Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département de géographie et aménagement du territoire

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en :

Climatologie, Hydrologie et Territoire

Thème :

Contrôle de la qualité de l'air dans le milieu urbain au niveau de la commune d'Oran

Présenté par :

Dekhane Amani **Hamdane Djihene Maroua**

Soutenu devant le jury composé de :

Mme Mekakia Mokhtaria	**Présidente**	**Université d'Oran 2**
Mme Gourine Farida	**Examinatrice**	**Université d'Oran 2**
Mr Allal Nadir Elouassini	**Encadreur**	**Université d'Oran 2**
Mme Kharroubi Maha	**Co-encadreur**	**Université d'Oran 2**

Année universitaire : 2024/2025

بسم الله الرحمان الرحيم

﴿إِنَّمَا يَخْشَى اللَّهَ مِنْ عِبَادِهِ الْعُلَمَاءُ﴾

سورة فاطر، الآية 28

صدق الله العظيم

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

صدق الله العظيم

الحمد لله الذي يسّر البدايات، وأتمّ لنا النهايات، وبلّغنا الغايات.

الحمد لله الذي ما تمّ جهدٌ إلا بعونه، وما خُتم سعيٌ إلا بفضله، وما أُنجز عمل إلا بتوفيقه.

نحمده حُبًا وشكرًا، ونثني عليه ثناءً يليق بجلاله، على أن مَنّ علينا بهذا التوفيق، ووفقنا لإنجاز هذا العمل العلمي.

ولا يسعنا في ختام هذا الجهد، إلا أن نعبّر عن عميق امتناننا وخالص تقديرنا لكل من دعمنا ورافقنا في مسيرتنا البحثية.

وبوجه خاص، نتوجه بجزيل الشكر وعظيم التقدير إلى أستاذنا المشرف الدكتور علال نذير، الذي واكبنا بعناية وحرص، فكان مثالًا في الصبر والإخلاص، ولم يبخل علينا بتوجيهاته الرصينة ونصائحه العلمية السديدة، التي كان لها الأثر الكبير في إخراج هذا العمل إلى صورته النهائية.

كما نخصّ بالشكر والعرفان جامعة وهران 2 – قسم الجغرافيا وتهيئة الإقليم، هذا الصرح العلمي الذي كان لنا فيه الشرف أن ننهل من علمه خلال سنتي الماستر.

تحية تقدير وامتنان موصولة إلى كل الأساتذة الكرام الذين أشرفوا على تأطيرنا وتكويننا، وتركوا فينا بصمة لن تزول، علمًا وأخلاقًا. فلكم جميعًا، من القلب.

جزيل الشكر وصادق الدعاء

دخان اماني

"فرحين بما اتاهم الله من فضله"

إلى نفسي: التي مشت بثبات في دروب لم تكن سهلة، إلى تلك الروح التي تعثرت، لكنها نهضت...وحملت في قلبها يقينًا بأن معية الله تكفي. أهديكِ هذا الإنجاز، كنتِ الأولى في مسيرة الصبر والمثابرة.

إلى أبي: ساعد سليم يا من علمتني أن القوة لا تعني الصخب إلى أول من آمن بي حين شكّ الكثيرون إلى من لم يكن حاجزًا في طريقي، بل كان الدافع الأول، يردد في كل مرة: "إلى الأمام... إلى الأمام" عبارة بسيطة، لكنها كانت وقودي في كل لحظة ضعف. إلى من وقف أمام كل الصعاب كي أحقق حلمًا سكنني طويلًا... لك يا أبي، كل الامتنان، وكل ما في هذا الإنجاز من فخر، هو لك أولًا

الى أمي: وردة. يا من كنتِ السند حين مالت كتفي، يا من تفاخرتِ بي، وثقتِ بي، إليك يا أمي، يا امرأة عظيمة، علّمتني أن أثق بنفسي، وألا أخاف من الطريق طالما أن الدعاء يسبقني ... اسميتني اماني وقد كنتِ أماني في فوضى الأيام، وهذا الإنجاز... جزء صغير من امتنان كبير لا يُقال بالكلمات.

إلى عيليّ في هذه الدنيا: ضلعي الثابت محمد أكرم ' صغيرتي ميار كنتما النور في طريقي، والأمان حين كنت بعيدة، والحنان حين أعود. هذا الإنجاز لا يُهدى إلا إليكما... لأنكما الأجمل في رحلتي.

لذلك الثابت: أكرم الذي لم يتزحزح، لمن كان ظهري حين مالت الأرض، والقوة التي سكنت ضعفي... إلى من تقاسم معي الصمت والتعب ... له الامتنان الذي لا يُقال.

لكم عائلتي اهدي هذا النجاح.



حمدان جيهان مروى

﴿بسم الله الرحمن الرحيم﴾

الحمد لله اولا واخرا، ظاهرا وباطنا، على كل خطوة، على كل دمعة، على كل عثرة قادتني يوما للوقوف من جديد...

اهدي هذا الانجاز، الذي كان ثمرة جهد وتحد واصرار، رغم كل الصعوبات:

إلى من أوصى بها الرحمن، وجعل برّها طريقًا إلى الجِنان،

إلى من ضمّتني بدعائها، واحتملت قلقي وضعفي بفيض حنانها،

الى امي الحبيبة... يا نورًا أضاء ظلمتي، ويا رحمةً مهداة من السماء،

كل حرفٍ في هذا العمل يخبئ لمسة من روحك، ومن دعائك سرا،

أهديكِ هذا الانجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود، وأرفع يدي بالدعاء:

﴿وقل رب ارحمهما كما ربياني صغيرا﴾ [الاسراء :24]

والى ابي العزيز، دعامة ظهري، وسند خطواتي، وكان الصامت الذي لا يعطي بلا من،

جزاك الله عني خيرا يا ابي.

الى اخوتي الأحبة، وائل، ايمن، محمد الصديق و اسراء، أنتم فخري، ودعمي، وصوت الفرح في زحمة الايام.

الى خالاتي، يا من كن لقلبي وطنا، وشعلة دفء في كل لحظة.

الى جدي وجدتي، منكم بدأت الحكاية، وبكم ظلت الحياة جميلة.

الى اصدقائي، الذين تقاسموا معي الحلم والطريق، دمتم سند لا يعوض.

الى كل من امن بي، والى من لم يخذلني رغم صمتي، الى من ربط على قلبي بكلمة طيبة حين أثقلته الحياة

الى مشرفي واساتذتي، شكرا لتوجيهكم وصبركم، كنتم النور في متاهة البحث.

واخيرا الى نفسي... الى تلك الفتاة، التي لم تستسلم ومازالت تحلم، رغم كل ما كتب لها من الم، شكرا لأنك لم تنهاري، والتي لا تزال تؤمن، ان الطريق طويل لكن الوصول ممكن بإذن الله.

اللهم اجعل هذا الانجاز خطوة اولى،

نحو مناصب اعلى ونحو حياة أفضل،

مليئة بالعطاء والتوفيق.



Sommaire

Table des matières

Introduction Générale 1

.I Introduction générale : 2

Chapitre 1 6

Caractéristiques générales de la pollution atmosphérique 6

1.1 Introduction 7

1.2 Définitions et classification de la pollution atmosphérique : 7

1.2.1 L'atmosphère et l'air : 7

1.2.2 Pollution atmosphérique : 8

1.2.3 Classification de la pollution atmosphérique : 9

1.2.4 Les polluants atmosphériques : 10

1.2.5 Les sources des polluants atmosphériques : 11

1.3 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé et l'environnement 12

1.3.1 Effets sanitaires : 12

1.3.2 Impacts environnementaux : 14

1.4 Cadre Réglementaire et normes de qualité de l'air : 16

1.4.1 Normes nationales et internationales (valeurs limites pour divers polluants) : 16

1.4.2 Les normes nationales (algériennes) : 16

1.4.4 Références aux législations et réglementations en vigueur en Algérie concernant la qualité de l'air 17

1.5 Résultats et interprétation : 18

1.5.1 Synthèse des résultats obtenus à partir de l'analyse des données GEE : 18

1.5.2 Discussion des limites de l'étude : 19

1.5.3 Recommandations : 19

Conclusion : 21

Chapitre 2 : 23

Analyse spatio-temporelle de la qualité de l'air à Oran à l'aide de google earth engine 23

2.1 Introduction : 24

2.2 Données et méthodologie : 25

2.2.1 Présentation de la zone d'étude localisation géographique (carte, coordonnées): 25
2.2.2 Données météorologiques issues de la modélisation avec R : 26
2.2.3 Données satellitaires (Sentinel-5P – TROPOMI) : 29
2.3 Impact de l'expansion urbaine et de la croissance démographique : 39
2.3.1 Analyse de l'évolution de l'urbanisation d'Oran à l'aide d'images satellitaires : 40
2.3.2 Corrélation entre l'étalement urbain et la densité de population dans la commune d'Oran : 42
2.4 Impact du réseau routier et de la circulation sur la qualité de l'air: 43
2.4.1 Analyse spatiale des infrastructures de transport (routes, autoroutes, etc.) et leur relation avec la concentration des polluants: 44
2.4.2 Intégration de données de mobilité urbaine: 45
2.4.3 Évaluation de l'impact de la circulation: 46
2.5 Analyse spatio-temporelle de la concentration des principaux polluants : 47
2.5.1 Cartes de distribution spatiale des principaux polluants : 48
..... 48
2.5.2 Identification et caractérisation des zones critiques de pollution à Oran : 49
2.6 Conclusion : 51
Conclusion générale **52**
Conclusion générale : 53

Liste des figures

Figure 1: schéma du processus de la formation des acides et leurs impacts sur les sols et les écosystèmes aquatiques. Sources : l'intelligence artificielle 14
Figure 2:Localisation de la commune d'Oran 25
Figure 3:schéma de processus de modélisation climatique avec R 26
Figure 4: Evolution annuelle de la température à Oran (2019-2023) 27
Figure 5:Evolution de l'humidité relative moyenne annuelle à Oran (2019-2023) 28
Figure 6: Evolution de la vitesse moyenne du vent a Oran (2019-2023) 28
Figure 7: Evolution des précipitation moyennes a Oran (2019-2023) 28
Figure 8:Surveillance de la qualité de l'air par satellite 29
Figure 9:Evolution annuelle de la concentration du dioxyde d'azote (NO_2) à Oran (2019-2023) 32
Figure 10:Evalution annuelle de la concentration du monoxyde de carbone (CO) à Oran (2019-2023) *Erreur ! Signet non défini.*
Figure 11:Evalution annuelle de la concentration d'ozone (O_3) à Oran (2019-2023) 35
Figure 12:formation photochimique de l'ozone (O_3). Source : l'intelligence artificielle. 36
Figure 13: Evolution annuelle de la concentration de dioxyde de soufre (SO2) à Oran (2019-2023) 37
Figure 14: Evolution annuelle des AAI à Oran (2019-2023) 39
Figure 15: Carte superposée du NDBI dans la commune d'Oran (2019-2023) 41
Figure 16:Carte superposée de la densité de population (2019-2023) 43
Figure 17: Evolution des réseaux routiers de la commune d'Oran entre (2019 vs 2023) 44
Figure 18: Répartition approximation de l'évolution du parc automobile de la wilaya d'Oran entre (2019-2023). Source : Estimation basées sur les données fournies par ONS 2015 46
Figure 19: Carte de densité de la circulation routière dans la commune d'Oran en 2023 47
Figure 20: Carte de distribution spatiale des principaux polluants (NO_2, CO, O_3) 48
Figure 21:Facteurs influant sur la concentration et la dispersion. Source : l'intelligence artificielle 49
Figure 22: Carte de la densité du réseau routier dans la commune d'Oran, mettant en évidence les zones à forte circulation et donc potentiellement les plus polluées. 50

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des polluants atmosphériques _____ 9

Tableau 2: Effets sanitaires principaux liés a la pollution atmosphérique _____ 13

Tableau 3: Les normes nationales [21]. _____ 16

Tableau 4: Les normes internationales [23],[12], [24]. _____ 17

Tableau 5: Données climatiques annuelles à Oran (2019-2023) _____ 27

Tableau 6: Données du dioxyde d'azote (NO_2) issues de sentinel-5P, exprimées initialement en mol/m²puis converties en µg /m³ _____ 31

Tableau 7:données du monoxyde de carbone (CO) issues de sentinel -5P, exprimées initialement en mol/m² puis converties en µg/m³. _____ 33

Tableau 8:données d'ozone (O_3) issues de sentinel-5P, exprimées initialement en mol/m² puis converties en µg/m³. _____ 34

Tableau 9: données du dioxyde de soufre (SO_2) issues de sentinel-5P, exprimées initialement en mol/m² puis converties en µg/m³. _____ 37

Tableau 10: Évolution annuelle de l'AAI moyen pour la commune d'Oran (2019–2023). _____ 38

Tableau 11:Moyennes annuelles de l'indice NDVI (2019–2023) – Résultats obtenus par les étudiantes à partir des données Sentinel-2 sur la plateforme Google Earth Engine _____ 40

Tableau 12: Moyennes annuelles de l'indice NDVI (2019–2023) – Résultats obtenus par les étudiantes à partir des données Sentinel-2 sur la plateforme Google Earth Engine _____ 41

Tableau 13: Estimation approximative de l'évolution du parc automobile de la wilaya d'Oran entre 2019 et 2023. Source : Estimations basées sur les données fournies par l'Office National des Statistiques (ONS, 2015). _____ 45

Liste des abréviations

Sigle	Signification
OMS	Organisation mondiale de la santé
COV	Composés Organiques Volatils
PM	Particules en suspension (Particulate Matter)
ROS	Reactive Oxygen Species (Espèces réactives de l'oxygène)
MPOC	Maladie Pulmonaire Obstructive Chronique
CFC	Chlorofluorocarbures
HCFC	Hydro chlorofluorocarbures
UV-B	Ultraviolet B (rayonnement ultraviolet B)
UE	Union Européenne
EPA	Environnemental Protection Agency (Agence de Protection de l'Environnement, USA)
GEE	Google Earth Engine
AAI	Absorbing Aerosol Index (Indice d'Aérosols Absorbants)
NDBI	Normalized Difference Built-up Index (Indice de surface bâtie normalisé)
NDVI	Normalized Difference Végétation Index (Indice de végétation par différence normalisée)
ONS	Office National des Statistiques

Résumé

Cette recherche concerne la surveillance de la qualité de l'air dans la ville d'Oran, en utilisant principalement des données de télédétection par satellite. Nous avons utilisé les informations du satellite Sentinel-5P (TROPOMI) pour extraire les concentrations des principaux polluants atmosphériques tels que le NO_2, le CO, l'O_3 et l'AAI. En outre, des données climatiques ont été examinées à l'aide du logiciel R, car la concentration des polluants est fortement influencée par les conditions météorologiques. Afin de comprendre les facteurs liés à la pollution, nous avons également employé des indicateurs de développement urbain tels que l'indice NDBI, ainsi qu'une analyse détaillée du réseau routier en utilisant des outils en ligne spécialisés, notamment OpenMapTurbo. L'évolution démographique de la population entre 2019 et 2023 a également été considérée pour mieux comprendre les dynamiques de pollution. Notre approche méthodologique rigoureuse, intégrant des données satellitaires, des analyses climatiques et des outils géospatiaux, nous a permis d'évaluer avec précision la qualité de l'air à Oran, d'identifier les principales sources de pollution et de proposer des recommandations appropriées pour améliorer la gestion environnementale.

Mots-clés :

Qualité de l’air, Pollution atmosphérique, Données satellitaires, Sentinel-5P (TROPOMI), Indice NDBI, Analyse spatiale, Modélisation climatique (R), Commune d’Oran.

الملخص:

تناولت هذه الدراسة تقييم جودة الهواء في بلدية وهران خلال الفترة من 2019 إلى 2023 باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد وتحليل البيانات الجوية. اعتمد البحث على بيانات الأقمار الصناعية Sentinel-5P (TROPOMI) لاستخراج تركيزات الملوثات الجوية مثلNO_2 ، CO، وO_3، بالإضافة إلى استخدام مؤشر البناء NDBI لتحليل التوسع العمراني وتتبع تطور شبكة الطرق باستخدام أدوات متقدمة مثل .Overpass Turbo كما تم استخدام برنامج R لمحاكاة وتحليل البيانات الجوية نظرًا للعلاقة الوثيقة بين تركيز الملوثات والظروف الجوية. تميزت الدراسة باستخدام مصادر بيانات دقيقة وعالمية، مع التركيز على فهم ظاهرة التلوث التي لا يمكن ملاحظتها بالعين المجردة، مما مكن من تقديم تقييم شامل لديناميكيات التلوث في البيئة الحضرية بوهران واقتراح توصيات لتحسين جودة الهواء.

الكلمات المفتاحية:

جودة الهواء، التلوث الجوي، الاستشعار عن بعد، Sentinel-5P، مؤشر البناء،NDBI التحليل المكاني محاكاة بيانات جويةR))، بلدية وهران.

Introduction Générale

I. Introduction générale :

Aujourd'hui, la pollution de l'air suscite une prise de conscience mondiale croissante en raison de ses effets néfastes sur les équilibres écologiques de la planète. Pourtant, son impact sur la santé respiratoire des populations urbaines reste souvent sous-estimé. Dans les grandes villes, la détérioration de la qualité de l'air est parfois perçue, au mieux, comme une conséquence inévitable du développement économique, et au pire, comme une problématique secondaire [1].

Cependant, de nombreuses études épidémiologiques, notamment celles menées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), ont mis en évidence les effets délétères d'une exposition prolongée aux polluants atmosphériques. Dès lors, la pollution de l'air s'impose comme un enjeu majeur dans la planification et la gestion des espaces urbains. Son traitement, ou son absence, constitue un révélateur du niveau de gouvernance des territoires. En effet, cette problématique est étroitement liée au développement urbain, car elle découle de l'expansion des villes, de la mobilité, des activités industrielles et du confort résidentiel. Elle constitue également un indicateur clé de la capacité des autorités publiques à coordonner leurs actions avec les différents acteurs d'un même territoire [2].

Ainsi, pour mieux comprendre les effets de cette pollution, il est essentiel de définir ce phénomène et d'examiner les sources spécifiques qui contribuent à sa présence dans les zones urbaines.

La pollution de l'air est définie comme la présence de substances nuisibles ou polluantes dans l'air, qu'il s'agisse de gaz ou de particules fines, affectant la qualité de l'air que nous respirons. La pollution de l'air se produit principalement dans les zones urbaines en raison de diverses sources, notamment : la circulation routière, les activités industrielles, la construction et les activités domestiques. Ces polluants ont des effets négatifs importants sur la santé humaine, provoquant des maladies respiratoires, des troubles cardiaques et, dans certains cas, entraînant des décès prématurés. De plus, ces polluants contribuent au changement climatique en augmentant la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En représentant, un problème environnemental complexe qui nécessite une attention particulière[3] .

Parmi les substances nuisibles responsables de cette pollution figurent le dioxyde d'azote (NO_2), qui provient principalement des transports, et les particules fines ($PM_{2.5}$ et PM_{10}) émises par les usines et les processus de combustion, ainsi que le dioxyde de soufre (SO_2), qui aggrave les maladies respiratoires et cardiaques. Ces polluants ont un impact négatif sur la santé publique, entraînant une augmentation des coûts de santé et une diminution de la productivité dans de nombreuses grandes villes telles que New York, Paris et Tokyo. De plus, les communautés

pauvres et les zones résidentielles proches des sources de pollution, telles que les autoroutes et les usines, sont les plus touchées par les conséquences sociales et économiques de la pollution de l'air[4] .

