant d'Annaba vers l'intérieur des terres. Le HCHO ne montre aucune différence significative entre la majorité des paires de wilayas, à l'exception du couple Souk Ahras–Guelma (p = 0,0007), tandis que l'O₃ et le SO₂ ne présentent pas de différences inter-wilayas significatives.

Tableau 03. Résultats du test de Tukey HSD : comparaisons par paires des concentrations de polluants entre les wilayas

Polluant	Wilaya	P-Value (Adjusted)	Sig
CO	ELTARF-ANNABA	0.0943	Ns
	GUELMA-ANNABA	0.0001	***
	Souk Ahras-ANNABA	<0.001	***
	GUELMA-ELTARF	0.0327	*
	Souk Ahras-ELTARF	0.0005	***
	Souk Ahras-GUELMA	0.3387	Ns
NO ₂	ELTARF-ANNABA	0.0001	***
	GUELMA-ANNABA	0.0141	*
	Souk Ahras-ANNABA	<0.001	***
	GUELMA-ELTARF	0.2181	Ns
	Souk Ahras-ELTARF	0.0116	*
	Souk Ahras-GUELMA	0.0001	***
HCHO	ELTARF-ANNABA	0.9981	Ns
	GUELMA-ANNABA	0.0542	Ns
	Souk Ahras-ANNABA	0.2441	Ns
	GUELMA-ELTARF	0.0766	Ns
	Souk Ahras-ELTARF	0.1832	Ns
	Souk Ahras-GUELMA	0.0007	***
O ₃	Non Significatif		

SO₂	
-----------------------	--

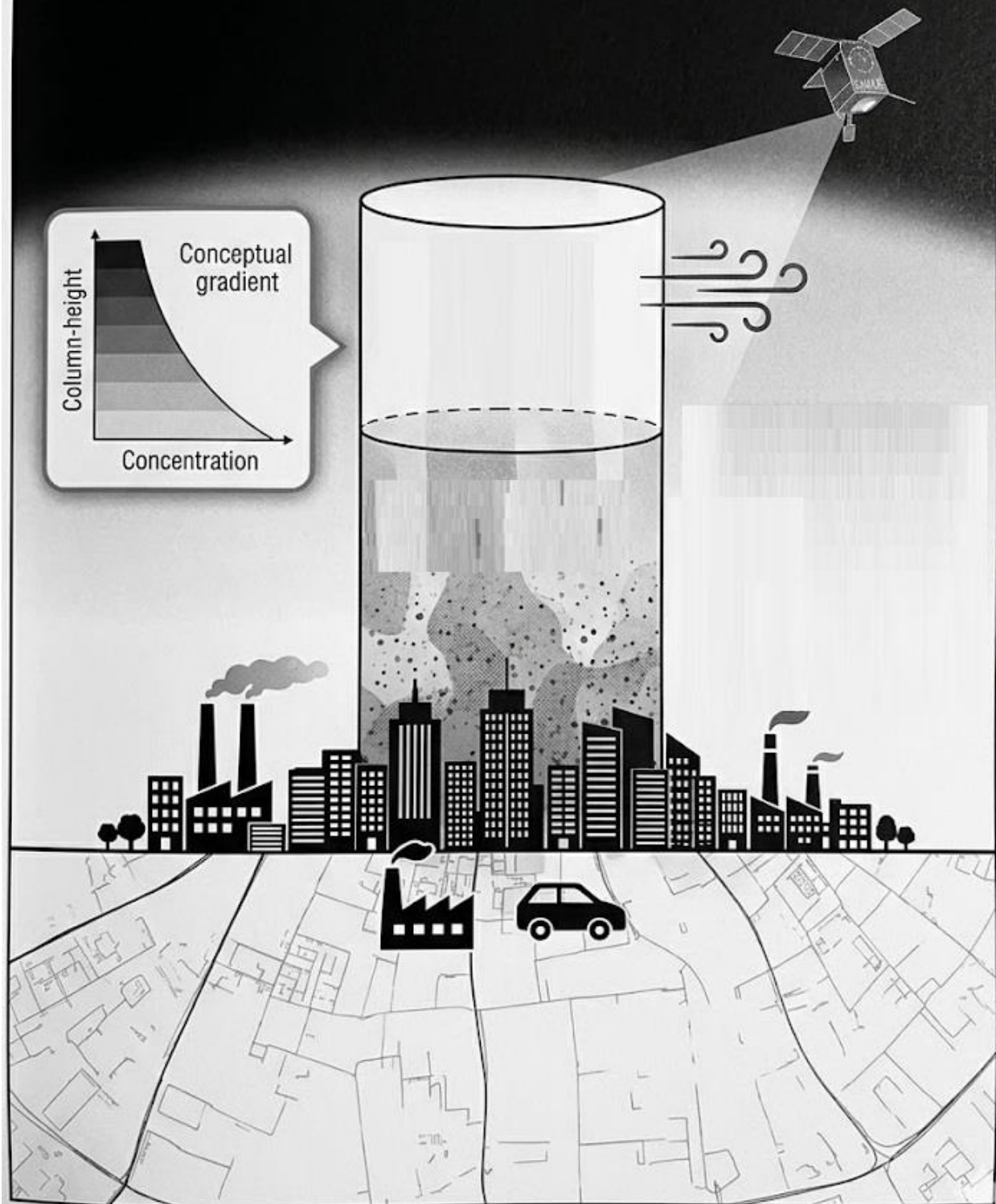
Le test de Tukey met en évidence une variabilité interannuelle significative pour l'O₃ et le SO₂. Pour l'O₃, 2020 se distingue significativement des autres années ($p < 0,001$), tandis qu'aucune différence n'est observée entre 2022 et 2023 ($p = 0,99$). Concernant le SO₂, les années 2020 et 2025 apparaissent comme les plus atypiques ($p < 0,001$). En revanche, le CO, le NO₂ et le HCHO ne présentent aucune différence interannuelle significative, indiquant une relative stabilité de leurs concentrations entre 2019 et 2025 (Tableau 04).

