République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

Faculté des Sciences de la Terre et l'Univers

Département de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master En Géographie et Aménagement du territoire

Spécialité : Gestion des risques et sécurité civile

Effet de la grande sebkha d'Oran sur les variations spatio-temporelles des concentrations de PM2.5 à la surface

Présenté par : Belgacem Nourhane

Devant le jury composé de :

BOUTRID Mohamed Lamine	Maître de conférences A	Président
BENDIB Abdelhalim	Professeur	Encadreur
SIDI YKHLEF Soraya	Maître assistant A	Examinatrice

Année Universitaire 2025-2026

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur Bendib Abdelhalim pour son encadrement, son soutien constant ainsi que ses précieux conseils tout au long de mon parcours académique. Je le remercie également pour ses efforts remarquables et ses paroles sincères, qui sont restées gravées dans mon esprit et ont toujours été une source d'inspiration et de motivation à chaque étape.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur Boutrid Mohamed Lamine et Madame Sidi Ykhlef Soraya pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'évaluer ce travail et de faire partie du jury.

Comme le disait toujours monsieur Boutrid : « L'excellence est le secret de la réussite. ». J'ai fait de cette phrase une lumière guidant mon chemin. Aujourd'hui, je peux affirmer avec fierté que cette réussite n'aurait jamais été possible sans l'accompagnement et le soutien de mes enseignants, qui ont été, après la volonté de Dieu, une véritable source de motivation.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants du département de Géographie et Aménagement du Territoire pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leurs encouragements tout au long de ma formation.

Merci infiniment à toutes et à tous.

Dédicace

je dédie ce travail à moi-même, à celle qui a cru en elle, même lorsque le doute était plus fort que la confiance, et qui a continué à avancer.

Je dédie également le fruit de mon effort et ce modeste travail :

À mon cher père Belgacem Khalil, mon soutien et ma fierté,

À ma chère mère Chergui Fadila, source de ma force et de ma sécurité,

À ma petite sœur Yasmine, la fleur de ma vie…

À mes proches du cœur, notamment ma chère tante Aïcha Otmaniya et Radia, qui ont toujours été présentes par leur affection et leur soutien.

À tous ceux qui sont proches de mon cœur plus que de mon sang, notamment Maria, ma copine intime,

Et à tous ceux qui m'ont aidée, soutenue et encouragée par un mot ou une prière…

Merci à vous tous, car grâce à vous j'ai avancé, par votre soutien j'ai cru en moi, et par votre amour j'ai pu terminer ce chemin.

Résumé
La qualité de l'air impacte considérablement la santé publique, contribuant aux maladies respiratoires et cardiovasculaires. Cette étude a examiné l'influence de la Grande Sebkha d'Oran (GSO) sur les concentrations de PM2.5 ainsi que le rôle des facteurs météorologiques dans leurs variations. Les données satellitaires MODIS Terra et Aqua ont été utilisées pour analyser l'épaisseur optique des aérosols (AOD 47), tandis que l'algorithme de van Donkelaar a été utilisé pour estimer les niveaux de PM2.5. Les résultats mettent en évidence d'importantes variations spatio-temporelles (2012-2023), avec les concentrations les plus élevées enregistrées en 2018 (25,90 µg/m³) et les plus faibles en 2013 (17,46 µg/m³). L'analyse spatiale a révélé des niveaux de PM2.5 persistants et élevés (>35,5 µg/m³) dans les régions sud et sud-est, coïncidant avec la GSO, avec des points chauds isolés à proximité des zones industrielles et du port. Temporellement, les concentrations de PM2.5 atteignent leur maximum durant les périodes sèches et venteuses. De fortes corrélations positives ont été trouvées entre les PM2.5 et la température (R=0,8476) ainsi que la vitesse du vent (R=0,7099), tandis que des corrélations négatives ont été observées avec l'humidité du sol (R=-0,8210) et les précipitations (R=-0,4933). Malgré la réduction de l'activité anthropique pendant la pandémie de COVID-19, les niveaux de PM2.5 sont restés élevés, soulignant la contribution significative de la GSO. L'étude préconise un renforcement de la surveillance de la qualité de l'air, le verdissement urbain et des réglementations plus strictes pour atténuer les émissions de PM2.5 d'origines naturelle et anthropique, afin d'améliorer in fine la santé publique.
Mots-clés : Qualité de l'air, PM2.5, Grande Sebkha d'Oran (GSO), Télédétection, Facteurs météorologiques, Santé publique.