En Algérie, la situation à Oran reflète des défis environnementaux similaires, où l'on observe une augmentation de la pollution de l'air en raison des activités industrielles et du trafic, ce qui impose une pression supplémentaire sur le système de santé et social de la ville. Cette situation met en évidence la nécessité d'une étude approfondie pour comprendre l'origine et les effets de cette pollution sur la santé et l'environnement. Ainsi, l'enjeu de cette étude est de répondre aux questions suivantes : **Comment la pollution de l'air à Oran affecte-t-elle la santé et l'environnement ? Quelles sont les sources de pollution et les facteurs influençant ce phénomène ? Et comment utiliser les données satellitaires et climatiques pour analyser la pollution et proposer des recommandations pour améliorer la qualité de l'air ?**

Nous supposons que le déclin graduel de la qualité de l'air à Oran entre 2019 et 2023 est principalement dû à l'expansion des activités industrielles, à l'accroissement du trafic urbain, ainsi qu'à des conditions climatiques défavorables. L'utilisation des données fournies par les satellites, associée aux indicateurs météorologiques, permettrait de mieux comprendre la dynamique de cette pollution et d'identifier les zones les plus touchées, afin de suggérer des recommandations ciblées pour améliorer la qualité de l'air.

Dans cette optique, cette étude se fixera plusieurs objectifs spécifiques pour répondre aux questions soulevées concernant la pollution de l'air à Oran et ses impacts. Ces objectifs sont définis de la manière suivante :

1. **Mesurer l'ampleur de la pollution de l'air dans la commune d'Oran :** en utilisant des données satellitaires et climatiques, afin de déterminer les niveaux de pollution et d'identifier les variations temporelles de la qualité de l'air entre 2019 et 2023.
2. **Identifier les principales sources de pollution à Oran :** en se concentrant sur le trafic routier et les autres activités urbaines humaines. L'étude évaluera également la relation entre l'étalement urbain, la densité de population et la concentration des polluants à travers des corrélations spatiales, et illustrera ces résultats par des cartes montrant les zones les plus affectées.
3. **Proposer des recommandations pratiques pour améliorer la gestion de la qualité de l'air à Oran :** en se basant sur les résultats obtenus, en mettant l'accent sur des politiques publiques efficaces, des solutions techniques et des pratiques durables pour réduire les niveaux de pollution et protéger la santé publique et l'environnement.

Afin d'atteindre ces objectifs, une approche méthodologique rigoureuse sera adoptée. Cette étude repose sur :

1. Collecte des données :

- **Données satellitaires :** utilisation de Google Earth Engine (GEE) pour l'extraction et l'analyse des données de qualité de l'air (NO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}) à partir de capteurs satellitaires tels que Sentinel-5P (TROPOMI).
- **Données climatiques :** recours aux bases de données météorologiques afin d'intégrer les variables influençant la dispersion des polluants (vent, humidité et température).
- **Données au sol (si disponibles) :** exploitation des mesures des stations de surveillance locales pour valider les résultats obtenus par la télédétection.

2. Analyse des données :

- **Traitement des images satellitaires :** utilisation de GEE pour extraire les concentrations de polluants sur différentes périodes au niveau de la commune d'Oran.
- **Analyse spatiale :** intégration des données dans les systèmes d'information géographique (SIG) afin de cartographier la répartition des polluants et d'identifier les zones les plus affectées.
- **Corrélations spatiales :** étude des relations entre la pollution atmosphérique, la densité urbaine, le trafic routier et l'expansion de la ville.

3. Interprétation et recommandations :

- Identification des tendances et des sources dominantes de pollution. Proposition de recommandations adaptées aux résultats obtenus pour améliorer la gestion de la qualité de l'air à Oran.

Cette méthodologie permet ainsi une évaluation précise et détaillée de la pollution de l'air en milieu urbain, en combinant des outils modernes d'analyse environnementale et des approches quantitatives.

Dans ce cadre méthodologique, chaque chapitre permet d'approfondir un aspect spécifique de l'étude, en commençant par les bases théoriques, pour ensuite évoluer vers l'analyse des données empiriques, aboutissant à une évaluation complète de la situation.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré au cadre théorique de la pollution de l'air, traitant de ses sources, de ses impacts sur la santé et l'environnement, ainsi que des principales normes et régulations existantes. Le deuxième chapitre constitue le

cœur de l'étude appliquée, portant sur l'analyse spatio-temporelle de la qualité de l'air dans la ville d'Oran, en utilisant des données satellitaires et climatiques, et en exploitant la plateforme Google Earth Engine pour l'extraction, le traitement et la cartographie des concentrations de polluants. Le troisième chapitre est dédié à la discussion des résultats obtenus, ainsi qu'à la proposition de recommandations pratiques et de perspectives futures.

Enfin, au-delà de l'introduction générale, une conclusion s'impose où l'ensemble des résultats obtenus est discuté et des perspectives futures sont proposées.

Chapitre 1

Caractéristiques générales de la pollution atmosphérique

Chapitre 1 : caractéristiques générales de la pollution atmosphérique :

1.1 Introduction

La troposphère est l'espace dans lequel nous vivons et respirons. C'est la partie de l'atmosphère qui contient 90 % de la masse totale de l'air et presque toute sa vapeur d'eau. L'air est le fluide gazeux que nous respirons. Il joue un rôle fondamental et très important dans l'équilibre écologique [3].

La pollution de l'air est la contamination de l'atmosphère due à des facteurs biologiques, chimiques ou physiques, qui altèrent les caractéristiques naturelles de l'atmosphère et peuvent causer des effets nocifs, des nuisances ou des désagréments aux humains et à l'environnement. La pollution de l'air est devenue au fil des ans un problème majeur dans notre société, la qualité de l'air étant de plus en plus affectée par l'augmentation des émissions de pollution (provenant à la fois des activités humaines et des phénomènes environnementaux). vec l'expansion urbaine rapide, la croissance démographique et le développement industriel, les grandes villes comme la ville d'Oran connaissent une détérioration alarmante de la qualité de l'air. Cette détérioration est principalement attribuée aux émissions provenant du transport, des activités industrielles, l'utilisation excessive des énergies fossiles et l'impact de certaines sources naturelles [5].

Face à ces défis, il apparaît nécessaire d'étudier plus en détail les caractéristiques de la pollution atmosphérique, avec un focus particulier sur la situation à Oran. Ce travail vise à identifier les principales sources de pollution, à analyser leurs impacts sur la santé et l'environnement, à évaluer les mesures prises pour y remédier et à explorer les perspectives d'amélioration.

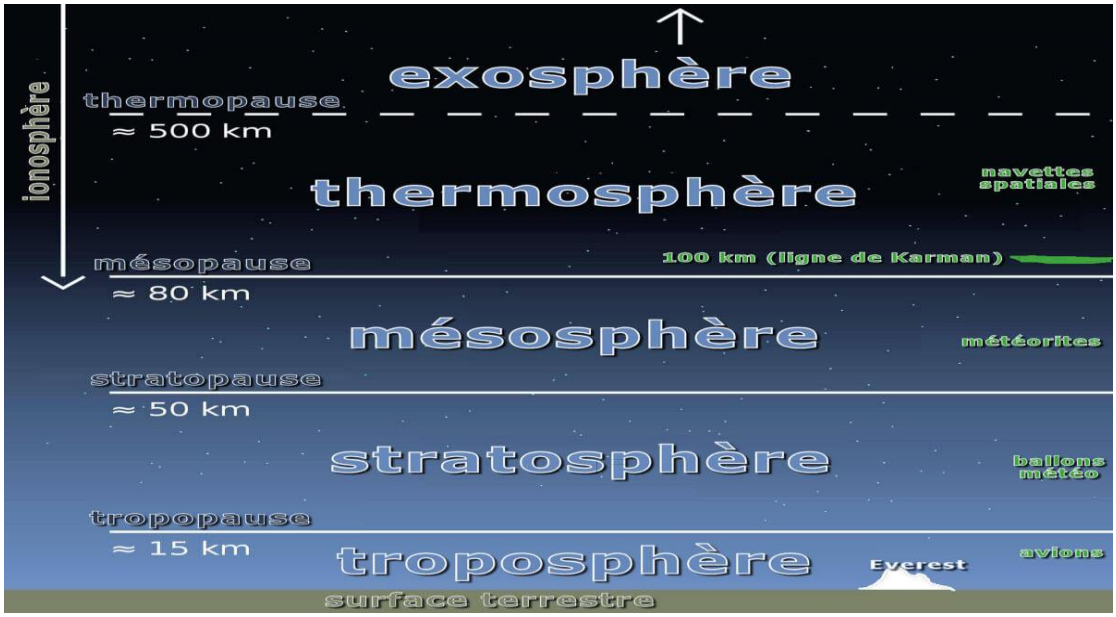
1.2 Définitions et classification de la pollution atmosphérique :

1.2.1 L'atmosphère et l'air :

L'atmosphère entoure la terre et forme une enveloppe de gaz essentielle au maintien de la vie. Il joue un rôle important dans la protection de notre planète du vide spatial et des rayonnements solaires nocifs, tout en régulant l'humidité (formation de nuages), la distribution des gaz et la dispersion des particules en suspension. En d'autres termes, il agit comme un bouclier protecteur, maintenant les conditions nécessaires à la vie sur Terre [6].

D'autre part, l'air est le principal composant de l'atmosphère terrestre. Il s'agit d'un mélange gazeux composé principalement d'azote (environ 78 %) et d'oxygène (21 %), avec de plus petites quantités d'autres gaz tels que l'argon, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau. Les proportions de ces éléments peuvent varier légèrement en fonction des conditions environnementales et climatiques, affectant divers processus naturels. *Pour mieux comprendre*

la répartition et l'accumulation des polluants atmosphériques, il est essentiel de connaître la structure de l'atmosphère terrestre. Celle-ci est composée de plusieurs couches qui diffèrent par leurs caractéristiques physiques et chimiques, notamment en termes de température, de pression et de composition gazeuse. Ce gradient vertical influence fortement le comportement et le transport des polluants dans l'air. L'illustration suivante présente les principales couches de l'atmosphère et leurs propriétés essentielles :



1.2.2 Pollution atmosphérique :

La pollution de l'air est un phénomène environnemental majeur qui affecte la qualité de l'air et a des conséquences néfastes sur la santé humaine et les écosystèmes [7]. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la pollution de l'air provoque des millions de décès prématurés chaque année, ce qui souligne la gravité de ce problème mondial.

En Algérie, notamment dans la ville d'Oran, la pollution de l'air est devenue un problème environnemental majeur en raison de l'expansion urbaine rapide, du développement industriel et de l'augmentation du trafic routier. L'augmentation de ces activités humaines a conduit à une détérioration progressive de la qualité de l'air, mettant en danger la santé publique et l'équilibre écologique.

D'une manière générale, la pollution de l'air est causée par l'entrée de substances nocives dans l'atmosphère, notamment des facteurs naturels tels que les éruptions volcaniques et les tempêtes de sable, ainsi que des facteurs humains tels que les émissions industrielles., les transports et l'agriculture. Ces polluants comprennent principalement des gaz toxiques (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, etc.), des particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$, qui ont

respectivement un diamètre inférieur à 10 et 2,5 micromètres) et divers composés organiques volatils (COV). Ces matériaux contribuent à la détérioration de la qualité de l'air et ont des impacts importants sur la santé et l'environnement.

Les analyses de la qualité de l'air indiquent que le trafic routier est une source majeure d'émissions de dioxyde d'azote (NO_2). L'intensité du trafic d'influence affecte directement les niveaux de pollution mesurés, soulignant la nécessité de réguler la mobilité urbaine pour réduire ces émissions [8].

1.2.3 Classification de la pollution atmosphérique :

Les polluants peuvent être classés en fonction de leur nature et de leur degré de dispersion en :

- ✓ **Polluants inorganiques :** Ce sont des substances chimiques qui ne contiennent pas de carbone organique. Ils proviennent généralement de processus industriels et d'émissions de combustion.
- ✓ **Polluants organiques :** Ce sont des composés contenant du carbone qui proviennent principalement des activités humaines et naturelles.
- ✓ **Aérosols :** Ce sont des particules solides ou liquides en suspension dans l'air et qui peuvent affecter la qualité de l'air et la santé humaine.

Tableau 1: Classification des polluants atmosphériques

Catégorie	Polluants
Polluants inorganiques	- Dioxyde de soufre (SO_2) - Monoxyde d'azote (NO) - Dioxyde d'azote (NO_2) - Hydrogène sulfuré (H_2S) - Ammoniac (NH_3) - Monoxyde de carbone (CO) - Dioxyde de carbone (CO_2) - Dérivés du plomb (Pb et composés) - Chlore et chlorures (Cl_2, Cl^-) - Fluor et fluorures (F_2, F^-)
Polluants organiques	- Hydrocarbures (Cx Hy) - Aldéhydes (R-CHO) - Cétones (R-CO-R') - Composés organiques du soufre (sulfures, R-SH)

Aérosols	- Particules solides (poussières, fumées) -Particules liquides (brouillards, gouttelettes)

1.2.4 Les polluants atmosphériques :

L'air peut être pollué par divers polluants qui modifient sa qualité, tels que l'ozone (O3), le dioxyde d'azote (NO2), le dioxyde de soufre (SO2) et le monoxyde de carbone (CO), affectant ainsi la santé humaine et l'environnement.

Le développement urbain et l'extension des réseaux routiers ont entraîné une augmentation du nombre de véhicules sur la route, provoquant des émissions de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NO_2) et le dioxyde de soufre (SO_2). La croissance rapide des infrastructures urbaines et l'augmentation de la demande de transport ont exacerbé cette situation, rendant nécessaire la prise de mesures appropriées pour réduire l'impact sur l'environnement [9].

Le dioxyde d'azote est l'un des gaz les plus courants, émis principalement par les véhicules diesel et les centrales électriques brûlant des combustibles fossiles. Le gaz joue également un rôle clé dans la formation d'autres polluants tels que l'ozone. En ce qui concerne les particules en suspension, elles sont classées en fonction de leur taille : les PM_{10}, $PM_{2,5}$ et PM1, avec les particules fines ($PM_{2,5}$) ayant la capacité de pénétrer profondément dans les voies respiratoires, ce qui peut gravement nuire à la santé humaine [10].

- ✓ **Le dioxyde d'azote (NO_2) :**

Le dioxyde d'azote est un gaz réactif issu principalement de la combustion des carburants fossiles, notamment dans les moteurs diesel et les centrales thermiques.

- ✓ **Le dioxyde de soufre (SO_2)**

Le dioxyde de soufre est un gaz incolore à l'odeur piquante, généré lors de la combustion du charbon et du pétrole dans les installations industrielles.

- ✓ **Le monoxyde de carbone (CO) :**

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore et inodore formé par la combustion incomplète des matières carbonées comme le bois, l'essence ou le gaz.

- ✓ **L'ozone troposphérique (O_3) :**

L'ozone troposphérique se forme par une réaction photochimique entre les oxydes d'azote et les composés organiques volatils sous l'effet du rayonnement solaire, n'étant pas émis directement.

- ✓ **Les composés organiques volatils (COV) :**

Les composés organiques volatils regroupent diverses substances chimiques carbonées, facilement évaporables, provenant de solvants industriels, de carburants et de certaines activités domestiques.

- ✓ **Les particules en suspension (PM_{10}, $PM_{2,5}$, PM_1) :**

Les particules en suspension, classées selon leur diamètre (PM_{10}, $PM_{2,5}$, PM_1), proviennent des activités industrielles, du trafic routier, du chauffage au bois ainsi que de phénomènes naturels

1.2.5 Les sources des polluants atmosphériques :

La pollution de l'air provient de sources à la fois naturelles et humaines :

- ➢ **Sources naturelles :** Les sources naturelles regroupent l'ensemble des phénomènes environnementaux qui génèrent spontanément des émissions dans l'atmosphère. Tels que :
  - ✓ **Éruptions volcaniques :** Les volcans libèrent de grandes quantités de gaz, notamment du dioxyde de soufre (SO_2), ainsi que des cendres et des particules fines qui se dispersent dans l'atmosphère. Ces émissions peuvent influencer le climat local et, en grande quantité, avoir des impacts mondiaux.
  - ✓ **Incendies de forêts :** Ces feux ne se limitent pas à la destruction de la végétation, ils émettent également de la fumée, du monoxyde de carbone (CO) et des particules fines. En Algérie, les incendies ont ravagé 89 000 hectares à travers 35 wilayas, enregistrant 1 186 incendies et causant la mort d'au moins 90 personnes, dont 33 militaires [11]
  - ✓ **Tempêtes de sable et de poussière :** Ces phénomènes augmentent la concentration de particules fines dans l'air et sont fréquents dans les zones désertiques. Les vents transportent de grandes quantités de sable et de particules fines, contribuant ainsi à la pollution atmosphérique.
  - ✓ **Émissions biologiques :** Les plantes et les sols libèrent naturellement des composés et des gaz tels que le méthane (CH_4) et de nitreux (HNO_2).
- ➢ **Sources anthropiques :** regroupent l'ensemble des activités humaines générant des émissions de polluants dans l'atmosphère. Tels que :
  - ✓ **Transports :** Les véhicules, tels que les voitures et autres moyens de transport, émettent des quantités significatives de polluants comme les oxydes d'azote (NO_x) et les particules fines, contribuant ainsi au réchauffement climatique et à la dégradation de la qualité de l'air. En Algérie, le secteur des transports est un contributeur majeur à cette pollution. [12]
  - ✓ **Industrie :** Les usines et les centrales électriques jouent un rôle important dans la pollution atmosphérique en libérant des gaz tels que le dioxyde de soufre (SO_2) et les

oxydes d'azote (NO, NO_2). En Algérie, une production industrielle ne respectant pas les normes environnementales aggrave cette situation. [13]

- ✓ **Agriculture :** L'utilisation d'engrais chimiques et l'élevage de bétail entraînent des émissions de gaz comme l'ammoniac (NH_3) et le méthane (CH_4), augmentant la concentration de polluants dans l'atmosphère.
- ✓ **Activités domestiques :** L'utilisation de combustibles fossiles ou de bois pour la cuisson et le chauffage libère une variété de polluants qui affectent la qualité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur des habitations [12].

1.3 Effets de la pollution atmosphérique sur la santé et l'environnement

La pollution de l'air constitue l'un des défis environnementaux les plus préoccupants en raison de son impact direct sur la santé humaine et les écosystèmes. La qualité de l'air, essentielle au bien-être de la population, se dégrade progressivement sous l'influence des émissions industrielles, des transports et de la combustion des combustibles fossiles. Outre ses conséquences sanitaires, cette pollution perturbe l'équilibre écologique, accélère le changement climatique et nuit à la biodiversité et à la couche d'ozone. Face à ces défis majeurs, analyser leurs impacts et mettre en œuvre des stratégies d'atténuation est une nécessité scientifique et sociétale pour assurer un environnement sain et durable aux générations futures.

1.3.1 Effets sanitaires :

1.3.1.1 Mécanismes d'impact de la pollution de l'air sur le système respiratoire

Effets sur le système respiratoire :

Lorsqu'une personne est exposée à de l'air pollué, elle inhale des particules fines ($PM_{2,5}$, PM_{10}) et des gaz nocifs tels que l'ozone (O_3), les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO_2), qui interagissent avec le système respiratoire par le biais de plusieurs mécanismes complexes. Une fois que ces polluants pénètrent dans le système respiratoire par la cavité nasale et la cavité buccale, les particules fines irritent la muqueuse bronchique, déclenchant une réponse inflammatoire immédiate, provoquant un rétrécissement des voies respiratoires et une augmentation de la sécrétion de mucus, entraînant des difficultés respiratoires et une toux persistante [14].

L'ozone, en particulier, attaque les cellules épithéliales des alvéoles, détruit la barrière pulmonaire, augmente la perméabilité des tissus et rend les poumons plus sensibles aux infections et aux inflammations [15].

Stress oxydatif et dommages cellulaires :

Au niveau cellulaire, les polluants atmosphériques génèrent un stress oxydatif, favorisant la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS - Reactive Oxygen Species), qui sont des molécules instables causant des dommages directs aux protéines et à l'ADN des cellules pulmonaires [16]. Ce processus entraîne un dysfonctionnement pulmonaire et contribue au développement de maladies chroniques telles que la bronchite chronique et l'emphysème [17].