Tableau 04. Résultats du test de Tukey HSD : comparaisons par paires des concentrations de polluants entre les années (2019–2025)

Polluant	Comparaison	P-Value	Sig	Polluant	P-Value	
O3	2020-2019	<0.001	***	SO2	<0.001	***
	2021-2019	0.1177	***		0.3311	ns
	2022-2019	<0.001	***		0.98416	ns
	2023-2019	6.5E-05	***		0.7045	ns
	2024-2019	<0.001	***		0.00011	
	2025-2019	0.00039	***		<0.001	***
	2021-2020	<0.001	***		<0.001	***
	2022-2020	0.00266	***		<0.001	***
	2023-2020	0.00158	***		<0.001	***
	2024-2020	<0.001	***		0.08783	ns
	2025-2020	<0.001	***		<0.001	***
	2022-2021	0.02271	*		0.08405	ns
	2023-2021	0.03703	*		0.99421	ns
	2024-2021	<0.001	***		<0.001	
	2025-2021	<0.001	***		<0.001	***
	2023-2022	0.99999	ns		0.26826	ns
	2024-2022	<0.001	***		0.00063	***
	2025-2022	<0.001	***		<0.001	***
	2024-2023	<0.001	***		<0.001	***
	2025-2023	<0.001	***		<0.001	***
	2025-2024	0.00065	***		<0.001	***
CO	Non Significatif					

NO ₂	
HCHO	

CHAPITRE 5: DISCUSSION



Discussion

L'objectif de cette étude était d'évaluer la pollution atmosphérique dans le Nord-Est algérien à l'aide des données du capteur Sentinel-5P, en combinant analyses statistiques, cartographie spatiale et modélisation multivariée. Les résultats obtenus montrent une forte variabilité spatiale des polluants, une influence marquée des conditions météorologiques locales, et des tendances temporelles différenciées entre polluants primaires et secondaires. Ces résultats sont discutés à la lumière de la littérature existante sur la pollution atmosphérique en Méditerranée et en Afrique du Nord.