Abstract
Air quality significantly impacts public health, contributing to respiratory and cardiovascular diseases. This study investigated the influence of the Great Sebkha of Oran (GSO) on PM2.5 concentrations and the role of meteorological factors in their variations. MODIS Terra and Aqua satellite data were used to analyze Aerosol Optical Depth (AOD 47), whereas van Donkelaar's algorithm was used to estimate the PM2.5 levels. The results highlight significant spatiotemporal variations (2012-2023), with the highest concentrations recorded in 2018 (25.90 µg/m³) and the lowest in 2013 (17.46 µg/m³). Spatial analysis revealed persistently high PM2.5 levels (>35.5 µg/m³) in the southern and southeastern regions, which coincided with the GSO, with isolated hotspots near industrial zones and the port. Temporally, PM2.5 concentrations peak during dry, windy periods. Strong positive correlations were found between PM2.5 and temperature (R=0.8476) and wind speed (R=0.7099), while negative correlations were observed with soil moisture (R=-0.8210) and precipitation (R=-0.4933). Despite reduced anthropogenic activity during the COVID-19 pandemic, PM2.5 levels remained high, underscoring the significant contribution of the GSO. The study advocates for enhanced air quality monitoring, urban greening, and stricter regulations to mitigate PM2.5 emissions from natural and anthropogenic sources, ultimately improving public health.
Keywords: Air quality, PM2.5, Great Sebkha of Oran (GSO), Remote sensing, Meteorological factors, Public health

الملخص
تؤثر جودة الهواء بشكل كبير على الصحة العامة، حيث تساهم في الإصابة بالأمراض التنفسية وأمراض القلب والأوعية الدموية. استقصت هذه الدراسة تأثير سبخة وهران الكبرى (GSO) على تركيزات الجسيمات الدقيقة (PM2.5) ودور العوامل المناخية في تغيراتها. تم استخدام بيانات الأقمار الصناعية MODIS Terra و Aqua لتحليل العمق البصري للهباء الجوي(AOD 47) ، بينما استُخدمت خوارزمية "فان دونكير" لتقدير مستويات .PM2.5 تبرز النتائج وجود تباينات زمانية ومكانية هامة (2012-2023)، حيث سُجلت أعلى التركيزات في عام 2018 (25.90 ميكروغرام/متر مكعب) وأدناها في عام 2013 (17.46 ميكروغرام/متر مكعب). وكشف التحليل المكاني عن مستويات مرتفعة ومستمرة من PM2.5 (أكبر من 35.5 ميكروغرام/متر مكعب) في المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية، بما يتطابق مع موقع السبخة، مع وجود بؤر تلوث معزولة بالقرب من المناطق الصناعية والميناء. زمنياً، تصل تركيزات PM2.5 إلى ذروتها خلال الفترات الجافة والعاصفة. وقد وُجدت علاقات ارتباط إيجابية قوية بين PM2.5 ودرجة الحرارة (R=0.8476) وسرعة الرياح (R=0.7099)، بينما لوحظت علاقات ارتباط سلبية مع رطوبة التربة (R=-0.8210) والتساقط المطري .(R=-0.4933) وبالرغم من انخفاض النشاط البشري خلال جائحة كوفيد-19، ظلت مستويات PM2.5 مرتفعة، مما يؤكد المساهمة الكبيرة لسبخة وهران الكبرى. توصي الدراسة بتعزيز مراقبة جودة الهواء، والتشجير الحضري، وفرض لوائح أكثر صرامة للتخفيف من انبعاثات PM2.5 من المصادر الطبيعية والبشرية، لتحسين الصحة العامة في نهاية المطاف.
الكلمات المفتاحية :جودة الهواء، PM2.5، سبخة وهران الكبرى(GSO) ، الاستشعار عن بعد، العوامل الميثيورولوجية، الصحة العامة.



Table des matières



Sommaire

Remerciements 2
Dédicace 3
Résumé I
Sommaire II
Liste des tableaux IV
Liste des figures V
Introduction générale ..... - 2 -
Chapitre 1 : Aspect théorique de l'étude 6
1- Introduction ..... - 7 -
2- Pollution atmosphérique et particules fines PM2.5 ..... - 8 -
3- Zones humides : définition, classification, fonctions et importance stratégique ..... - 12 -
4- Les sebkhas : caractéristiques, typologie, formation et rôle dans les environnements arides et semi-arides ..... - 14 -
5- Dynamique environnementale des sebkhas : sécheresse, érosion et tempêtes de poussières ..... - 16 -
6- Contribution des sebkhas à la pollution atmosphérique naturelle ..... - 19 -
7- Télédétection et surveillance des PM2.5 : approches, méthodes et applications ..... - 21 -
8- Gestion des risques, approches de durabilité et outils de management environnemental ..... - 24 -
9- Conclusion ..... - 27 -
Chapitre 2 : Description de la zone d'étude 28
1- Introduction ..... - 29 -
2- Description de la zone d'étude ..... - 30 -
3- Les caractéristiques topographiques ..... - 36 -
4- Les caractéristiques géologiques de la Grande Sebkha d'Oran ..... - 38 -
5- Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude ..... - 41 -
6- Les caractéristiques démographiques ..... - 43 -
7- Occupation des sols dans la zone d'étude ..... - 48 -
8- Infrastructures routières et ferroviaires, éléments de liaison ..... - 49 -
9- Les caractéristiques économique ..... - 50 -
10- Conclusion ..... - 52 -
Chapitre 3 : Evaluation de l'effet de la GSO sur les variations des concentrations en PM2.5 53
1- Introduction ..... - 54 -
2- Matériel et méthodes ..... - 55 -