Effets sur le système cardiovasculaire :

Outre ses effets sur les poumons, la pollution atmosphérique impacte également le système cardiovasculaire de manière significative. Les particules ultrafines peuvent franchir la barrière alvéolaire et entrer dans la circulation sanguine, déclenchant une réponse inflammatoire systémique qui affecte le cœur et les vaisseaux sanguins, augmentant ainsi le risque de maladies cardiovasculaires comme l'athérosclérose et l'hypertension [3].

Populations vulnérables :

Les effets de la pollution de l'air sont particulièrement graves pour les populations vulnérables, notamment les enfants dont les poumons ne sont pas encore complètement développés, les personnes âgées ayant un système immunitaire affaibli, ainsi que les individus souffrant de maladies respiratoires chroniques telles que l'asthme et la maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC) [18]. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), une exposition prolongée à l'air pollué entraîne une diminution progressive de la capacité pulmonaire et accroît le taux de mortalité lié aux maladies respiratoires et cardiovasculaires [3].

Principales maladies liées à la pollution atmosphérique :

Tableau 2: Effets sanitaires principaux liés à la pollution atmosphérique

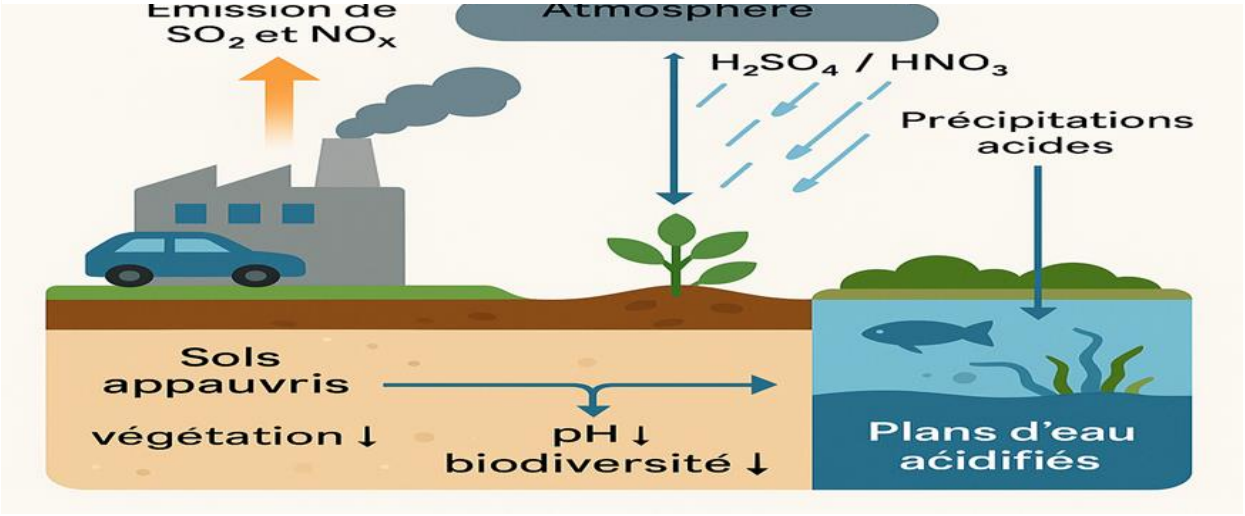
Polluants atmosphériques	Organes cibles	Effets / Maladies associées	Populations à risque
Particules fines ($PM_{2.5}$, PM_{10}).	Poumons, cœur	Bronchite chronique, asthme, maladies cardiovasculaires	Enfants, personnes âgées, asthmatiques
Ozone (O_3)	Poumons	Inflammation des voies respiratoires, infections respiratoires	Enfants, personnes allergiques
Dioxyde de soufre (SO_2)	Voies respiratoires supérieures	Toux, irritation, bronchospasmes	Travailleurs exposés, personnes asthmatiques

Oxydes d'azote (NOx)	Système respiratoire et cardiovasculaire	Réduction de la fonction pulmonaire, hypertension	Citadins, personnes vulnérables
Monoxyde de carbone (CO)	Cerveau, cœur	Hypoxie, troubles neurologiques, troubles cardiaques	Femmes enceintes, patients cardiaques

1.3.2 Impacts environnementaux :

1.3.2.1 L'acidification des sols et des eaux :

Figure 1: schéma du processus de la formation des acides et leurs impacts sur les sols et les écosystèmes aquatiques. Sources : l'intelligence artificielle



Sous l'influence de polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre SO_2 et les oxydes d'azote NO_x, des réactions chimiques complexes se produisent dans l'atmosphère.

Ces polluants interagissent avec la vapeur d'eau, entraînant la formation de composés acides qui, incorporés dans les précipitations qu'il s'agisse de pluie, de neige ou de brouillard rendent celles-ci anormalement acides. Lorsque ces précipitations atteignent les sols ou les milieux aquatiques, elles perturbent leur équilibre chimique. Cette perturbation se manifeste notamment par une réduction de la disponibilité des nutriments essentiels dans les sols, entravant ainsi la croissance et le développement de la végétation.

Dans les écosystèmes aquatiques, l'acidification se traduit par une diminution du pH, mettant en péril des espèces particulièrement sensibles. Ce phénomène affaiblit l'ensemble des écosystèmes et peut entraîner une baisse significative de la biodiversité.

1.3.2.2 Effet de serre et le réchauffement climatique

L'effet de serre est un phénomène naturel essentiel qui maintient des températures propices à la vie sur Terre. Cependant, en raison de l'activité humaine, ce phénomène s'est intensifié de

manière inquiétante. Les gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et les oxydes d'azote (NO_x), produits par les combustibles fossiles, l'industrie et l'agriculture, retiennent la chaleur dans l'atmosphère. Cela conduit à une augmentation de la température de la planète, ce qui aggrave le phénomène du changement climatique.

Ce réchauffement climatique a des conséquences désastreuses sur l'environnement. Par exemple, l'acidification des océans, causée par l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, perturbe les écosystèmes marins et menace les espèces marines. De plus, la pollution de l'air, causée en grande partie par les émissions de gaz à effet de serre, contribue à la formation de nuages acides qui affectent le sol, l'eau et les plantes. Comme le stipule l'Accord de Paris, l'objectif est de limiter cette augmentation de température pour éviter des impacts climatiques irréversibles.

Les effets combinés de la pollution atmosphérique et du réchauffement climatique perturbent non seulement la biodiversité mais aussi les communautés humaines. Les événements météorologiques extrêmes comme les vagues de chaleur, les tempêtes violentes et la montée du niveau de la mer deviennent plus fréquents, entraînant des pertes de vie et des destructions de biens. L'Accord de Paris souligne également la nécessité de soutenir les pays vulnérables en leur fournissant les ressources nécessaires pour faire face à ces défis.

1.3.2.3 Autres impacts environnementaux de la pollution de l'air :

Les effets combinés de la pollution atmosphérique et du réchauffement climatique perturbent non seulement la biodiversité mais affectent également les sociétés humaines. Les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les tempêtes violentes et l'élévation du niveau de la mer deviennent de plus en plus fréquents, entraînant des pertes en vies humaines et des destructions de biens. L'Accord de Paris souligne également la nécessité de soutenir les pays vulnérables en leur fournissant les ressources dont ils ont besoin pour relever ces défis.

Outre l'acidification de l'environnement et le réchauffement climatique, la pollution de l'air provoque d'autres impacts environnementaux majeurs, notamment la détérioration de la couche d'ozone stratosphérique. Ce phénomène est principalement causé par les CFC (chlorofluorocarbures) et les HCFC (hydro chlorofluorocarbures). Une fois libérés dans l'atmosphère, ces gaz atteignent la stratosphère où, sous l'influence du rayonnement ultraviolet, ils libèrent des atomes de chlore, provoquant une réaction catalytique qui détruit les molécules d'ozone.

La réduction de cette couche protectrice augmente l'exposition aux rayonnements UV-B (ultraviolets de type B), ce qui entraîne des effets néfastes sur la santé humaine, perturbe la photosynthèse, et menace les écosystèmes terrestres et aquatiques
La réduction de cette couche protectrice entraîne une exposition accrue aux rayons ultraviolets (UV-B), qui ont des effets nocifs sur la santé humaine, perturbent la photosynthèse et menacent les écosystèmes terrestres et aquatiques [19].

La biodiversité est également touchée par la pollution atmosphérique. Les dépôts de polluants dans les sols et les eaux modifient les équilibres chimiques naturels, ce qui peut causer la disparition de certaines espèces sensibles ou leur migration vers d'autres zones.
La biodiversité est également affectée par la pollution de l'air. Les dépôts de polluants dans le sol et dans l'eau altèrent les équilibres chimiques naturels, provoquant potentiellement la disparition ou la migration d'espèces sensibles vers d'autres zones. Les polluants comme l'ozone troposphérique peuvent aussi altérer la croissance des plantes, perturber la reproduction des espèces animales, et provoquer des déséquilibres dans les chaînes alimentaires [20].

1.4Cadre Réglementaire et normes de qualité de l'air :

1.4.1 Normes nationales et internationales (valeurs limites pour divers polluants) :

La qualité de l'air est un facteur clé pour la santé humaine et la protection de l'environnement. Pour garantir cela, un cadre réglementaire a été mis en place, à savoir l'étude et la présentation des lois, législations et normes qui ont également été établies aux niveaux nationaux (Algérie) et international (normes OMS, UE), pour limiter les concentrations de polluants atmosphériques. Le cadre réglementaire est ce qui permet d'appliquer ces normes à travers des lois et des décrets.

1.4.2 Les normes nationales (algériennes) :

Tableau 3: Les normes nationales [21].

Polluant	Valeur Limite	Unité de Mesure	Période
PM_{10} (particule≤10µm)	80	Microgramme/m³	24H
$PM_{2.5}$ (Particule≤2.5µm)	Précisément défini	Microgramme/m³	
NO2 (Oxyde d'Azote)	200	Microgramme/m³	1H
O_3 (Ozone)	180	Microgramme/m³	1H
SO_2 (Dioxyde de soufre)	125	Microgramme/m³	24H
CO	10.000	Microgramme/m³	1H

(Monoxyde de carbone)			

1.4.3 Les normes internationales (WHO, UE, EPA) :

Tableau 4: Les normes internationales [23],[12], [24].

Polluant	WHO	EU	EPA
PM_{10} (particule≤10µm)	45 Microgramme/m³ (24H)	50 Microgramme/m³ (24H) Max 35 fois par an	150Microgramme/m³ (24H)
$PM_{2.5}$ (Particule≤2.5µm)	15 Microgramme/m³ (24H)	25 Microgramme/m³ (24H)	35 Microgramme/m³ (24H)
NO2 (Oxyde d'Azote)	25 Microgramme/m³ (24H)	40 Microgramme/m³ Moyenne annuelle	100Microgramme/m³ (1H)
O_3 (Ozone)	100Microgramme/m³ Moyenne 8H	180Microgramme/m³ (1H)	180Microgramme/m³ (1H)
SO_2 (Dioxyde de soufre)	40 Microgramme/m³ (24H)	125Microgramme/m³ (24H)	75 Microgramme/m³ (1H)
CO (Monoxyde de carbone)	10 Microgramme/m³ (8H)	10 Microgramme/m³ (8H)	10 Microgramme/m³ (8H)
C6H6 (Benzène)	0.5 Microgramme/m³ (24H)	5 Microgramme/m³ (24H)	5 Microgramme/m³ (24H)

- **Comparaison des Normes de Qualité de l'Air (PM10, NO_2, O_3) :**

En Algérie, il existe des lois qui fixent des valeurs maximales pour certains polluants atmosphériques tels que PM10, NO_2, SO_2, CO et O_3. Ces valeurs sont proches des normes de l'Union européenne (UE) dans certains cas, mais elles restent moins strictes que les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), qui sont plus strictes et visent à protéger au maximum la santé humaine.

En revanche, les États-Unis (EPA) adoptent des normes variables, certaines strictes (comme $PM_{2,5}$) et d'autres flexibles (comme PM_{10}), équilibrées par polluant.

La valeur du polluant fin $PM_{2,5}$ n'est pas clairement définie dans la législation algérienne.

1.4.4 Références aux législations et réglementations en vigueur en Algérie concernant la qualité de l'air

En Algérie, la qualité de l'air est encadrée par un ensemble de textes législatifs et réglementaires visant à prévenir et à limiter la pollution atmosphérique. Voici les principales références :

- **Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 : relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.**

Elle fixe les principes généraux de la protection de l'air, l'obligation de prévention de la pollution et la nécessité de surveiller la qualité de l'air ambiant[22] .

- **Décret exécutif n° 06-138 du 15 avril 2006 : relatif à la surveillance de la qualité de l'air.**

Il définit les modalités de mise en place d'un système national de surveillance de la qualité de l'air, les méthodes de mesure, ainsi que les seuils d'alerte et les valeurs limites des principaux polluants atmosphériques[22] .

- **Décret exécutif n° 04-174 du 10 juin 2004 : relatif aux émissions atmosphériques des établissements classés.**

  Il établit les valeurs limites d'émission des polluants générés par les activités industrielles[21] .
- **Code de l'environnement algérien (notamment dans ses articles sur la pollution de l'air) :** qui intègre les obligations des collectivités locales et des établissements publics dans la protection de l'environnement[22] .
- **Stratégie nationale de protection de l'environnement et programmes comme "Air Pur" :** lancés pour améliorer la qualité de l'air dans les grandes villes comme Alger, Oran et Constantine[22] .

1.5 Résultats et interprétation :

1.5.1 Synthèse des résultats obtenus à partir de l'analyse des données GEE :

L'étude spatio-temporelle des niveaux de polluants atmosphériques, réalisée via la plateforme Google Earth Engine et les données de Sentinel-5P, a mis en évidence une tendance générale à la détérioration de la qualité de l'air dans la ville d'Oran entre 2019 et 2023. Cette tendance s'est manifestée par une augmentation des moyennes annuelles de certains polluants tels que le (NO_2), le (CO) et l'(O_3). Ces changements peuvent être expliqués par la dynamique urbaine de la ville, caractérisée par une expansion spatiale significative, une croissance continue de la population et une densification du réseau routier. Les cartes thématiques ont permis de repérer une concentration accrue des polluants dans les zones où l'urbanisation récente est associée à une forte présence d'infrastructures de transport.

Cette situation reflète l'effet combiné de l'augmentation du nombre de véhicules, de la réduction des espaces verts, et de l'accroissement de la consommation énergétique domestique. De plus, l'analyse temporelle montre que certains pics de pollution coïncident avec des années spécifiques, en particulier 2020 et 2023, où les transformations urbaines étaient particulièrement apparentes, renforçant l'hypothèse d'un lien entre l'évolution urbaine et la qualité de l'air.

L'approche par télédétection a ainsi fourni une vue d'ensemble objective de l'évolution de la pollution atmosphérique au niveau communal, tout en soulignant des zones sensibles à surveiller en priorité dans les futures politiques environnementales.

1.5.2 Discussion des limites de l'étude :

Une des principales limites de cette étude est la disponibilité très limitée des données locales sur la qualité de l'air. Il est surprenant qu'une ville métropolitaine comme Oran ne dispose pas de stations de surveillance fixes pour mesurer les concentrations annuelles de polluants atmosphériques à l'échelle communale. Cette absence de données officielles a constitué un obstacle majeur à la validation locale des résultats obtenus par télédétection.

De plus, l'accès à certaines institutions clés, comme la direction des transports, a été refusé, empêchant ainsi la collecte de données sur le parc automobile, un facteur essentiel dans l'analyse des sources de pollution. À cela s'ajoute une autre contrainte importante : l'accès aux données météorologiques, qui est proposé à un coût élevé, rendant leur acquisition impossible dans le cadre de ce projet académique.

Face à ces défis, nous avons dû adopter des solutions alternatives, telles que l'utilisation de données satellitaires traitées via la plateforme Google Earth Engine et de logiciels open source comme R. Bien que l'utilisation de ces outils ait présenté une certaine complexité, ils nous ont permis de dépasser les limites locales en accédant à des sources de données mondiales fiables.

Par ailleurs, l'intégration de cartes provenant de plateformes comme OpenStreetMap (pour les réseaux routiers) et WorldPop (pour la densité de population) a enrichi l'analyse spatiale de l'étude. Ainsi, malgré les contraintes institutionnelles et techniques rencontrées, l'étude a pu être réalisée grâce à des approches méthodologiques alternatives et un effort personnel considérable dans la collecte, le traitement et l'interprétation des données.

1.5.3 Recommandations :

Face aux résultats obtenus et aux défis rencontrés, plusieurs recommandations essentielles sont proposées pour améliorer la qualité de l'air et garantir un suivi environnemental efficace dans la wilaya d'Oran :

- **Réouverture, modernisation et décentralisation des stations de surveillance de la qualité de l'air :**

La remise en service des stations de mesure est cruciale pour obtenir des données fiables et en continu. Il est également conseillé d'implanter de nouvelles stations dans les zones périurbaines et les quartiers qui se développent rapidement afin d'assurer une couverture territoriale équilibrée. Ces stations devraient être dotées de capteurs modernes connectés à une base de données centralisée.

- **Développement d'un système intégré et intelligent de suivi environnemental :**

Il est fondamental de créer une plateforme numérique qui regroupe les données satellitaires (comme celles de Sentinel-5P), les mesures locales en temps réel, et les informations météorologiques. Ce système permettrait une modélisation dynamique de la pollution et une meilleure anticipation des épisodes critiques, notamment lors des périodes estivales ou de circulation intense.

- **Adoption d'une planification urbaine durable et d'une gestion écoresponsable du trafic :**

Les politiques d'aménagement doivent se concentrer sur la réduction de l'urbanisation non contrôlée, la conservation des espaces verts, et la promotion de moyens de transport écologiques (vélo, marche, transports en commun propres). Il est recommandé de mettre en place des zones à faibles émissions (ZFE) dans les secteurs les plus exposés.

- **Mise en œuvre d'une stratégie réglementaire stricte et d'une sensibilisation environnementale locale :**

Les autorités municipales doivent établir des normes rigoureuses concernant les émissions liées à l'industrie et au transport, et s'assurer de leur respect. Simultanément, il est essentiel d'éduquer les citoyens, en particulier les jeunes, à travers des campagnes de sensibilisation, des ateliers scolaires et des applications mobiles éducatives.

- **Création d'un centre d'observation local de la qualité de l'air :**

Un centre interdisciplinaire regroupant des chercheurs, des collectivités territoriales, des services techniques et la société civile assurerait une surveillance continue des problèmes de pollution, l'analyse des données et l'élaboration de recommandations stratégiques adaptées au contexte local d'Oran.

- **Promotion de projets entrepreneuriaux novateurs :**

La création d'une startup locale spécialisée dans la surveillance et l'analyse intelligente de la qualité de l'air (grâce à des capteurs IoT, à l'intelligence artificielle, aux données satellites) constitue une approche innovante. Ce genre de projet pourrait bénéficier de financements nationaux ou internationaux dans le cadre des politiques de transition écologique.

- **Renforcement de la collaboration interinstitutionnelle et de l'accès aux données :**

Il est conseillé de favoriser une coopération plus fluide entre les directions locales (Environnement, Transports, Urbanisme, Santé) et les universités afin de faciliter l'accès aux données et d'encourager des recherches appliquées axées sur l'amélioration de la qualité de l'air.

Conclusion :

Ce chapitre combine les fondements théoriques relatifs à la pollution de l'air avec l'analyse appliquée menée dans la commune d'Oran. D'une part, les concepts essentiels liés à la qualité de l'air, aux types de polluants, à leurs sources ainsi qu'à leurs effets sur l'environnement et la santé ont été abordés, permettant une compréhension approfondie de ce phénomène complexe. Il ressort que la pollution atmosphérique ne constitue pas uniquement un enjeu environnemental, mais bien une crise multidimensionnelle aux implications sociales, économiques et sanitaires, nécessitant une approche scientifique intégrée.