Distribution spatiale des polluants et influence anthropique

Les concentrations les plus élevées de CO, NO₂ et HCHO ont été observées à Annaba, suivies par El-Tarf, Guelma et Souk Ahras. Cette répartition confirme l'empreinte des activités industrielles et du trafic routier dense dans la wilaya d'Annaba, déjà documentée par plusieurs études antérieures. En effet, [55] ;[56] ont souligné que le complexe sidérurgique d'El-Hadjar et la zone industrielle de Sidi Amar constituent des sources majeures d'émission de NO₂, SO₂ et de poussières. De plus, l'étude de [57] a montré que la topographie en cuvette d'Annaba favorise la stagnation des polluants, renforçant ainsi les niveaux observés. L'analyse en composantes principales (ACP) oppose clairement les polluants de combustion (CO, NO₂, O₃, HCHO) au SO₂, indiquant l'existence de deux régimes d'émission distincts. Ce résultat est cohérent avec celui obtenu par [5] dans la même région, qui ont également observé une distinction nette entre les sources industrielles (SO₂) et les sources photochimiques (O₃). Par ailleurs, l'association forte entre Annaba et ces polluants confirme le caractère industrialo-urbain de cette wilaya, tandis que Souk Ahras s'en distingue nettement, traduisant un profil de pollution plus atténué de type semi-rural.

Comportement différencié des polluants primaires et secondaires

Les tests ANOVA et Tukey montrent que les concentrations de CO, NO₂ et HCHO diffèrent significativement entre wilayas ($p < 0,001$), tandis que celles d'O₃ et SO₂ ne présentent pas de différences spatiales significatives. L'homogénéité spatiale de l'O₃ s'explique par son caractère secondaire : formé à partir de précurseurs transportés sur de longues distances, il tend à s'uniformiser à l'échelle régionale. Ce résultat rejoint celui de [58] ; en Tunisie, où l'O₃ a augmenté

pendant le confinement de COVID-19 malgré la baisse des NO_x, en raison de la réduction de la titration par NO. Dans notre étude, l'augmentation de l'O₃ la nuit, associée à une baisse des NO_x, confirme ce mécanisme. En revanche, le SO₂, bien que non significativement différent entre wilayas, présente une variabilité temporelle marquée ($p < 0,001$), avec une hausse notable en 2025. Cette tendance pourrait être liée à une reprise d'activités industrielles après la pandémie, comme observé par [59] ; au Moyen-Orient. Par ailleurs, l'absence de différence spatiale pour le SO₂ suggère une influence régionale des émissions industrielles couvrant l'ensemble des quatre wilayas, probablement via le transport atmosphérique.

Les concentrations moyennes de NO₂ ($0,083 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2$) et de CO ($0,0326 \text{ mol/m}^2$) mesurées à Annaba dépassent largement les recommandations annuelles de l'OMS (respectivement $10 \mu\text{g/m}^3$ et 4 mg/m^3), traduisant une forte empreinte du trafic et des activités industrielles. De même, le SO₂ ($0,00016 \text{ mol/m}^2$) reste supérieur à la valeur guide de $40 \mu\text{g/m}^3$ sur 24 h, bien que les niveaux soient inférieurs aux pics historiques rapportés dans la région, tandis que l'O₃ ($0,141 \text{ mol/m}^2$) excède également le seuil de $100 \mu\text{g/m}^3$ sur 8 h, confirmant l'installation d'une pollution photochimique récurrente. Enfin, bien que l'OMS ne fixe pas de valeur limite pour le formaldéhyde (HCHO), la présence non négligeable de ce composé ($\approx 0,0001 \text{ mol/m}^2$) soulève des questions sur les risques sanitaires liés aux émissions de composés organiques volatils dans cette zone industrialo-urbaine.