D'autre part, l'étude de terrain réalisée à Oran a mis en évidence une situation préoccupante en matière de qualité de l'air, tout en révélant les limites actuelles des dispositifs de surveillance et de diagnostic. Malgré les contraintes méthodologiques et institutionnelles, l'approche adoptée a permis de proposer des pistes concrètes orientées vers la durabilité et la résilience urbaine, en favorisant l'intégration d'outils technologiques modernes, une gouvernance collaborative et une implication active des citoyens dans les questions environnementales.

Ainsi, il devient impératif de passer du constat à l'action, en érigeant la qualité de l'air en priorité transversale des politiques publiques locales. Ce travail ambitionne de constituer une

base de réflexion pour le développement d'initiatives futures, tant dans le domaine académique qu'institutionnel, en faveur d'une ville plus saine et plus durable.

Chapitre 2 :

Analyse spatio-temporelle de la qualité de l'air à Oran à l'aide de google earth engine

Chapitre 2 : Analyse spatio-temporelle de la qualité de l'air à Oran à l'aide de google earth engine :

2.1 Introduction :

La pollution atmosphérique constitue aujourd'hui l'un des enjeux environnementaux majeurs dans les milieux urbains, notamment dans les pays en développement où la croissance démographique et l'urbanisation s'intensifient rapidement. Les concentrations élevées de polluants atmosphériques, tels que le dioxyde d'azote (NO_2), l'ozone troposphérique (O_3), les particules fines ($PM_{2.5}$, PM_{10}), résultant principalement du transport, de l'industrie et du chauffage urbain, affectent non seulement la santé humaine, mais également la qualité de vie et les équilibres écosystémiques. Dans ce contexte, l'analyse spatio-temporelle de la qualité de l'air apparaît comme un outil essentiel pour comprendre les dynamiques de pollution et proposer des actions ciblées.

Le suivi de la pollution atmosphérique requiert aujourd'hui des outils capables de traiter un volume important de données, avec une précision spatiale et temporelle suffisante. C'est dans cette optique que la plateforme **Google Earth Engine (GEE)** se présente comme un outil innovant et performant. GEE est une interface cloud de traitement d'images satellitaires et de données géospatiales à grande échelle. Elle permet non seulement l'accès à des archives riches en données (telles que celles issues de **Sentinel-5P** – capteur **TROPOMI**), mais aussi leur traitement rapide et reproductible à travers des scripts **JavaScript** ou **Python**. Son utilisation permet de cartographier les concentrations de polluants atmosphériques, d'en suivre l'évolution dans le temps, et d'en croiser les résultats avec d'autres données spatiales (démographie, transport, occupation du sol, etc.).

Le choix de la ville d'Oran comme cas d'étude se justifie par sa position géographique stratégique, son rôle économique et industriel croissant, ainsi que par l'évolution marquée de son tissu urbain au cours des dernières décennies. L'urbanisation rapide, la pression démographique, la densité du trafic routier et l'activité portuaire y génèrent des niveaux de pollution préoccupants, faisant d'Oran un terrain pertinent pour ce type d'analyse.

Ce chapitre présente ainsi une étude détaillée de la qualité de l'air à Oran à travers une approche spatio-temporelle fondée sur les données satellitaires et au sol. Il commence par une présentation des différentes sources de données mobilisées (données satellitaires, stations météorologiques, données climatiques), suivie de la méthodologie adoptée. Ensuite, les analyses sont articulées autour de trois axes principaux : l'impact de l'expansion urbaine et de

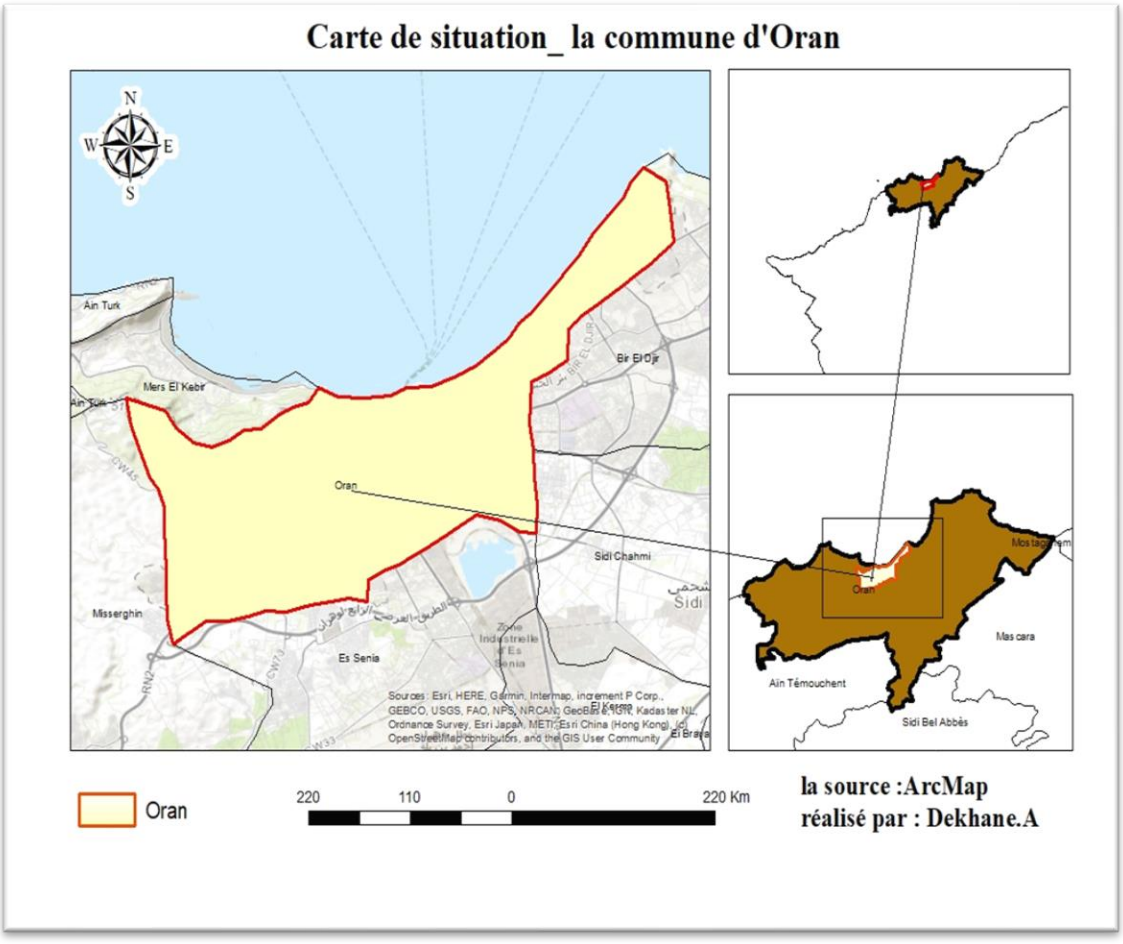
la croissance démographique, l'effet des infrastructures de transport, et enfin, l'évolution des concentrations des principaux polluants atmosphériques dans l'espace et dans le temps.

2.2Données et méthodologie :

2.2.1 Présentation de la zone d'étude localisation géographique (carte, coordonnées):

La commune d'Oran : située au nord-ouest de l'Algérie (35°40' N, 0°37' O), constitue le centre administratif, économique et démographique de la wilaya du même nom. Elle est délimitée au nord par la mer méditerranée, ce qui lui confère une position stratégique en tant que ville portuaire. Avec une forte densité de population et une urbanisation rapide, Oran présente une concentration importante d'infrastructures de transport (routes nationales, port, gares), ainsi qu'une activité économique et industrielle intense. Ces caractéristiques en font un territoire urbain fortement exposé aux émissions anthropiques, ce qui justifie son choix en tant que zone d'étude pour l'analyse spatio-temporelle de la qualité de l'air à travers l'imagerie satellitaire et les données au sol.

Figure 2:Localisation de la commune d'Oran



2.2.2 Données météorologiques issues de la modélisation avec R :

L'objectif initial de cette étude était de collecter des données météorologiques locales auprès des services compétents. Cependant, en raison de contraintes administratives et financières, l'accès direct à ces informations s'est révélé difficile. Par conséquent, une alternative a été adoptée en recourant à la modélisation climatique à l'aide du logiciel **R**, un outil puissant utilisé pour générer des séries temporelles climatiques à partir de modèles mathématiques. Cette méthode a permis d'obtenir des données fiables pour la période de 2019 à 2023, couvrant des variables essentielles telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent et les précipitations. Ces données simulées seront utilisées dans cette étude pour analyser l'impact des conditions climatiques sur la qualité de l'air dans la commune d'Oran.

Figure 3:schéma de processus de modélisation climatique avec R



➢ **Présentation des moyennes annuelles des variables climatiques (2019–2023) :**

Les moyennes annuelles des quatre variables climatiques principales à Oran, entre 2019 et 2023, sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les données ont été extraites à l'aide de la package NASA POWER :

Tableau 5: Données climatiques annuelles à Oran (2019-2023)

Année	Température moyenne (°C)	Humidité moyenne (%)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Précipitations moyennes (mm)
2019	18.75	64.45	3.14	341.64
2020	24.95	63.00	2.92	342.37
2021	19.43	63.56	3.03	377.41
2022	19.09	60.63	2.88	308.06
2023	20.28	58.94	2.86	263.17

➢ **Représentation graphique des paramètres climatiques :**

Les courbes suivantes illustrent l'évolution des paramètres climatiques (température, humidité, vitesse du vent et précipitation) à Oran pour la période de 2019 à 2023. Ces graphiques ont été générés à partir des données climatiques traitées à l'aide du logiciel R, en utilisant principalement le package ggplot2 pour la visualisation des données. Ces visualisations permettent d'observer les tendances climatiques sur plusieurs années, offrant ainsi une vue d'ensemble des variations saisonnières et annuelles des différents paramètres :

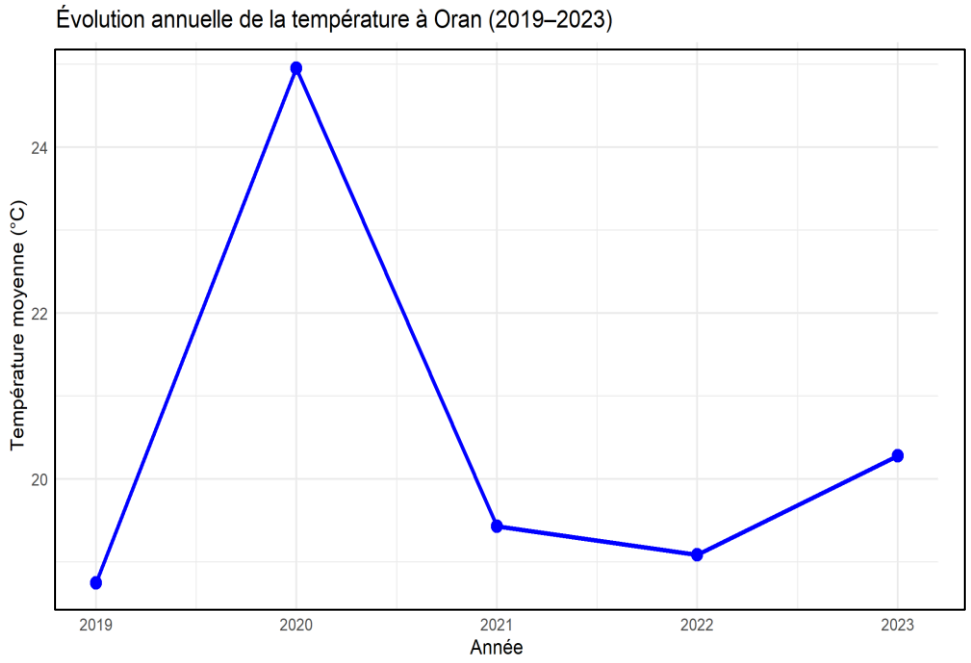


Figure 4: Evolution annuelle de la température à Oran (2019-2023)

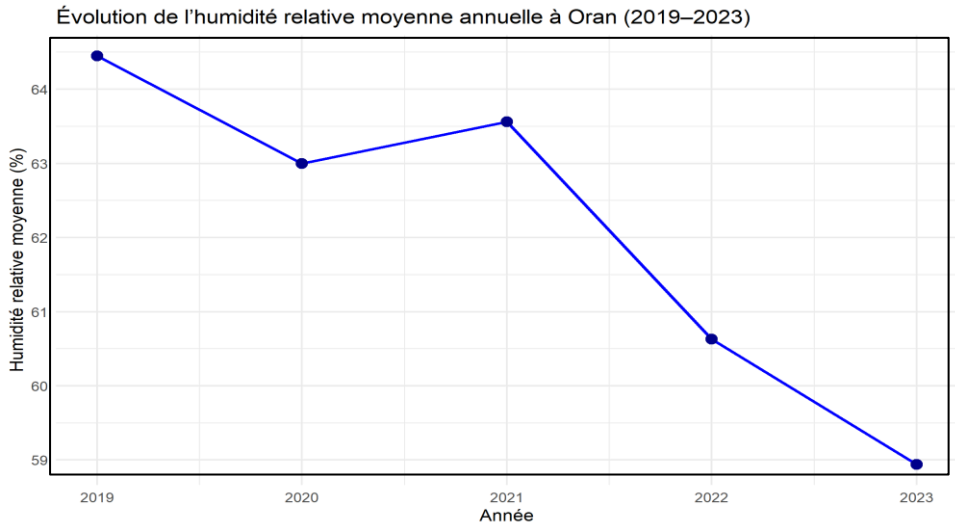


Figure 5:Evolution de l'humidité relative moyenne annuelle à Oran (2019-2023)

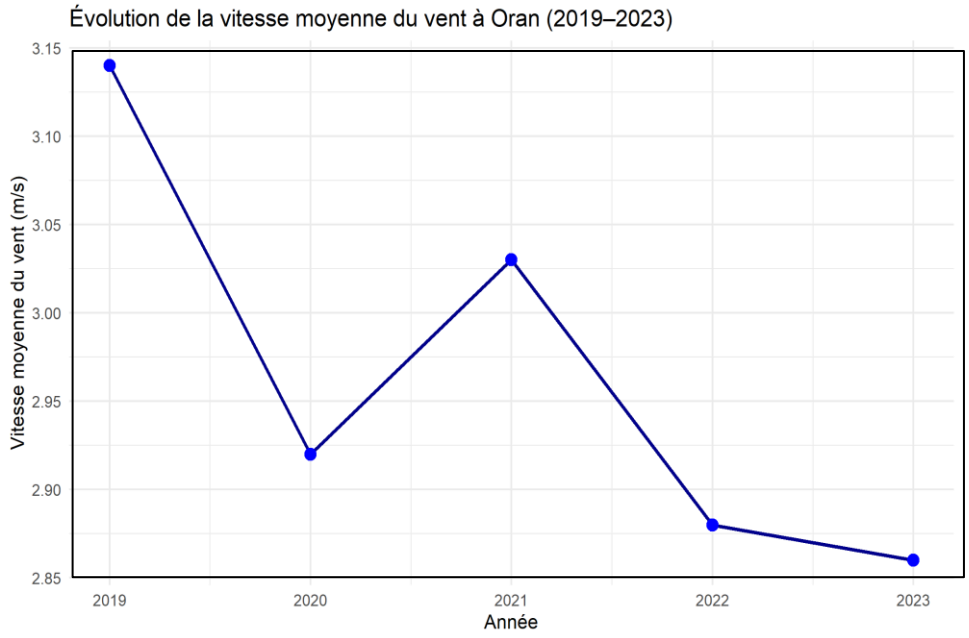


Figure 6: Evolution de la vitesse moyenne du vent à Oran (2019-2023)

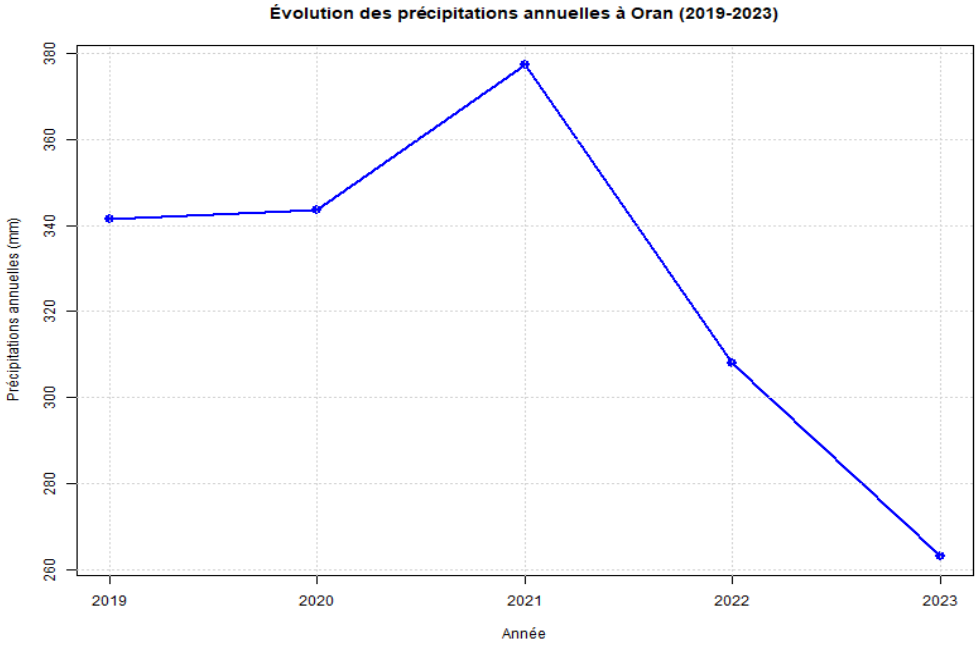


Figure 7: Evolution des précipitation moyennes a Oran (2019-2023)

L'analyse des données climatiques sur la période 2019-2023 permet de dégager plusieurs tendances susceptibles d'influencer la qualité de l'air. De manière générale, un réchauffement climatique est constaté au cours de ces cinq années, accompagné d'une diminution progressive de l'humidité relative et des précipitations.

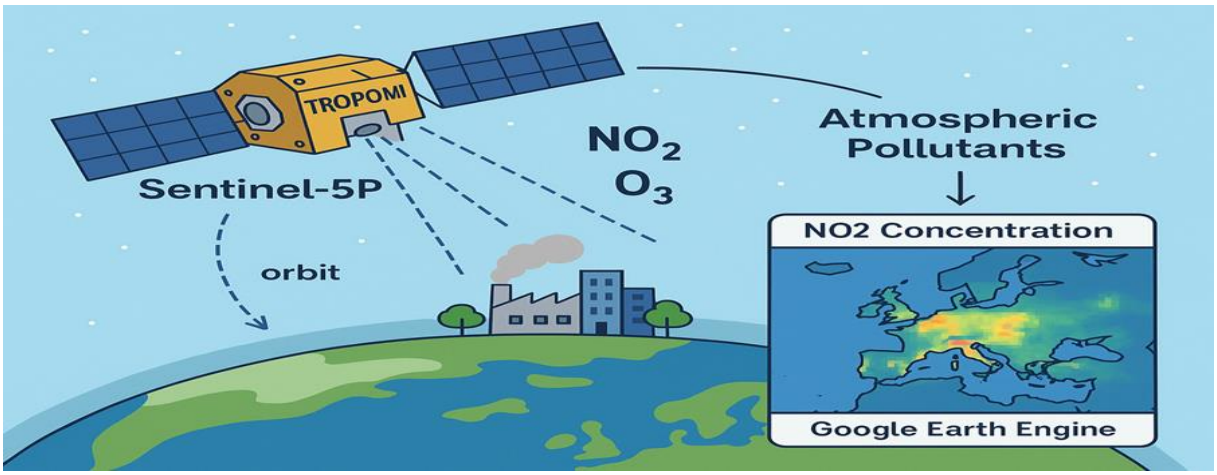
Ces variations climatiques modifient la dynamique de dispersion des polluants atmosphériques : les périodes de forte chaleur et de faible humidité favorisent la stagnation de l'air, limitant ainsi la dispersion des contaminants. Ce phénomène est particulièrement accentué durant les saisons sèches, où la faible vitesse des vents contribue à l'accumulation des polluants dans les basses couches de l'atmosphère.