Tendances temporelles et impact de la variabilité météorologique

L'analyse des séries temporelles montre une stabilité des niveaux de CO, NO₂ et HCHO entre 2019 et 2025, tandis que l'O₃ et le SO₂ présentent des variations interannuelles significatives. Cette différence reflète des régulations distinctes : les polluants primaires sont directement liés aux émissions locales, qui n'ont pas connu de changement majeur sur la période ; les polluants secondaires (O₃) et semi-primaires (SO₂) sont davantage influencés par les conditions météorologiques (ensoleillement, stabilité atmosphérique) et par des événements ponctuels (relance industrielle, confinement). La corrélation négative entre le NDVI et les concentrations de PM_{2,5} et SO₂, observée par [60] ; dans la région des Aurès, n'a pas été directement testée dans notre étude, mais elle suggère que la végétation pourrait jouer un rôle d'atténuation local. Dans notre zone d'étude, la relative absence de barrières végétales autour des zones industrielles pourrait expliquer la persistance des fortes concentrations.

Apports des données Sentinel-5P et limites de l'étude

L'utilisation des données Sentinel-5P a permis une cartographie fine des polluants (NO_2 , SO_2 , CO , O_3 , HCHO) avec une résolution spatiale de $7 \times 3,5$ km, couvrant l'ensemble des quatre wilayas. Cette approche a déjà été validée par [8] ; à Oran et par [61] ; en Tunisie. Cependant, notre étude présente certaines limites : (1) l'absence de mesures au sol pour valider les colonnes satellitaires, (2) la résolution encore insuffisante pour distinguer des sources ponctuelles (ex. usines individuelles), et (3) l'incapacité des capteurs à pénétrer les nuages, ce qui peut sous-estimer les concentrations en période humide.

Conclusion

En synthèse, les résultats obtenus confirment que la pollution atmosphérique dans le Nord-Est algérien est fortement influencée par les sources anthropiques locales (industrie, trafic) et par la dynamique des brises thermiques. La différenciation spatiale entre Annaba et Souk Ahras, l'augmentation nocturne des polluants, et la stabilité temporelle des primaires contrastant avec la variabilité des secondaires apportent des éléments nouveaux pour la compréhension de la qualité de l'air dans cette région. Ces résultats plaident pour la mise en place d'un réseau de surveillance intégré couplant données satellitaires et mesures au sol, ainsi que pour des stratégies de réduction des émissions ciblées selon le type de polluant et la saison.

Références

- [1] S. Benammar, « Contribution à l'étude des paramètres influençant la dispersion Atmosphérique des polluants émis par une centrale Energétique », p. 49, 2021 2020.
- [2] *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*, 1st ed. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [3] B. Brunekreef *et al.*, « Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM2.5, BC, NO2, and O3: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project », *Res. Rep.*, vol. 2021, n° 208, p. 1-127, sept. 2021.
- [4] S. ZEKAD, « Étude de l'Impact Sanitaire de la Pollution Atmosphérique (EIS-PA) dans la région d'Akbou (2012) ». 2012.
- [5] S. Dahech et A. Saihia, « Pollution atmosphérique et brise de mer à Annaba (Nord-Est de l'Algérie) : cas de l'ozone et du dioxyde de soufre », *Climatologie*, vol. 16, p. 1-22, 2019, doi: 10.4267/climatologie.1367.
- [6] M. A. Hassaan, S. M. Abdallah, E.-S. A. Shalaby, et A. A. Ibrahim, « Assessing vulnerability of densely populated areas to air pollution using Sentinel-5P imageries: a case study of the Nile Delta, Egypt », *Sci. Rep.*, vol. 13, n° 1, p. 17406, oct. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-44186-4.
- [7] J. P. Veefkind *et al.*, « TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications », *Remote Sens. Environ.*, vol. 120, p. 70-83, mai 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.09.027.
- [8] A. Bendib et M. L. Boutrid, « Using Sentinel-5P TROPOMI Data for Air Quality Assessment in the City of Oran, Western Algeria », *J. Indian Soc. Remote Sens.*, vol. 52, n° 10, p. 2235-2250, oct. 2024, doi: 10.1007/s12524-024-01951-w.
- [9] C. F. Hamdane Sebouai, « Comptabilisation des Gaz à effet de serre : Exemple d'un four pétrolier ». 2021 2020.
- [10] H. Fan, C. Zhao, Y. Yang, et X. Yang, « Spatio-Temporal Variations of the PM2.5/PM10 Ratios and Its Application to Air Pollution Type Classification in China », *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, p. 692440, juin 2021, doi: 10.3389/fenvs.2021.692440.
- [11] D. Jandacka et D. Durcanska, « Differentiation of Particulate Matter Sources Based on the Chemical Composition of PM10 in Functional Urban Areas ».