L'année 2020, marquée par la pandémie de la Covid-19 et les restrictions imposées par les mesures de confinement, introduit une discontinuité notable dans cette analyse. Bien que la réduction des activités humaines, en particulier du trafic routier et des émissions industrielles, ait entraîné une baisse significative des rejets polluants, cette diminution ne s'est pas nécessairement traduite par une amélioration tangible de la qualité de l'air. Ce constat souligne l'importance de considérer non seulement les émissions anthropiques, mais aussi les paramètres climatiques, qui peuvent jouer un rôle déterminant dans l'amplification ou l'atténuation de l'impact des polluants atmosphériques.

Ainsi, l'étude des données climatiques permet d'approfondir la compréhension des variations temporelles influençant la pollution de l'air. Les sections suivantes se concentreront sur l'analyse détaillée des concentrations des polluants atmosphériques et leur corrélation avec les conditions météorologiques afin de préciser les dynamiques spatio-temporelles de la pollution de l'air dans la région d'Oran au cours de la période étudiée.

2.2.3 Données satellitaires (Sentinel-5P – TROPOMI) :

Figure 8:Surveillance de la qualité de l'air par satellite Sources : l'intelligence artificielle



Le satellite **Sentinel-5P**, développé dans le cadre du programme **Copernicus de l'Union européenne**, constitue une avancée technologique significative dans la surveillance de la qualité de l'air à l'échelle mondiale. Équipé du capteur TROPOMI (**TROPOspheric Monitoring Instrument**), cet instrument de haute précision permet de mesurer les concentrations de divers polluants atmosphériques, notamment le dioxyde d'azote (NO_2) et l'ozone (O_3), qui sont des indicateurs clés de la qualité de l'air. Grâce à son orbite polaire et à sa capacité de surveillance continue, TROPOMI fournit des données spatio-temporelles de haute résolution, offrant ainsi une couverture détaillée des variations de la pollution atmosphérique. Ces données sont accessibles via la plateforme **Google Earth Engine** (GEE), un environnement cloud conçu pour le traitement et l'analyse de vastes volumes de données géospatiales. L'exploitation de GEE permet d'obtenir des résultats précis et reproductibles, facilitant ainsi l'étude des tendances de la pollution atmosphérique et ses impacts sur la santé publique et les écosystèmes. Les données ont été traitées avec **une résolution de 30 mètres**.

En complément des données Sentinel-5P, l'indice AAI (Absorbing Aerosol Index), un paramètre pertinent pour évaluer la présence de particules fines principalement causées par l'activité humaine en milieu urbain, a été utilisé pour analyser la pollution atmosphérique liée aux aérosols absorbants, en complément des données Sentinel-5P. Les données de l'indice (AAI), basées sur les observations du capteur TROPOMI, offrent une résolution temporelle quotidienne et une couverture spatiale étendue. Disponibles sur la plateforme GEE, elles permettent une analyse approfondie de la dynamique des aérosols absorbants, améliorant ainsi notre compréhension de la situation environnementale de la commune d'Oran.

- **Extraction et analyse spatio-temporelle des concentrations annuelles des polluants atmosphériques à Oran (2019–2023) – Données sentinel-5P :**

Dans le cadre de cette étude, une analyse détaillée a été réalisée pour évaluer l'évolution spatio-temporelle des concentrations annuelles de plusieurs polluants atmosphériques dans la ville d'Oran durant la période 2019–2023, à savoir : le dioxyde d'azote (NO_2), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone troposphérique (O_3), le dioxyde de soufre (SO_2) et l'indice AAI (Absorbing Aerosol Index).

Parmi les polluants analysés, le dioxyde d'azote (NO_2) est un indicateur important de la pollution, principalement liée au trafic routier et aux activités industrielles. En analysant son évolution annuelle, nous pouvons mieux comprendre l'impact des sources d'émission sur la ville d'Oran.

✓ **Estimations annuelles de la concentration du dioxyde d'azote (NO_2) à Oran (2019–2023) :**

Tableau 6: Données du dioxyde d'azote (NO_2) issues de sentinel-5P, exprimées initialement en mol/m^2puis converties en $\mu g/m^3$

Année	$NO_2(mol/m^2)$	Calcul ($\mu g/m^3$)	Résultat
2019	0.0001015	$\frac{0.0001015 \times 46.0055 \times 10^6}{2000}$	**≈ 2.33**
2020	0.0001020	$\frac{0.0001020 \times 46.0055 \times 10^6}{2000}$	**≈ 2.35**
2021	0.0001066	$\frac{0.0001066 \times 46.0055 \times 10^6}{2000}$	**≈ 2.45**
2022	0.0001060	$\frac{0.0001060 \times 46.0055 \times 10^6}{2000}$	**≈ 2.44**
2023	0.0001148	$\frac{0.0001148 \times 46.0055 \times 10^6}{2000}$	**≈ 2.64**

Méthode de conversion :

Les concentrations initialement exprimées en mol/m² ont été converties en µg/m³ afin d'être comparables aux normes internationales. La conversion a été réalisée à l'aide de la formule simplifiée :

$$\boldsymbol{concentration}\ (\mu g/m^3) = \frac{10^6 \times M \times C}{H}$$

C : concentration, en mol/m² (valeur satellite).

M : masse molaire du polluant (g/mol).

H : Hauteur de la colonne atmosphérique (en mètres, 2000 mètres).

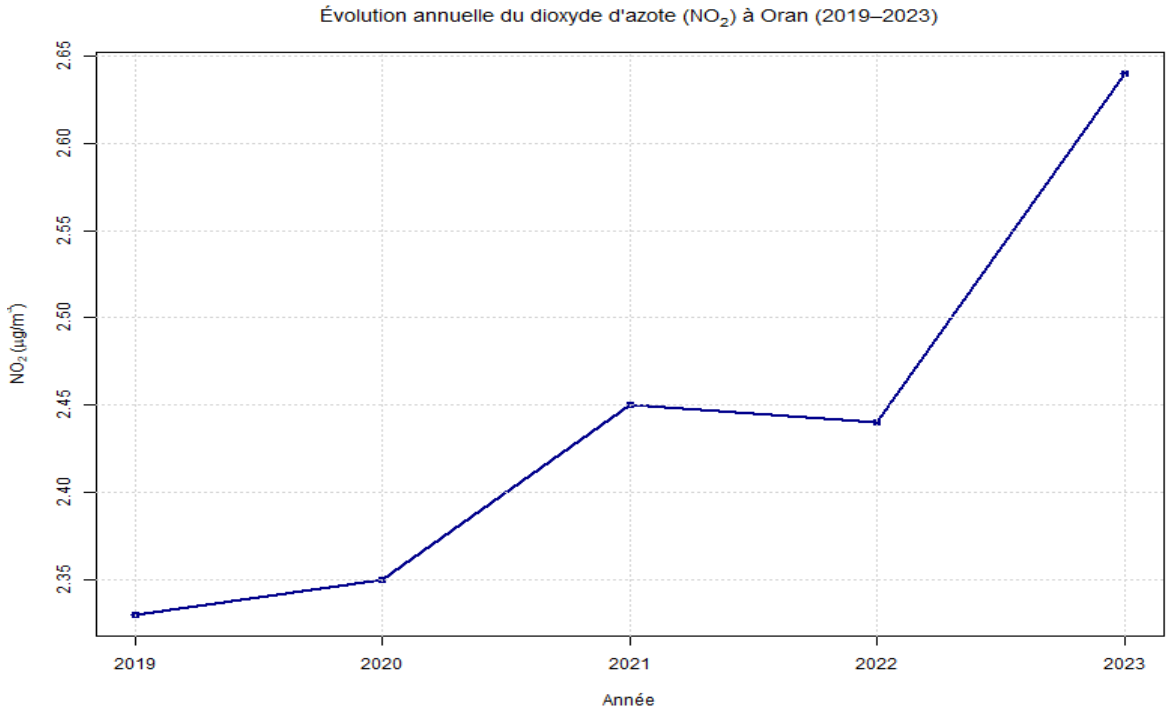
10^6 : Facteur de conversion de grammes en microgrammes (1 g = 10^6 µg).

Remarque (pour NO_2) : hauteur de la colonne atmosphérique estime le taux de conversion du (NO_2) à **2 000 m**, ce qui est une approximation courante dans les études Sentinel-5P et affecte l'ampleur des concentrations calculées**.**

Le graphique ci-dessous montre l'évolution des concentrations annuelles de NO_2 dans la ville d'Oran entre 2019 et 2023. Il illustre l'augmentation progressive de la concentration de ce polluant au fil des années. On constate une tendance générale à la hausse des concentrations de

NO_2, qui peut être attribuée à divers facteurs, notamment l'augmentation du trafic routier et des activités industrielles dans la région.

Figure 9:Evolution annuelle de la concentration du dioxyde d'azote (NO_2) à Oran (2019-2023)



✓ **Estimations annuelles de la concentration du monoxyde de carbone (CO) à Oran (2019-2023) :**

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz polluant principalement émis par la combustion incomplète des combustibles fossiles, notamment dans le secteur des transports. Comme pour le dioxyde d'azote (NO_2), sa concentration annuelle a été estimée à partir des données du satellite Sentinel-5P (produit TROPOMI), puis convertie en µg/m³ à l'aide de la formule mentionnée ci-dessus, en supposant une hauteur de colonne atmosphérique constante.

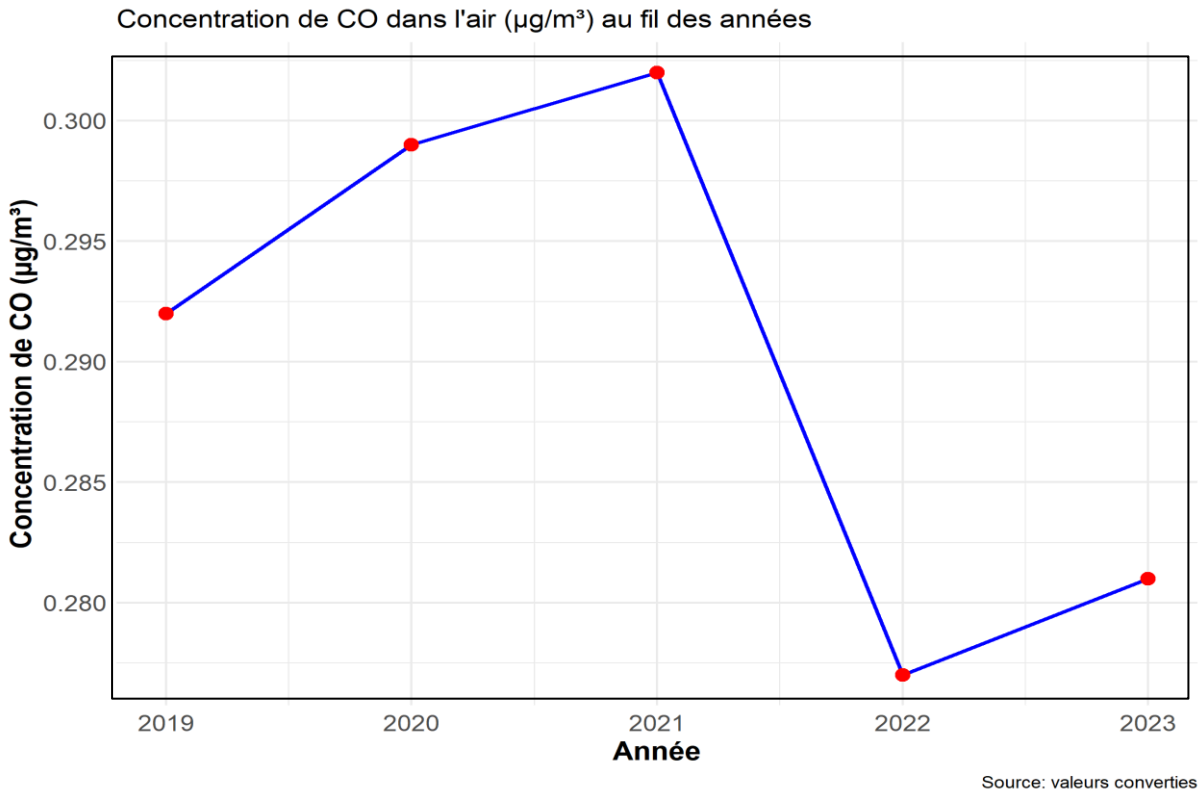
Remarque (pour CO) : hauteur de la colonne atmosphérique estime le taux de conversion du **CO à 3 000 m**, La masse molaire utilisée pour le CO est de 28.010 g/mol, conformément à sa formule chimique (CO). Ce qui reste une approximation courante dans les traitements des données sentinel-5P.

Tableau 07 : données du monoxyde de carbone (CO) issues de sentinel-5P, exprimées

Tableau 7:données du monoxyde de carbone (CO) issues de Sentinel -5P, exprimées initialement en mol/m² puis converties en µg/m³.

Année	CO (mol/m²)	Calcul (µg/m³)	Résultat
2019	0.000031	$\frac{0.000031 \times 28.010 \times 10^6}{3000}$	≈ 0.292
2020	0.000032	$\frac{0.000032 \times 28.010 \times 10^6}{3000}$	≈ 0.299
2021	0.000032	$\frac{0.000032 \times 28.010 \times 10^6}{3000}$	≈ 0.302
2022	0.000030	$\frac{0.000030 \times 28.010 \times 10^6}{3000}$	≈ 0.277
2023	0.000030	$\frac{0.000030 \times 28.010 \times 10^6}{3000}$	≈ 0.281

Figure 10:Evalution annuelle de la concentration du monoxyde de carbone (CO) à Oran (2019-2023)



L'évolution du monoxyde de carbone (CO) entre 2019 et 2023 montre **une légère augmentation** au début puis **une diminution progressive**. Ce comportement peut s'expliquer

par les propriétés **physico-chimiques** du monoxyde de carbone, qui a tendance à se disperser dans **les couches atmosphériques supérieures** et est donc particulièrement sensible aux **conditions météorologiques.**

En 2020, malgré la réduction des activités humaines provoquée par l'épidémie, les températures élevées et les faibles précipitations ont encore pu limiter la dilution du monoxyde de carbone. Depuis 2021, l'augmentation des précipitations et la baisse des températures ont favorisé sa diffusion, entraînant une baisse des concentrations mesurées.

Ces résultats indiquent que les facteurs climatiques (température, humidité, précipitations) et les facteurs anthropiques interagissent étroitement dans **la dynamique des polluants** atmosphériques à Oran.

- ✓ **Estimations annuelles de la concentration d'ozone (O_3) à Oran (2019-2023) :**

L'ozone (O_3) est un gaz polluant essentiel à l'atmosphère, notamment dans la stratosphère, où il forme la couche d'ozone qui protège la terre des rayons ultraviolets. Cependant, à plus basse altitude (troposphère), il agit comme polluant secondaire, principalement formé par des réactions chimiques entre les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV), sous l'influence de la chaleur solaire. À ces niveaux, l'activité humaine, notamment dans les secteurs des transports et de l'industrie, est étroitement liée à l'ozone. De plus, l'urbanisation et la croissance démographique augmentent les sources d'émission de ces polluants, ce qui entraîne une concentration plus élevée d'ozone.

La concentration annuelle d'ozone a été estimée à l'aide des données du satellite Sentinel-5P (produites par TROPOMI), puis convertie en µg/m³ à l'aide de la formule appropriée, en supposant une hauteur de colonne atmosphérique constante.

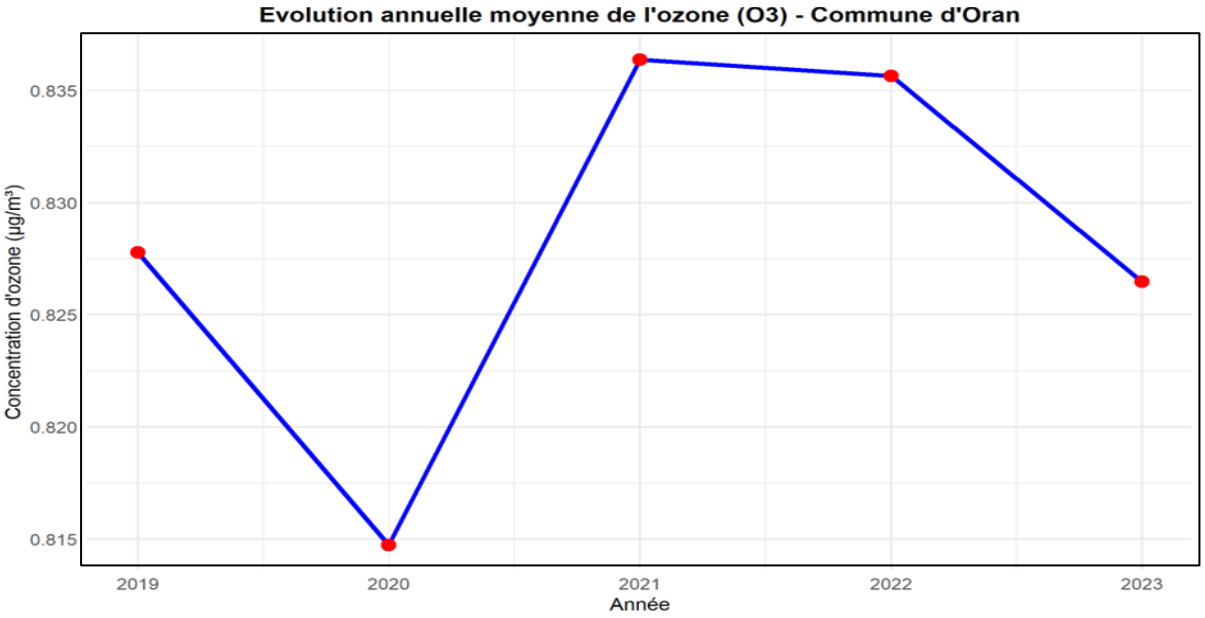
Remarque (pour O_3) : hauteur de la colonne atmosphérique estime le taux de conversion de **l'O3 à 8000 m**, la masse molaire utilisée pour le O_3 est de 48000 g/mol, conformément à sa formule chimique (O_3). Ce qui reste une approximation courante dans les traitements des données Sentinel-5P.

Tableau 8:données d'ozone (O_3) issues de sentinel-5P, exprimées initialement en mol/m² puis converties en µg/m³.