- [12] T.-M. Chen, W. G. Kuschner, J. Gokhale, et S. Shofer, « Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects », *Am. J. Med. Sci.*, vol. 333, n° 4, p. 249-256, avr. 2007, doi: 10.1097/MAJ.0b013e31803b900f.
- [13] P. Vongelis, N. G. Koulouris, P. Bakakos, et N. Rovina, « Air Pollution and Effects of Tropospheric Ozone (O₃) on Public Health », *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 22, n° 5, p. 709, avr. 2025, doi: 10.3390/ijerph22050709.
- [14] P. Thangavel, D. Park, et Y.-C. Lee, « Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview », *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 19, n° 12, p. 7511, juin 2022, doi: 10.3390/ijerph19127511.
- [15] J. C. Chow, « Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect », *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 56, n° 6, p. 707-708, juin 2006, doi: 10.1080/10473289.2006.10464484.
- [16] S. H. H. Al-Taai et W. A. M. al-Dulaimi, « Air Pollution: A Study of Its Concept, Causes, Sources and Effects ». 2022. doi: 10.3233/AJW220003.
- [17] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, et E. Bezirtzoglou, « Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review ».
- [18] M. Rabia, M. Zubair, A. Aziz, et M. N. Zafar, « Industrial Air Emission Pollution: Potential Sources and Sustainable Mitigation ». 2020.
- [19] F. Popescu et I. Ionel, « Anthropogenic air pollution sources ». 2010.
- [20] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, et E. Bezirtzoglou, « Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review ». 2020.
- [21] A. Ghorani-Azam, B. Riahi-Zanjani, et M. Balali-Mood, « Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran », 2016.
- [22] P. Ge, M. Chen, Y. Cui, et D. Nie, « The Research Progress of the Influence of Agricultural Activities on Atmospheric Environment in Recent Ten Years: A Review », 2021.
- [23] S. E. Bauer¹, K. Tsigaridis, et R. Miller, « Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation ». 2016.
- [24] O. B. Okedere, F. B. Elehinafe, S. Oyelami, et A. O. Ayeni, « rivers of anthropogenic air emissions in Nigeria- A review », 2021.
- [25] A. J Cohen *et al.*, « Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 », 2017.
- [26] ubiratan de P. Santos *et al.*, « Poluição do ar ambiental: efeitos respiratórios », 2020.

- [27] Faculty of Public Health, University of Medicine and Pharmacy at Ho Chi Minh City (UMP), 217 Hong Bang Street, Ward 11, District 5, Ho Chi Minh City, Vietnam *et al.*, « Environmental and health impacts of air pollution: A mini-review », *Minist. Sci. Technol. Vietnam*, vol. 66, n° 1, p. 120-128, mars 2024, doi: 10.31276/VJSTE.66(1).120-128.
- [28] H. A. Shahriyari *et al.*, « Air pollution and human health risks: mechanisms and clinical manifestations of cardiovascular and respiratory diseases », *Toxin Rev.*, vol. 41, n° 2, p. 606-617, avr. 2022, doi: 10.1080/15569543.2021.1887261.
- [29] A. M. Lederer *et al.*, « Cardiovascular effects of air pollution: current evidence from animal and human studies », *Am. J. Physiol.-Heart Circ. Physiol.*, vol. 320, n° 4, p. H1417-H1439, avr. 2021, doi: 10.1152/ajpheart.00706.2020.
- [30] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, et E. Bezirtzoglou, « Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review », *Front. Public Health*, vol. 8, p. 14, févr. 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [31] H. Akimoto, « Global Air Quality and Pollution », 2003. doi: 10.1126/science.1092666.
- [32] E. Jiménez, F. J. Tapiador, et F. J. Sáez-Martínez, « Atmospheric pollutants in a changing environment: key issues in reactivity and monitoring, global warming, and health ».
- [33] Muh. F. Buraerah, B. Patandjengi, S. Suryani, A. Hamzah, et E. B. Demmalino, « The effect of vegetation in reducing air pollution in an urban environment: A review », 2023.
- [34] C. J. Stevens *et al.*, « The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation », 2020.
- [35] G. Singh, R. Jakhar, R. Raj, et P. Sachar, « A Comprehensive Study on Impacts of Air Pollution on Environment and Human Health ».
- [36] A. Talbi, Y. Kerchich, R. Kerbach, et M. Boughedaoui, « Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria », *Environ. Pollut.*, vol. 232, p. 252-263, janv. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2017.09.041.
- [37] D. Belhout, R. Kerbach, H. Relvas, et A. I. Miranda, « Air quality assessment in Algiers city », *Air Qual. Atmosphere Health*, vol. 11, n° 8, p. 897-906, oct. 2018, doi: 10.1007/s11869-018-0589-x.
- [38] S. Badjoudj, *et al.*, « ASSESSMENT OF AIR QUALITY INDEX IN ANNABA ».
- [39] M. Abbasi-Kangevar *et al.*, « Effect of air pollution on disease burden, mortality, and life expectancy in North Africa and the Middle East: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 ».

- [40] farid raha, « Low-cost sensors, an interesting alternative for air quality monitoring in Africa », 2020.
- [41] J. Rentschler et N. Leonova, « Global air pollution exposure and poverty ».
- [42] « Half the world's population are exposed to increasing air pollution ». 2020.
- [43] I. Sekmoudi *et al.*, « A Review on Climate, Air Pollution, and Health in North Africa ».
- [44] L. Capitanio, S. Ratte, S. Gautier, et L. Josseran, « Impact of air pollution on mortality: Geo-epidemiological study in French-speaking Africa », 2024.
- [45] X. Rongbin, Y. Tingting, H. Wenzhong, X. Yue, M. Lidia, et J. A. Michae, « Global, regional, and national mortality burden attributable to air pollution from landscape fires ».
- [46] N. Vitoratos, E. Salamalekis, N. Dalamaga, D. Kassanos, et G. Creatsas, « Defective antioxidant mechanisms via changes in serum ceruloplasmin and total iron binding capacity of serum in women with pre-eclampsia », *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.*, vol. 84, n° 1, p. 63-67, mai 1999, doi: 10.1016/s0301-2115(98)00261-9.
- [47] H. Omrani, B. Omrani, B. Parmentier, et M. Helbich, « Spatio-temporal data on the air pollutant nitrogen dioxide derived from Sentinel satellite for France », *Data Brief*, vol. 28, p. 105089, févr. 2020, doi: 10.1016/j.dib.2019.105089.
- [48] J. Douros *et al.*, « Comparing Sentinel-5P TROPOMI NO₂ column observations with the CAMS regional air quality ensemble », *Geosci. Model Dev.*, vol. 16, n° 2, p. 509-534, janv. 2023, doi: 10.5194/gmd-16-509-2023.
- [49] H. Mohamed, A. Hassan, et A. Elhag, « A five-year Study Using Sentinel-5P Data Observing Seasonal Dynamics and Long-term Trends of Atmospheric Pollutants », *Int. J. Eng. Geosci.*, vol. 10, n° 2, p. 262-271, juill. 2025, doi: 10.26833/ijeg.1587122.
- [50] A. Neckel *et al.*, « Geospatial applicability optics of the TROPOspheric monitoring instrument (TROPOMI) on a global scale: An overview », *Geosci. Front.*, vol. 16, n° 2, p. 102008, mars 2025, doi: 10.1016/j.gsf.2025.102008.
- [51] T. Batista, S. A. Jamal, et C. Isbaex, « Sentinel Data for Monitoring of Pollutant Emissions by Maritime Transport—A Literature Review », *Remote Sens.*, vol. 17, n° 13, p. 2202, juin 2025, doi: 10.3390/rs17132202.
- [52] P. F. Levelt *et al.*, « The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space », *Atmospheric Chem. Phys.*, vol. 18, n° 8, p. 5699-5745, avr. 2018, doi: 10.5194/acp-18-5699-2018.
- [53] S. Lê, J. Josse, et F. Husson, « **FactoMineR** : An R Package for Multivariate Analysis », *J. Stat. Softw.*, vol. 25, n° 1, 2008, doi: 10.18637/jss.v025.i01.