Année	O_3 (mol/m²)	Calcul (µg/m³)	Résultat
2019	0.13796	$\frac{0{,}13796 \times 48000}{8000}$	**≈ 0.82776**

2020	0.13579	$\frac{0{,}13579 \times 48000}{8000}$	**≈ 0.81474**
2021	0.13939	$\frac{0{,}13939 \times 48000}{8000}$	**≈ 0.83634**
2022	0.13927	$\frac{0{,}13927 \times 48000}{8000}$	**≈ 0.83562**
2023	0.13775	$\frac{0{,}13775 \times 48000}{8000}$	**≈ 0,8265**

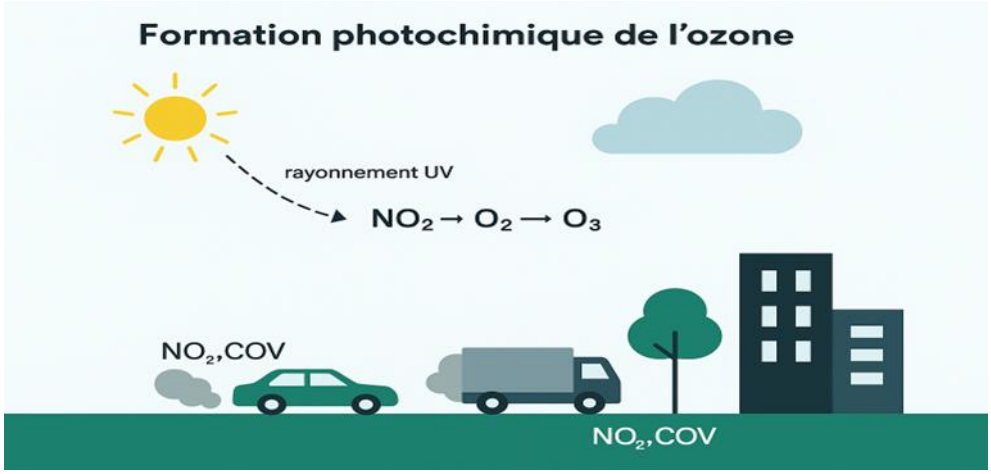
Figure 11:Evalution annuelle de la concentration d'ozone (O_3) à Oran (2019-2023)



Les données issues des images Sentinel-5P révèlent une augmentation progressive de la concentration d'ozone (O_3) à Oran entre 2019 et 2023, résultant d'une interaction complexe entre les conditions météorologiques et l'intensification des activités humaines. Les hausses de température, notamment celle observée en 2020, ont favorisé les réactions photochimiques entre les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV), conduisant à une production accrue d'ozone troposphérique. Par ailleurs, la baisse relative de l'humidité et la faiblesse persistante des vents au cours de la période étudiée ont limité la dispersion des polluants, facilitant ainsi leur accumulation près de la surface. La diminution progressive des précipitations a également contribué à l'affaiblissement des mécanismes naturels de purification de l'air. En outre, l'urbanisation rapide et la croissance démographique ont entraîné une augmentation notable des émissions de précurseurs de l'ozone, notamment le dioxyde d'azote (NO_2), principalement issus des transports et des activités industrielles. Cette évolution met en

évidence l'importance d'intégrer à la fois les sources locales d'émissions et les paramètres climatiques dans l'analyse de la qualité de l'air en milieu urbain. Le graphique ci-dessous illustre clairement les résultats de cette analyse en montrant l'évolution des concentrations annuelles moyennes d'ozone à Oran.

Figure 12:formation photochimique de l'ozone (O_3). Source : l'intelligence artificielle.



- ✓ **Estimations annuelles de la concentration de dioxyde de soufre (SO_2) à Oran (2019-2023) :**

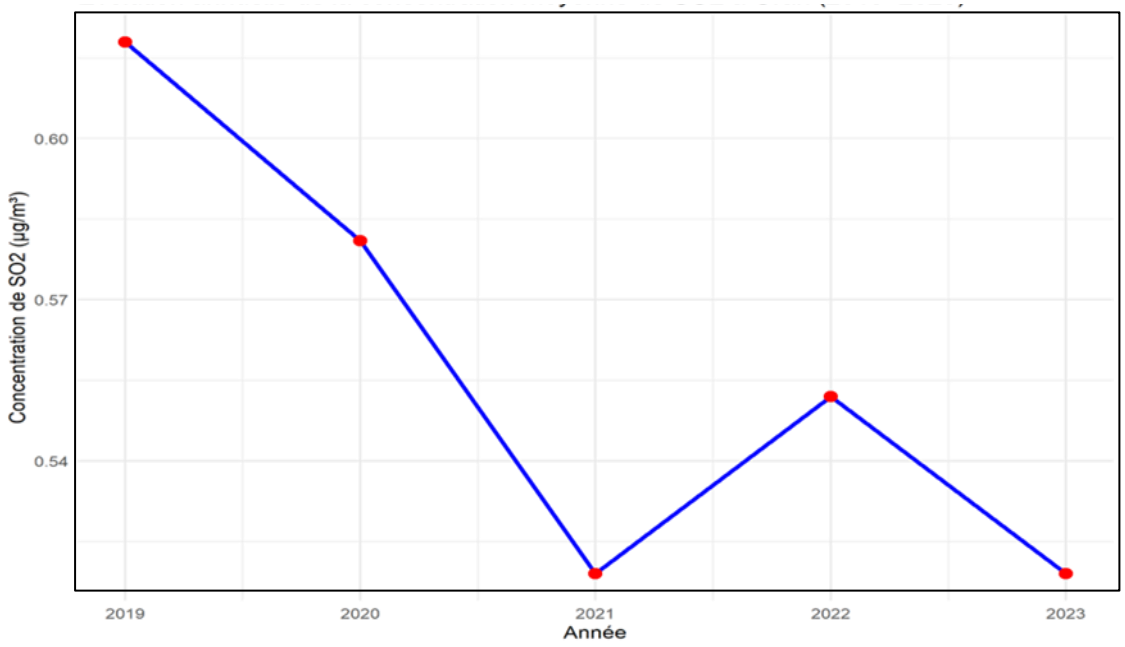
Le dioxyde de soufre (SO_2) est un gaz polluant produit principalement par la combustion du charbon et du pétrole. C'est un indicateur d'activité industrielle et contribue à la formation de pluies acides. Ce gaz peut affecter la santé respiratoire, en particulier chez les personnes sensibles. La surveillance de sa concentration est essentielle pour évaluer la qualité de l'air dans les zones urbaines.

Remarque pour (SO_2) : hauteur de la colonne atmosphérique utilisée pour l'estimation de la concentration du dioxyde de soufre (SO_2) a été supposée égale à **1000 m**. La masse molaire adoptée pour le SO_2 est de 64,066 g/mol, conformément à sa formule chimique (SO_2). Cette approche constitue une approximation couramment utilisée dans le traitement des données issues du satellite Sentinel-5P.

Tableau 9: données du dioxyde de soufre (SO_2) issues de sentinel-5P, exprimées initialement en mol/m² puis converties en µg/m³.

Année	SO_2 (mol/m^2)	Calcul (µg/m³)	Résultat
2019	0.0002365	$\frac{0{,}0002365 \times 64{,}066 \times 101325}{1000 \times 298{,}15 \times 8{,}314}$	≈ **0,618**
2020	0.0002222	$\frac{0{,}0002222 \times 64{,}066 \times 101325}{1000 \times 298{,}15 \times 8{,}314}$	≈ **0,581**
2021	0.0001982	$\frac{0{,}0001982 \times 64{,}066 \times 101325}{1000 \times 298{,}15 \times 8{,}314}$	≈ **0,519**
2022	0.0002111	$\frac{0{,}0002111 \times 64{,}066 \times 101325}{1000 \times 298{,}15 \times 8{,}314}$	≈ **0,552**
2023	0.0001984	$\frac{0{,}0001984 \times 64{,}066 \times 101325}{1000 \times 298{,}15 \times 8{,}314}$	≈ **0,519**

Figure 13: Evolution annuelle de la concentration de dioxyde de soufre (SO2) à Oran (2019-2023)



Les concentrations de dioxyde de soufre (SO_2) à Oran montrent une évolution influencée par les activités humaines et les conditions climatiques. Au début, les niveaux étaient élevés en raison de l'intense activité industrielle et urbaine, avec des conditions atmosphériques peu favorables à la dispersion des polluants. Ensuite, une baisse notable des concentrations a été observée, probablement en raison de la réduction de l'activité économique pendant la crise

sanitaire, accompagnée d'un meilleur niveau de précipitations qui a aidé à éliminer les polluants naturellement. À mesure que les activités humaines ont repris, surtout dans les secteurs du transport et de la construction, les concentrations de SO_2 ont légèrement augmenté. Cela montre l'impact direct du redémarrage des activités urbaines sur la qualité de l'air. Ce constat souligne l'importance de comprendre l'interaction entre les conditions météorologiques et les sources locales de pollution pour évaluer la qualité de l'air en milieu urbain.

- ✓ **Estimations annuelles de la concentration de l'indice AAI (Absorbing Aerosol Index) à Oran (2019-2023) :**

Remarque sur l'indice AAI : l'indice d'aérosol absorbant **(AAI)** est dérivé des mesures ultraviolettes du satellite Sentinel-5P et détecte la présence d'aérosols absorbants dans l'atmosphère, tels que la suie ou le smog. L'indice n'a pas d'unités et reflète les changements dans le spectre qui indiquent la probabilité de la présence de particules fines.

Les valeurs négatives (AAI < 0) indiquent la présence d'aérosols réfléchissants tels que la poussière ou le brouillard. Ces particules dispersent la lumière du soleil dans l'espace, réduisant la quantité d'énergie atteignant la surface de la Terre et provoquant un refroidissement localisé temporaire.

Les valeurs positives (AAI > 0) indiquent la présence d'aérosols absorbants, tels que la fumée ou la suie. Ces particules retiennent une partie de l'énergie solaire en absorbant le rayonnement, ce qui provoque le réchauffement de la basse atmosphère.

Ces deux situations sont des phénomènes de pollution de l'air. Malgré leurs effets thermiques opposés, ces aérosols, à la fois absorbants et réfléchissants, constituent une menace pour la santé publique et ont un impact sur la qualité de l'air. Dans les environnements urbains densément peuplés comme Oran, l'indice AAI est un outil précieux pour suivre la distribution des particules anthropiques et pour mieux comprendre leur impact sur l'environnement et le climat local.

Tableau 10: Évolution annuelle de l'AAI moyen pour la commune d'Oran (2019–2023).

Année	Moyenne de l'indice AAI
2019	-0,8286
2020	-1,0744
2021	-0,4700

2022	0,2355
2023	0,1247

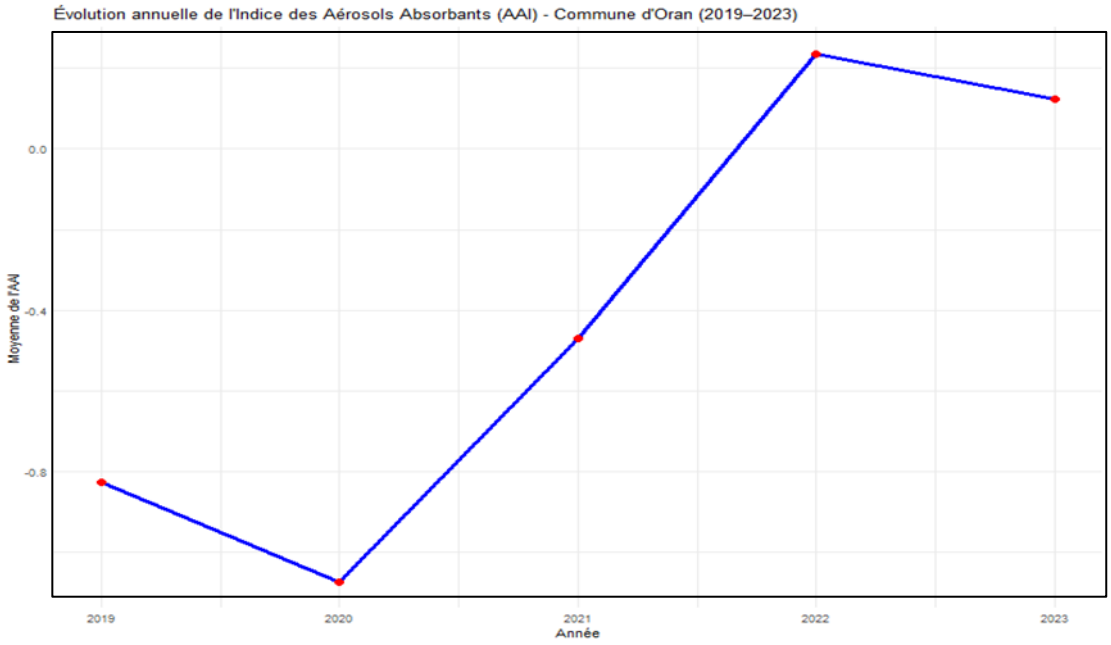


Figure 14: Evolution annuelle des AAI à Oran (2019-2023)

Entre 2019 et 2021, la ville d'Oran a enregistré des valeurs négatives de l'indice AAI, reflétant la dominance des aérosols réfléchissants (tels que la poussière ou le brouillard) dans l'atmosphère. Cette situation coïncide avec des conditions météorologiques d'humidité relativement élevée (plus de 63%) et de fortes précipitations. Ces facteurs favorisent la formation et la persistance de particules réfléchissantes naturelles ou urbaines. En revanche, à partir de 2022, on observe un renversement : les valeurs AAI deviennent positives, indiquant une présence accrue d'aérosols absorbants, notamment de suie ou de fumée. Cette évolution s'accompagne d'une diminution marquée de l'humidité et des précipitations, ce qui limite le lessivage des polluants dans l'atmosphère et favorise leur accumulation. Ce changement traduit une dégradation de la qualité de l'air, marquée par une pollution plus anthropique, potentiellement plus nocive pour la santé publique et le climat local.

2.3Impact de l'expansion urbaine et de la croissance démographique :

L'expansion urbaine rapide et la croissance démographique sont deux facteurs clés qui affectent la dynamique de l'environnement urbain. À Oran, cette tendance s'est intensifiée ces dernières

années, entraînant des changements majeurs dans l'utilisation des sols, la densité du bâti et la qualité de l'air. Afin de mieux comprendre ces transitions, une analyse spatio-temporelle a été réalisée à l'aide d'images satellites et d'indicateurs dérivés.

2.3.1 Analyse de l'évolution de l'urbanisation d'Oran à l'aide d'images satellitaires :

L'évolution de l'urbanisation dans la commune d'Oran a été étudiée à l'aide d'images satellites provenant du capteur **Sentinel-2**. Pour mesurer la superficie bâtie, **l'indice NDBI** (Normalized Différence Building Index) a été calculé chaque année durant la période d'analyse (2019-2023), en se concentrant sur les mois d'été (juin à août) afin de minimiser l'impact de la couverture nuageuse et de profiter de conditions d'observation optimales.

Une image NDBI médiane est produite chaque année et la valeur moyenne de l'indice au niveau urbain est extraite. Ces moyennes annuelles fournissent une vue d'ensemble sur l'évolution de la densité des constructions au fil du temps. Les résultats sont également présentés sous forme de cartes stratifiées, mettant en lumière les changements spatiaux de l'urbanisation au cours des années.

Ces données permettent de mesurer l'évolution de l'urbanisation de manière quantitative. Pour illustrer cette dynamique sur le plan spatial, la figure suivante présente la superposition des cartes NDBI pour la période 2019–2023.

Tableau 11:Moyennes annuelles de l'indice NDBI (2019–2023) – Résultats obtenus par les étudiantes à partir des données Sentinel-2 sur la plateforme Google Earth Engine

Année	Moyenne annuelle du NDBI
2019	0.0968
2020	0.0843
2021	0.0979
2022	0.0629
2023	0.0720

Les données révèlent une augmentation de l'activité de construction en 2019 et 2021, comme en témoignent les valeurs relativement élevées du NDBI (respectivement 0,0968 et 0,0978). Cette tendance est corroborée par la carte superposée (Figure 14), qui montre visuellement l'expansion spatiale des zones construites. En 2020 et 2022, on observe une diminution du NDBI, probablement en raison des effets de la pandémie de COVID-19 en 2020 et de

l'achèvement de certains projets d'aménagement urbain en 2022. En revanche, une légère remontée a été constatée en 2023, suggérant une reprise des activités de construction. Pour soutenir cette analyse, le calcul de l'indice NDVI a montré des changements qui confirment les tendances observées dans l'expansion urbaine.

Figure 15: Carte superposée du NDBI dans la commune d'Oran (2019-2023)

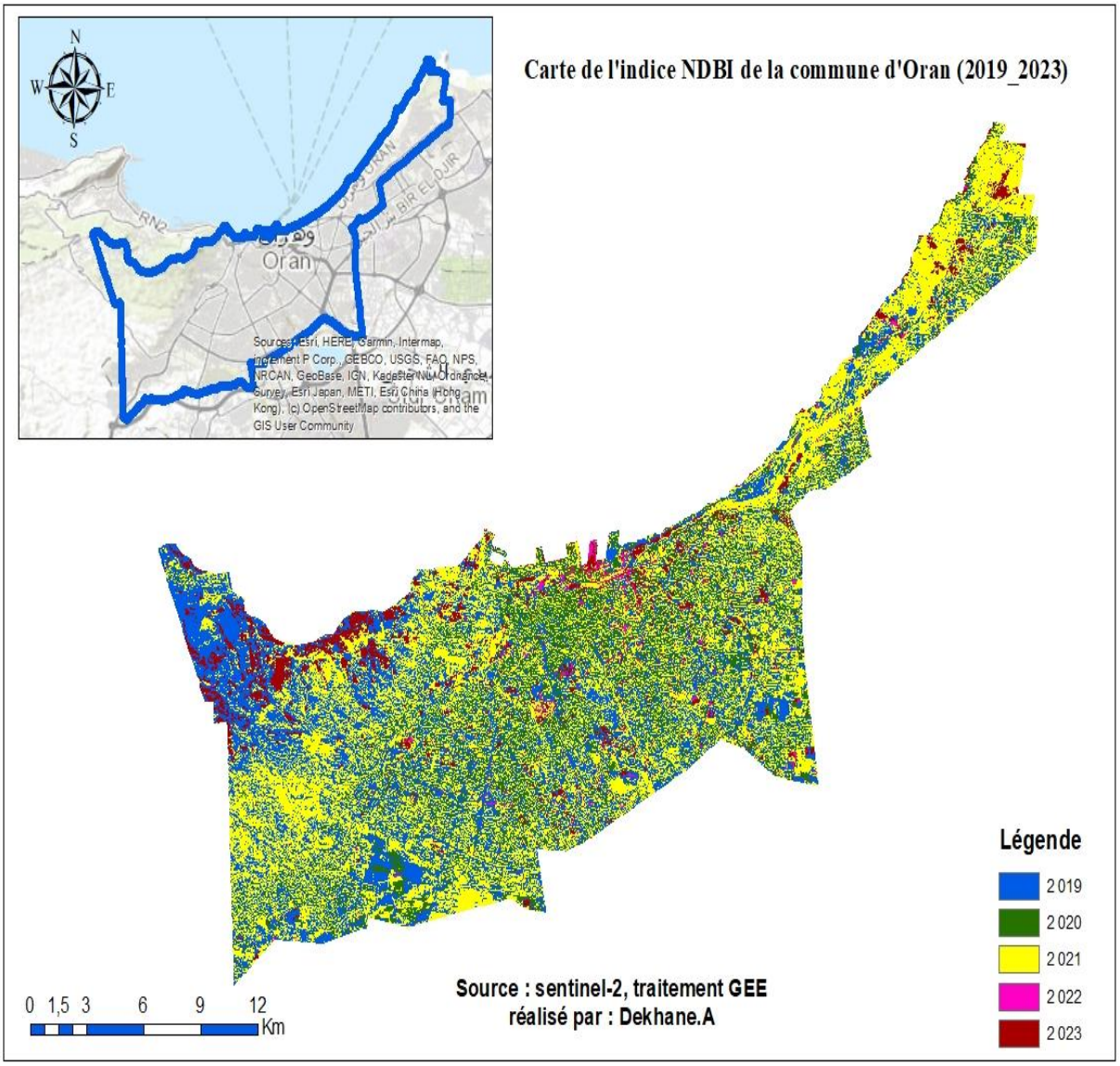


Tableau 12: Moyennes annuelles de l'indice NDVI (2019–2023) – Résultats obtenus par les étudiantes à partir des données Sentinel-2 sur la plateforme Google Earth Engine

Année	Valeur Moyenne du NDVI
2019	0.1381
2020	0.1439

2021	0.1394
2022	0.1011
2023	0.0795

Les résultats de l'indice NDVI révèlent une baisse continue de la couverture végétale, surtout au cours des années 2022 et 2023. Cette tendance illustre les effets de l'extension urbaine sur les espaces verts. Elle soutient donc les observations antérieures basées sur l'indice NDBI, confirmant que le développement urbain à Oran s'est accompagné d'une diminution du couvert végétal.