- [54] H. Abdi et L. J. Williams, « Principal component analysis », *WIREs Comput. Stat.*, vol. 2, n° 4, p. 433-459, juill. 2010, doi: 10.1002/wics.101.
- [55] M. Kharytonov, I. Klimkina, A. Benselhoub, A. Bouhedja, I. Abdelaziz, et A. Aissi, « Air pollution mapping in the Wilaya of Annaba (NE of Algeria) », *Min. Sci.*, 2016, doi: 10.5277/MS162315.
- [56] A. Benselhoub et A. I. Kanlı, « Environmental Impacts of Air Pollution on Human Health in Annaba Region (Northeast of Algeria) », in *Toxic Chemical and Biological Agents*, G. Sindona, J. H. Banoub, et M. L. Di Gioia, Éd., in NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. , Dordrecht: Springer Netherlands, 2020, p. 209-216. doi: 10.1007/978-94-024-2041-8_12.
- [57] S. Khedairia et M. T. Khadir, « Impact of clustered meteorological parameters on air pollutants concentrations in the region of Annaba, Algeria », *Atmospheric Res.*, vol. 113, p. 89-101, sept. 2012, doi: 10.1016/j.atmosres.2012.05.002.
- [58] H. Snoun, R. B. H. Salah, et A. Arif, « Integrated satellite and reanalysis assessment of primary and secondary pollutant dynamics in Tunisia during COVID-19 lockdown phases », *Discov. Atmosphere*, vol. 3, n° 1, p. 37, nov. 2025, doi: 10.1007/s44292-025-00064-4.
- [59] B. Halder *et al.*, « Wildfire-derived deforestation, climate, and biodiversity variables analysis in Cambodia », *Phys. Chem. Earth Parts ABC*, vol. 139, p. 103894, sept. 2025, doi: 10.1016/j.pce.2025.103894.
- [60] A. Benselhoub et A. I. Kanlı, « Environmental Impacts of Air Pollution on Human Health in Annaba Region (Northeast of Algeria) », in *Toxic Chemical and Biological Agents*, G. Sindona, J. H. Banoub, et M. L. Di Gioia, Éd., in NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. , Dordrecht: Springer Netherlands, 2020, p. 209-216. doi: 10.1007/978-94-024-2041-8_12.
- [61] H. Snoun, R. B. H. Salah, et A. Arif, « Integrated satellite and reanalysis assessment of primary and secondary pollutant dynamics in Tunisia during COVID-19 lockdown phases », *Discov. Atmosphere*, vol. 3, n° 1, p. 37, nov. 2025, doi: 10.1007/s44292-025-00064-4.