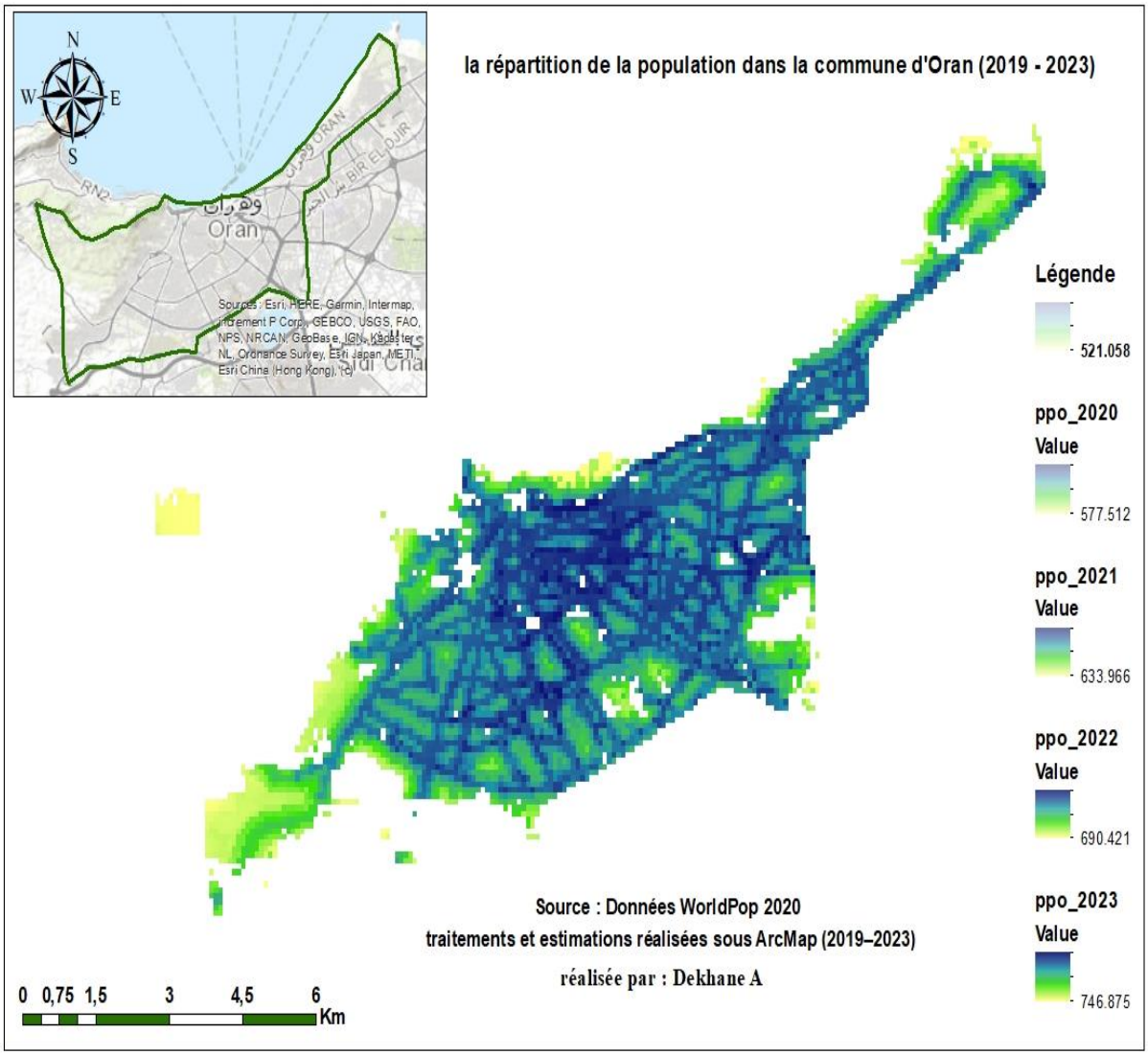
2.3.2 Corrélation entre l'étalement urbain et la densité de population dans la commune d'Oran :

Dans le contexte de cette recherche, nous avons étudié la dynamique de l'urbanisation dans la commune d'Oran en la corrélant avec la progression de la densité de population. Pour cela, des cartes de l'indice de développement bâti (NDBI) et de la répartition spatiale de la population ont été réalisées à partir **de données satellites** et des informations fournies par le projet **WorldPop**. L'examen des cartes révèle une tendance générale d'expansion urbaine accompagnée d'une augmentation progressive de la population à l'échelle de la commune entière. Cette évolution simultanée entre l'extension de la structure urbaine et la hausse de la population suggère une connexion directe entre ces deux phénomènes.

La croissance de la population et l'expansion urbaine observées dans la commune d'Oran renforcent l'idée d'une augmentation des émissions de certains polluants atmosphériques. Notamment, l'accroissement du nombre d'habitants entraîne une intensification des activités domestiques (chauffage, cuisine, utilisation de produits ménagers), ce qui contribue à l'augmentation des émissions de COV (Composés Organiques Volatils). Ces composés, en présence de (NO_2) également généré par le trafic et les infrastructures urbaines, facilitent la formation de l'ozone troposphérique (O_3). Ainsi, cette dynamique démographique et urbaine vient confirmer les résultats obtenus précédemment concernant la détérioration de la qualité de l'air.

La carte emploie un dégradé de couleurs qui permet de voir distinctement les variations de densité de population. Les zones à forte densité sont facilement identifiables par rapport aux zones moins peuplées, ce qui simplifie l'interprétation spatiale de l'évolution démographique.

Figure 16:Carte superposée de la densité de population (2019-2023)



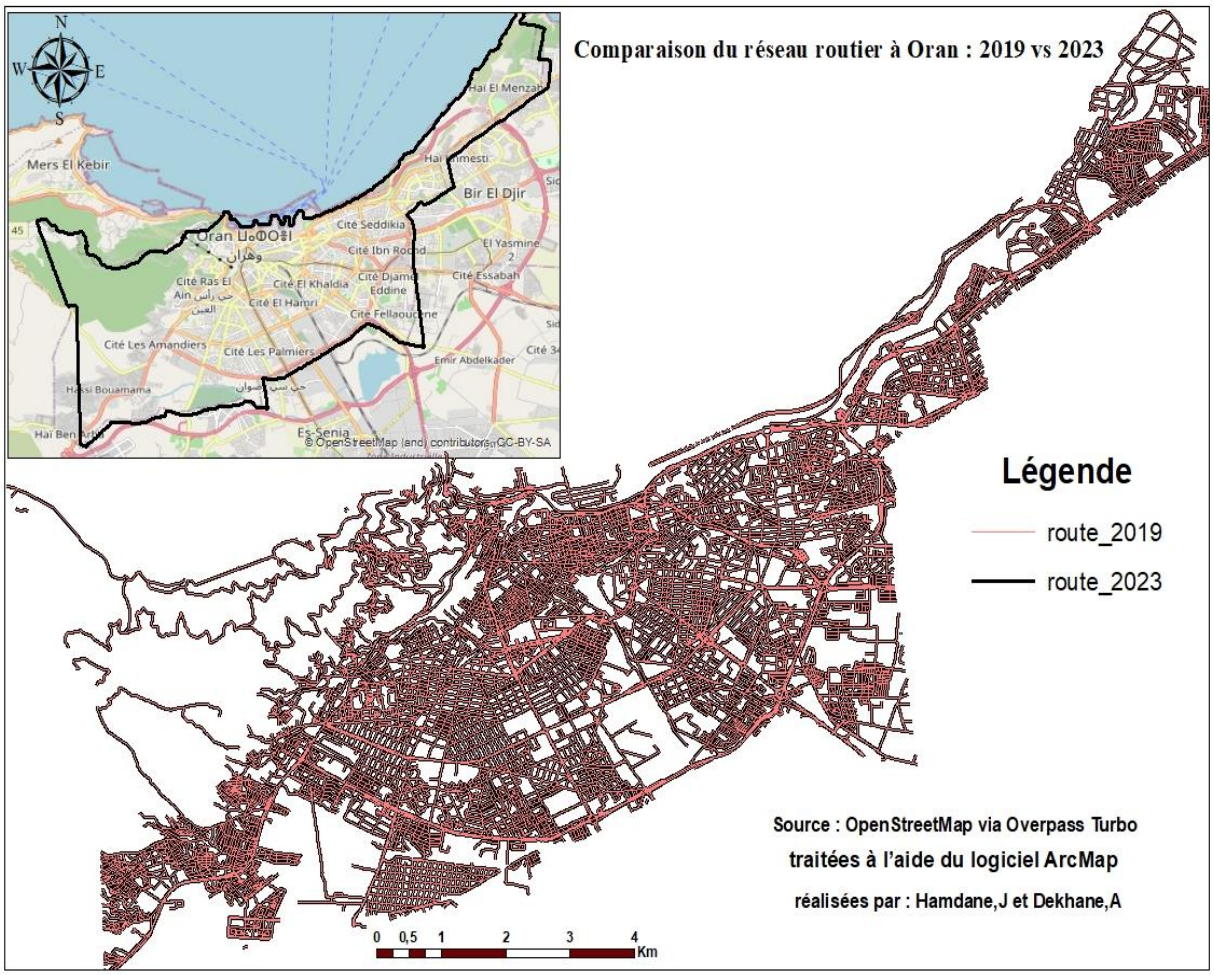
2.4 Impact du réseau routier et de la circulation sur la qualité de l'air:

Dans cette étude, nous avons cherché à examiner l'impact du développement des infrastructures de transport et de la circulation automobile sur l'évolution de la pollution atmosphérique dans la commune d'Oran. Pour ce faire, nous avons réalisé une comparaison spatio-temporelle du réseau routier entre 2019 et 2023, en utilisant des cartes satellites et des analyses ArcMap. Des mouvements significatifs au sein de l'agglomération d'Oran sont générés par des zones attractives comme le centre-ville, délimité par le troisième périphérique et le port. Ce secteur représente un centre d'attraction majeur de la métropole en regroupant toutes les fonctions, qu'elles soient administratives, économiques ou culturelles.

Cette concentration urbaine dans certaines régions entraîne une augmentation du trafic routier, ce qui contribue à l'émission de polluants comme le (NO_2), le (CO) et les particules fines, en particulier sur les routes très fréquentées.

2.4.1 Analyse spatiale des infrastructures de transport (routes, autoroutes, etc.) et leur relation avec la concentration des polluants:

Figure 17: Evolution des réseaux routiers de la commune d'Oran entre (2019 vs 2023)



L'examen spatial du réseau routier dans la commune d'Oran a été réalisé en comparant les cartes de 2019 et 2023. Cette comparaison a permis de démontrer l'expansion significative des infrastructures de transport, notamment l'élargissement du réseau routier, la prolongation des autoroutes urbaines, ainsi que l'aménagement de nouvelles voies périphériques. Ces transformations reflètent l'ajustement de la ville à une demande croissante en mobilité, résultant directement de l'accroissement démographique et du développement urbain. Toutefois, cette densification du réseau routier entraîne une augmentation du trafic automobile, surtout dans les zones centrales et les principaux axes reliant les quartiers périphériques au centre-ville.

La superposition des cartes des infrastructures routières avec celles de la concentration des polluants (comme le NO_2 et le CO) montre une corrélation spatiale marquée : les zones les plus denses en voies de circulation coïncident généralement avec les zones affichant les niveaux les plus élevés de pollution atmosphérique. Cette situation s'explique par la concentration de véhicules, les embouteillages fréquents et les émissions continues provenant des moteurs thermiques.

2.4.2 Intégration de données de mobilité urbaine:

Pour mieux comprendre l'impact du transport sur la qualité de l'air à Oran, nous avons intégré des données estimatives relatives au parc automobile de la ville pour la période 2019–2023. Une estimation du nombre total de véhicules par an est d'abord présentée, suivie d'une répartition approximative par catégorie de véhicule. De plus, une estimation de la répartition du parc automobile en fonction du type de carburant (essence ou diesel) a été réalisée pour la même période. Cette estimation repose sur les tendances observées à partir des données officielles de l'Office National des Statistiques (ONS, 2015), ajustées pour refléter l'évolution probable entre 2019 et 2023. Bien que ces données ne proviennent pas de sources récentes, elles offrent une vision d'ensemble du rôle du parc automobile dans les émissions polluantes à Oran.

Tableau 13: Estimation approximative de l'évolution du parc automobile de la wilaya d'Oran entre 2019 et 2023. Source : Estimations basées sur les données fournies par l'Office National des Statistiques (ONS, 2015).

Année	Nombre approximatif de véhicules
2019	340 000
2020	355 000
2021	370 000
2022	385 000
2023	400 000

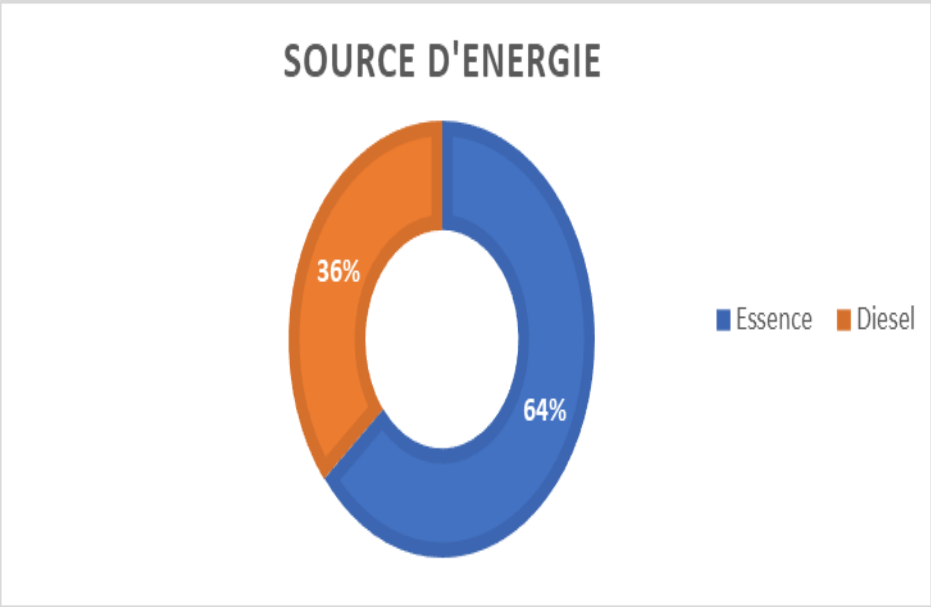


Figure 18: Répartition approximation de l'évolution du parc automobile de la wilaya d'Oran entre (2019-2023). Source : Estimation basées sur les données fournies par ONS 2015

La hausse constante du nombre de véhicules à Oran entre 2019 et 2023 avec une augmentation estimée à 60 000 véhicules en cinq ans témoigne d'une intensification de la mobilité urbaine. Cette tendance a un impact direct sur la qualité de l'air, notamment dans les zones où la circulation est dense. La répartition du parc automobile selon le type de carburant montre une prédominance des véhicules à essence (environ 64 %), suivis des véhicules diesel (environ 34 %). Les moteurs à essence, bien qu'ils émettent généralement moins de particules fines que les moteurs diesel, restent une source importante de monoxyde de carbone (CO) et de composés organiques volatils (COV). De leur côté, les véhicules diesel sont connus pour produire de fortes émissions de dioxyde d'azote (NO_2) et de particules fines (PM_{10}, $PM_{2.5}$). Cette structure du parc automobile suggère donc une contribution importante du secteur des transports aux niveaux de polluants observés dans l'agglomération d'Oran, notamment en raison de l'ozone troposphérique (O_3) formé par les réactions photochimiques des COV et des NO_x.

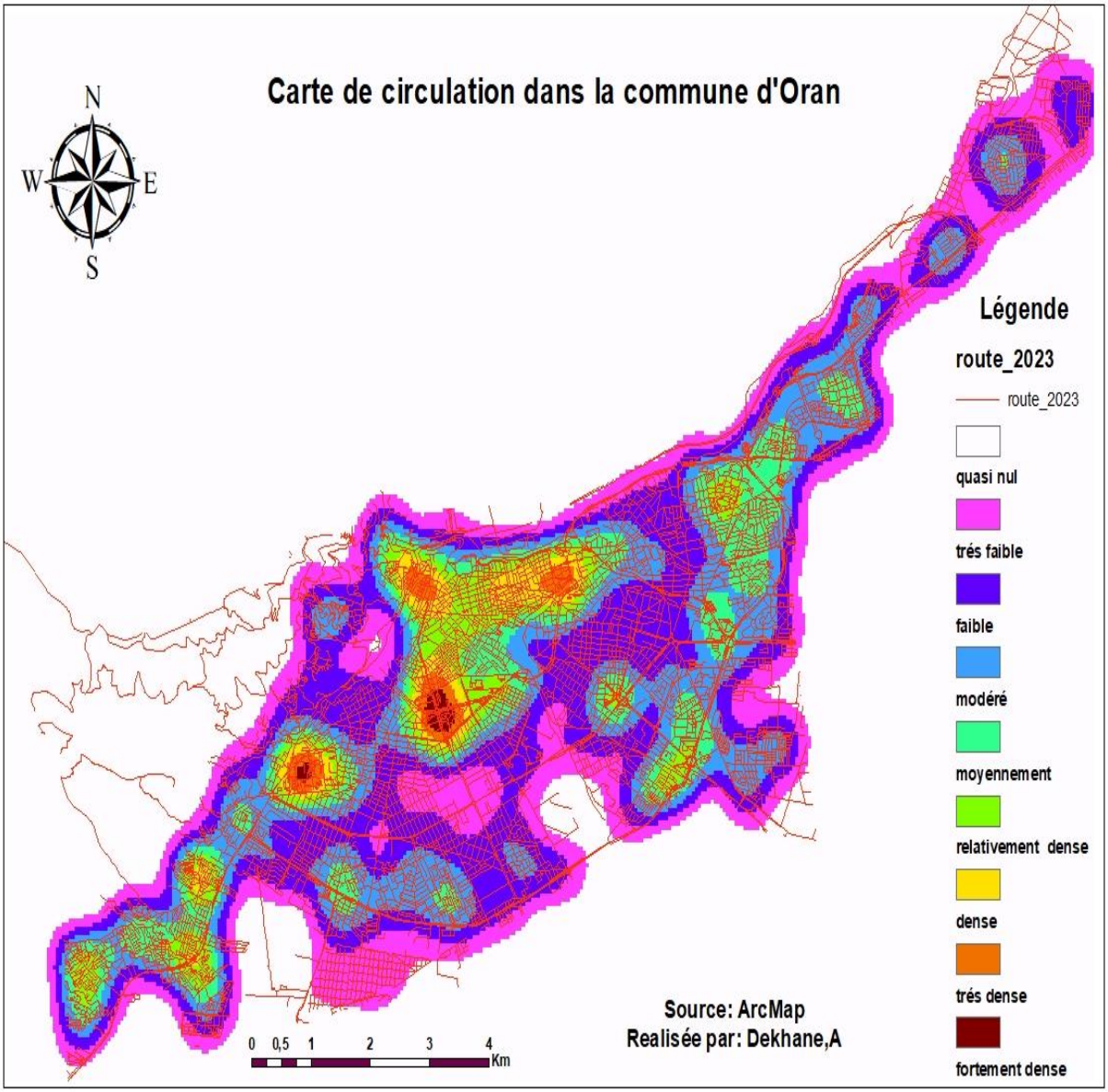
2.4.3 Évaluation de l'impact de la circulation:

L'étude de la répartition géographique du trafic à Oran montre une forte densité dans le centre-ville, qui est une zone où les activités humaines et les mouvements de transport sont particulièrement concentrés. Cette intensité du trafic routier est une source majeure d'émissions de polluants atmosphériques, notamment le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) et les particules fines (PM).

Les zones les plus exposées à la circulation pourraient ainsi connaître des niveaux de pollution plus élevés, surtout en l'absence de couverture végétale adéquate ou de systèmes efficaces de ventilation urbaine. Ce phénomène est conforme aux observations antérieures réalisées à partir des cartes de concentration des polluants, qui indiquent des valeurs plus élevées dans les zones à forte densité d'infrastructures routières.

La circulation urbaine se présente comme un facteur clé dans la détérioration de la qualité de l'air à Oran, particulièrement dans les secteurs centraux où la mobilité est la plus intense.

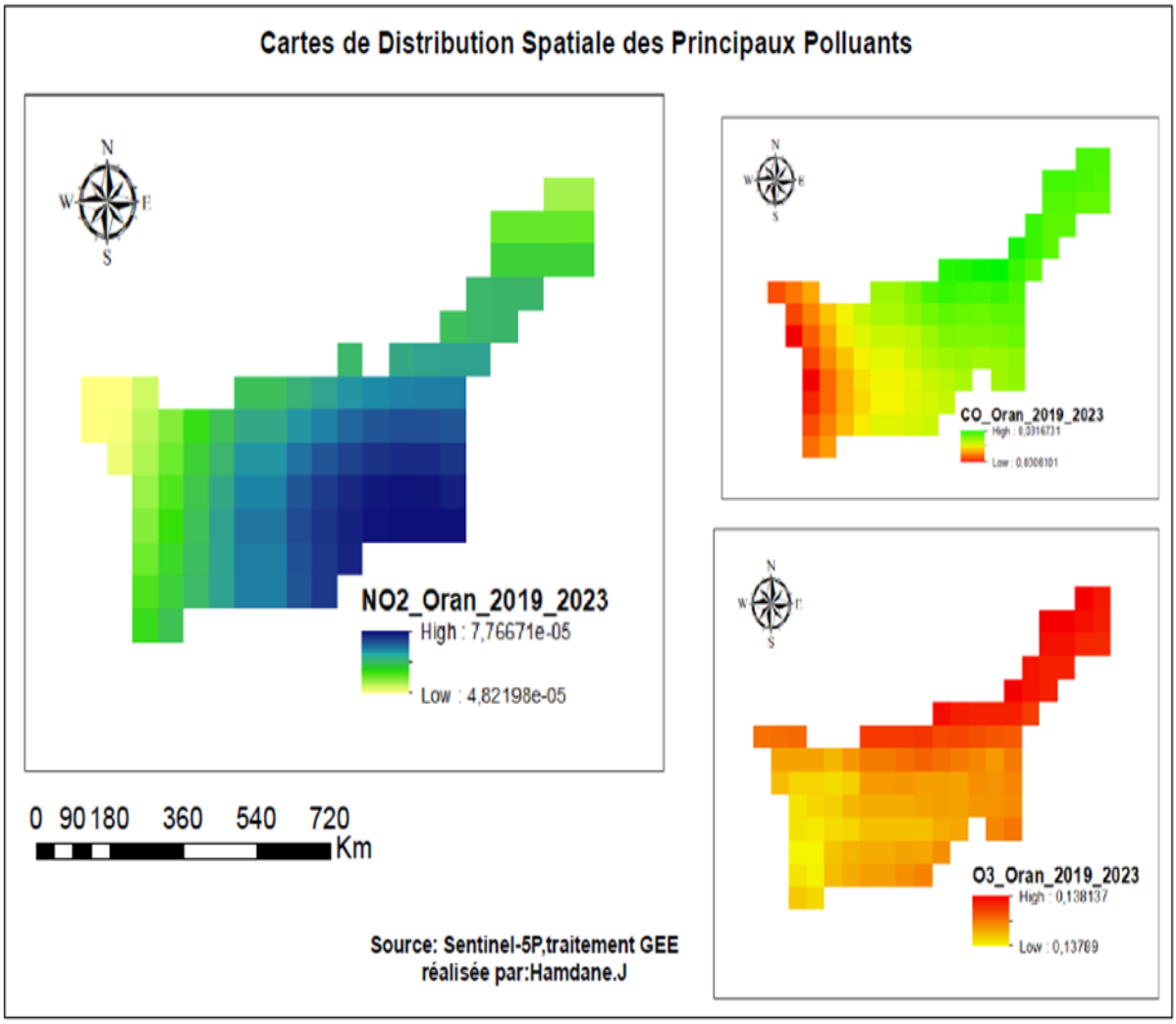
Figure 19: Carte de densité de la circulation routière dans la commune d'Oran en 2023



2.5 Analyse spatio-temporelle de la concentration des principaux polluants :

2.5.1 Cartes de distribution spatiale des principaux polluants :

Figure 20: Carte de distribution spatiale des principaux polluants (NO_2, CO, O_3)



Dans le cadre de cette recherche, nous avons employé une technique d'analyse spatiale basée sur des cartes de densité, créées à partir des données du satellite Sentinel-5P et traitées à l'aide de la plateforme Google Earth Engine. Ces cartes montrent la répartition géographique de trois principaux polluants gazeux le dioxyde d'azote (NO_2), le monoxyde de carbone (CO) et l'ozone troposphérique (O_3) dans la ville d'Oran, durant la période 2019–2023.

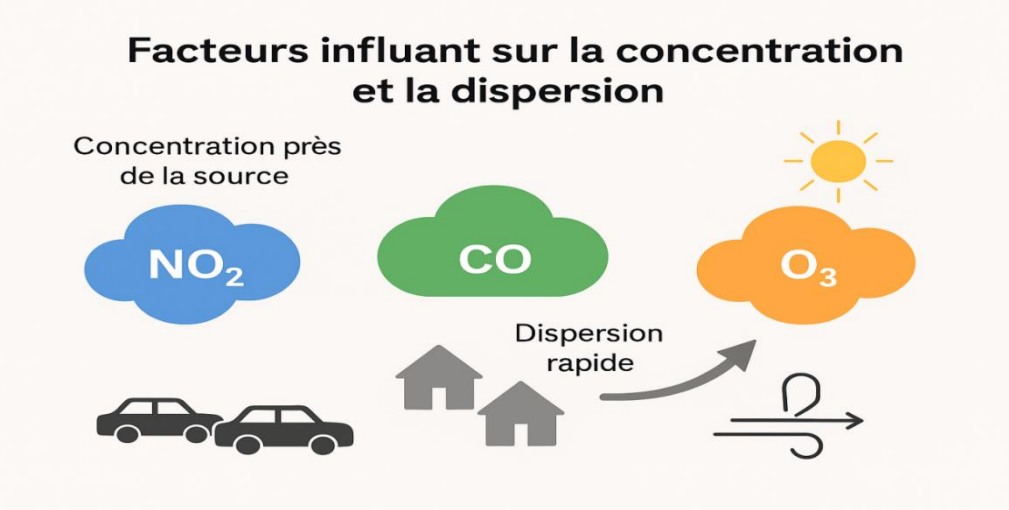
La carte du dioxyde d'azote (NO_2) montre une forte concentration dans le sud-est de la commune, notamment dans les quartiers de Medina Djedida, Centre-Ville, Akid Lotfi et Es-Seddikia. Les zones en bleu sombre indiquent les niveaux les plus élevés. Cette accumulation est due à l'intensité des activités urbaines, particulièrement le trafic routier, qui est le principal émetteur de (NO_2). Étant un gaz relativement lourd et peu mobile horizontalement, le (NO_2) a

tendance à rester proche de ses sources d'émission, ce qui explique sa forte concentration dans les zones à forte densité de population et de circulation.

Concernant le monoxyde de carbone (CO), la carte révèle que les concentrations les plus élevées en vert se trouvent dans le nord-est de la commune. Grâce à ses propriétés physiques, ce gaz léger se disperse rapidement dans l'air, lui permettant de s'éloigner facilement de ses points d'origine. Le (CO) provient principalement de combustions incomplètes, fréquemment observées dans les zones résidentielles ou associées à diverses activités humaines locales.

Pour ce qui est de l'ozone troposphérique (O_3), les concentrations les plus importantes sont également présentes dans le nord-est d'Oran. Ce gaz secondaire se forme par des réactions photochimiques entre les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV) sous l'influence de la lumière du soleil. Contrairement aux polluants primaires, l'ozone a tendance à s'accumuler loin de ses précurseurs, ce qui explique sa concentration accrue dans des zones éloignées des sources directes d'émission.

Figure 21:Facteurs influant sur la concentration et la dispersion. Source : l'intelligence artificielle



Chaque gaz polluant a des réactions distinctes en fonction de ses propriétés physico-chimiques, et sa distribution dans l'espace est largement influencée par les conditions atmosphériques locales.

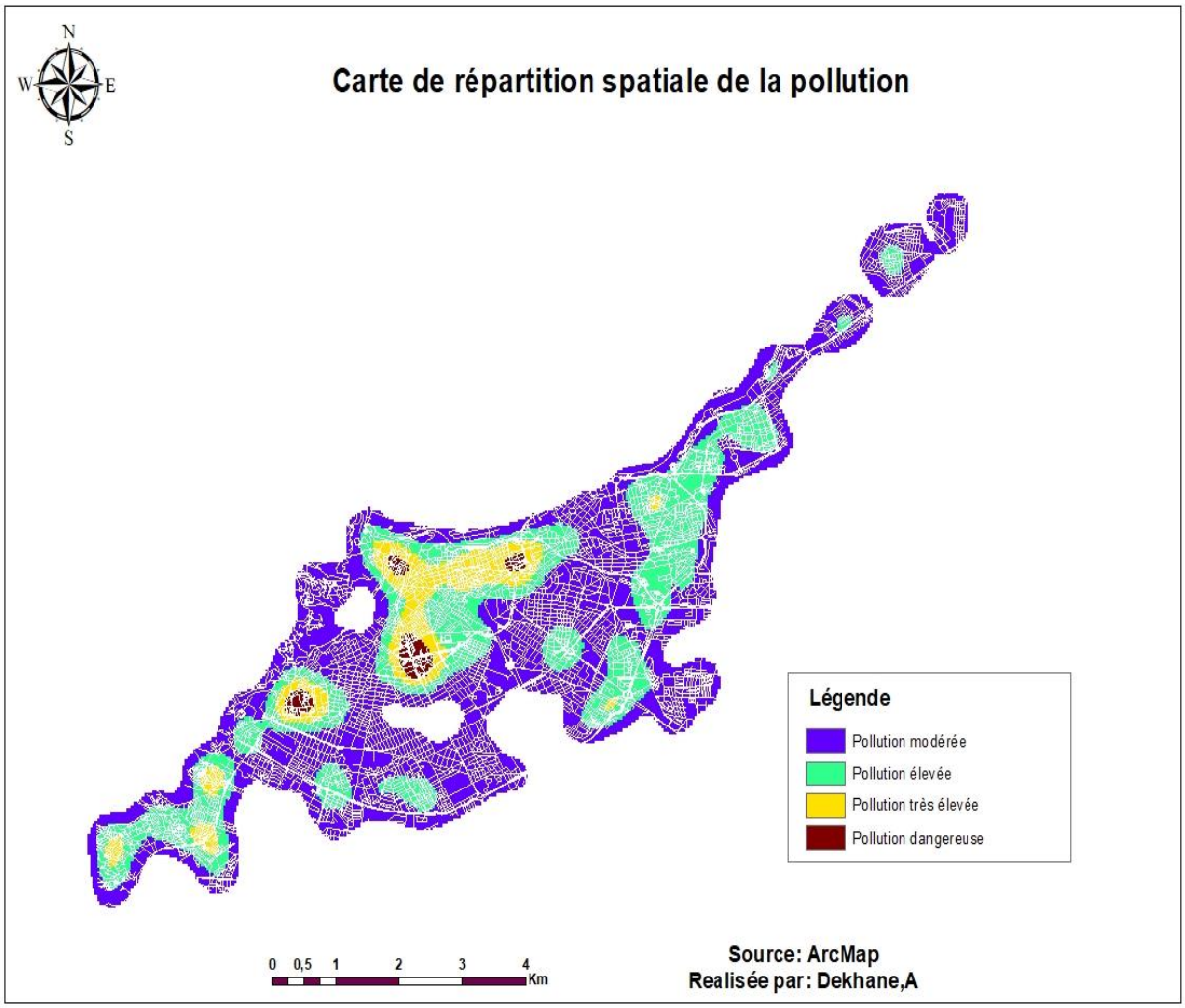
2.5.2 Identification et caractérisation des zones critiques de pollution à Oran :

La détermination des zones polluées dans la commune d'Oran s'est principalement basée sur l'évaluation de la densité du réseau routier, considéré comme un indicateur essentiel des émissions polluantes liées au trafic automobile. Les zones avec une forte densité routière et un trafic intense sont naturellement associés à des niveaux élevés de pollution atmosphérique. La cartographie des routes et de leur densité a permis d'identifier les secteurs urbains où la

concentration de polluants comme le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde d'azote (NO_2) est probablement la plus élevée. Ces zones se situent essentiellement sur les grands axes et les carrefours très fréquentés, ainsi que dans les quartiers densément peuplés où le trafic routier est intense. L'évolution au fil du temps de ces concentrations montre une aggravation progressive due à l'augmentation du nombre de véhicules et à l'expansion urbaine, accentuant la pression sur la qualité de l'air dans ces zones critiques. Cette corrélation étroite entre la densité routière et la pollution atmosphérique souligne l'importance d'intégrer la gestion du trafic dans les stratégies visant à combattre la dégradation de l'environnement urbain.

La carte ci-dessous illustre spatialement ces zones à forte densité de trafic, qui sont les plus exposées à la pollution, fournissant ainsi un outil précieux pour guider les mesures de contrôle et de réduction des émissions.

Figure 22: Carte de la densité du réseau routier dans la commune d'Oran, mettant en évidence les zones à forte circulation et donc potentiellement les plus polluées.



2.6 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'examiner en détail la qualité de l'air dans la commune d'Oran en utilisant une approche spatio-temporelle, soutenue par l'utilisation de Google Earth Engine. L'intégration des données satellitaires, climatiques, démographiques et liées aux infrastructures de transport a mis en lumière une dynamique préoccupante de la pollution atmosphérique, étroitement associée à la rapide urbanisation et à l'augmentation du trafic routier. Les résultats ont démontré une corrélation significative entre l'évolution de l'urbanisation et la détérioration de la qualité de l'air, en particulier dans les zones à forte densité de circulation. Les niveaux élevés de certains polluants (comme le NO_2, le CO et l'O_3) dans certaines régions indiquent la nécessité de prendre rapidement des mesures en matière d'aménagement urbain et de gestion des transports. Ces conclusions fournissent une base pour une réflexion approfondie sur les stratégies de réduction de la pollution et constituent une étape essentielle pour orienter les politiques publiques vers une ville plus durable et saine.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Étudier la pollution de l'air revient à s'attaquer à une réalité invisible à l'œil nu, mais omniprésente, constituant une menace silencieuse qui impacte notre quotidien sans toujours être remarquée. Ce travail a donc abordé une problématique intangible, mais aux conséquences lourdes, tant pour la santé humaine que pour l'équilibre des milieux urbains.

Face à l'urgence climatique et aux menaces croissantes pour la santé publique, cette étude a été réalisée dans l'espoir de contribuer, à notre niveau, à une meilleure compréhension de la pollution de l'air urbain, en prenant la ville d'Oran comme sujet d'analyse. Dès le départ, nous avons insisté sur le fait que la pollution atmosphérique reste un défi invisible mais omniprésent, dont les impacts, souvent sous-estimés, se traduisent par des souffrances humaines concrètes, un affaiblissement des écosystèmes urbains, et un déséquilibre social profond.

Grâce à une approche méthodologique rigoureuse, combinant données satellitaires, analyses climatiques et outils géospatiaux, cette recherche a mis en lumière l'ampleur, les dynamiques et les sources principales de la pollution dans la commune d'Oran entre 2019 et 2023. Les résultats obtenus confirment le rôle majeur du trafic routier, de l'expansion urbaine et des activités humaines dans la dégradation de la qualité de l'air. Les cartes, corrélations et indicateurs produits ont permis de localiser les zones les plus exposées, révélant des inégalités territoriales préoccupantes.

Au-delà des données et des techniques utilisées, cette recherche est également le fruit d'un long parcours accompli avec engagement, patience et persévérance. Derrière chaque graphique et chaque carte se cache un travail minutieux, souvent réalisé dans des conditions complexes, soutenu par la volonté sincère d'apporter une lecture scientifique utile à notre territoire. Cette étude puise sa force autant dans la précision des outils que dans la conviction personnelle qu'un avenir plus sain est encore possible à condition d'agir.

Il serait toutefois présomptueux de considérer ce travail comme terminé. Bien au contraire, il se veut une base ouverte pour des recherches futures plus approfondies : intégration de données au sol à plus haute résolution, études épidémiologiques locales, modélisation prédictive, ou encore évaluation de l'impact des politiques publiques sur la qualité de l'air. Chaque piste évoquée ici mérite une exploration plus détaillée, et chaque donnée soulève de nouvelles questions Enfin, si cette recherche a pu éclairer ne serait-ce qu'une partie de cette problématique complexe, alors l'objectif est atteint. Mais le vrai défi reste devant nous **:**

Transformer la connaissance en action, et faire de l'air que nous respirons un droit, plutôt qu’un risque.

Bibliographie

[1] PEREN. (S.d.). *La pollution atmosphérique : un nouveau risque respiratoire pour les villes du sud*. Pollution Atmosphérique. Disponible sur : https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/3520

[2] Gouv'airnance. (S.d.). *Gouvernance de la qualité de l'air dans les villes méditerranéennes – Rapport final du projet GOUV'AIRNANCE*.

[3] Organisation mondiale de la santé (OMS). (2021). *Rapport mondial sur la qualité de l'air*. Genève : OMS.

[4] Banque mondiale. (2021). *Pollution atmosphérique dans les mégalopoles : état des lieux et solutions*. Washington DC : Banque mondiale.

[5] Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics : From Air Pollution to Climate Change* (3e éd.). Wiley.

[6] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2024). *Our Atmosphère*. Consulté le 2 juillet 2024, sur https://www.noaa.gov

[7] Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Our Nation's Air 2021*. Washington DC : EPA.

[8] Rahal, F., Rezak, S., & Benabadji, N. (2021). Influence de la pandémie du COVID-19 sur la pollution par le dioxyde d'azote dans la ville d'Oran, Algérie. *Algerian Journal of Health Sciences*.

[9] Rahal, F., Bensalem, R., & Lounis, M. (2017). Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques à Oran. *Cybergeo : European Journal of Geography*.

[10] Fondation Friedrich Ebert (FES). (2021). *Feux de forêts en Algérie*. Disponible sur : https://drive.google.com/file/d/1CJJttcPX6p5Q4hBF9xBPzHte5cB-wsRd/view?usp=drive_web

[11] FES – Friedrich Ebert Stiftung. (2021, 24 novembre). *Feux de forêts en Algérie*. Disponible sur : https://algeria.fes.de

[12] Organisation mondiale de la santé (OMS). (2018). *Air quality and health – Global Air Quality Guidelines*.

[13] Organisation mondiale de la santé (OMS). (2014). *Household Air Pollution and Health*.

[14] Brook, R. D., et al. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease : An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331–2378.

[15] Schraufnagel, D. E., et al. (2019). Air Pollution and Noncommunicable Diseases : A Review. *Chest*, 155(2), 409–416.

[16] Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution : Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.

[17] Holgate, S. T., et al. (1999). *Air Pollution and Health*. Londres : Academic Press.

[18] Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Health Effects of Air Pollution*. Washington DC : EPA.

[19] World Meteorological Organization (WMO) & United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). *Scientific Assessment of Ozone Depletion : 2018*. Disponible sur : https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2018/

[20] European Environment Agency (EEA). (2020). *Air pollution and biodiversity*. Disponible sur : https://www.eea.europa.eu

[21] Journal Officiel de la République Algérienne (JORADP). (2003–2006). *Textes réglementaires relatifs à l'environnement*. Disponible sur : https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2003/F2003043.pdf https://www.joradp.dz/FTP/JO-FRANCAIS/2006/F2006024.pdf https://www.joradp.dz/JO2000/2004/039/FP2.pdf

[22] Ministère de l'Environnement (Algérie). (S.d). *Réglementation environnementale et stratégie nationale*. Disponible sur : https://www.me.gov.dz/fr/reglementation/lenvironnement/