3- Résultats et discussion ..... - 59 -

4- Conclusion ..... - 72 -

Références bibliographiques ..... - 77 -

Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux

Nombre	Titre	Page
01	Répartition spatiale des altitudes dans la zone d'étude	37
02	Distribution spatiale des classes de pentes dans la wilaya d'Oran	38
03	Températures moyennes mensuelles (Climate-Data.org (1991-2021))	41
04	Précipitations moyennes mensuelles (Climate-Data.org (1991-2021))	42
05	Vitesse moyennes mensuelles (Weather Spark & Climate-Data.org (1991-2020))	42
06	Vitesse moyennes mensuelles (Weather Spark & Climate-Data.org (1991-2020))	42
07	Évolution de la population par commune de l'agglomération oranaise 1966-2008 (ONS, Algérie)	44
08	Évolution du cadre bâti de la ville d'Oran (Elmokertar and Azzi 2022)	47
09	Détails des données utilisées dans l'étude	56
10	Catégories de qualité de l'air définies par l'EPA des États-Unis (Zhang and Kondragunta 2021)	62
11	Distribution des surfaces occupées par les concentrations de PM2.5 pour chaque classe dans la Wilaya d'Oran entre 2012 et 2023	63
12	Nombre de jours classés comme malsains, très malsains ou dangereux sur la base de la concentration de PM2.5 (2012–2023)	67

Liste des figures

Nombre	Titre	Page
1.1	Exemple de la particule PM2.5 en comparant avec le cheveu humain (50-70 µm) et le sable fin d'une plage (90 µm)	9
1.2	Pénétration des particules dans l'organisme	10
1.3	Principales sources des concentrations en PM2.5	11
1.4	Extrait des zones humides	12
1.5	Extrait de la sebkha	15
1.6	Rôle des sebkhas pour les oiseaux migrateurs	16
1.7	Processus de sécheresse	17
1.8	Les mécanismes de l'érosion éolienne	18
1.9	Exemple d'une tempête de poussière	19
1.10	Exemple de la contribution des sebkhas à la pollution atmosphérique	21
1.11	Exemple d'utilisation de la télédétection dans le suivi temporel des concentrations en PM2.5	24
2.1	Localisation de la zone d'étude	32
2.2	Localisation de la grande Sebkha d'Oran	34
2.3	La Grande Sebkha d'Oran	35
2.4	Distribution spatiale des altitudes dans la wilaya d'Oran	37
2.5	Distribution spatiale des classes de pentes dans la wilaya d'Oran	38
2.6	Profile géologique de la sebkha d'Oran, Dj Murdjadjo- Dj Tessala	39
2.7	Les caractéristiques géologiques de la grande sebkha d'Oran	40
2.8	Évolution de la population par commune de l'agglomération oranaise 1966-2008	44
2.9	Évolution de la densité des populations pour les années 2000, 2005, 2010, 2015 et 2020	45
2.10	Évolution du cadre bâti de la ville d'Oran	47
2.11	Carte d'occupation du sol de la wilaya d'Oran	48
2.12	Infrastructures routières et ferroviaires	49
2.13	les caractéristiques commerciales de la ville d'Oran	50
3.1	Organigramme de la méthodologie adoptée	58
3.2	Extrait du code GEE utilisé dans cette étude	59
3.3	Corrélation entre les PM2.5 de MCD19A2.061 et les PM2.5 de……	60
3.4	Variations spatiotemporelles de la concentration de PM2.5 de 2012 à 2023	61
3.5	illustre les relations entre les concentrations de PM2.5 et les divers paramètres météorologiques, telles que déterminées par l'analyse de régression linéaire.	64



Introduction Générale



Introduction générale

La pollution de l'air, en particulier les particules fines ayant un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm (PM2.5), est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale pour l'environnement et la santé publique (Ilenič et al. 2024). En raison de leur petite taille et de leur capacité à pénétrer profondément dans le système respiratoire, les particules PM2.5 sont associées à divers effets néfastes sur la santé (Xing et al. 2016) ; (Sangkham et al. 2024). Ces particules sont responsables de près de 4 millions de décès dans le monde, principalement liés à des maladies cardiopulmonaires telles que les maladies cardiaques, les infections respiratoires, les maladies pulmonaires chroniques, le cancer et les naissances prématurées (Thangavel et al. 2022) ; (Basemera et al. 2025). Selon (Ilenič et al. 2024), l'exposition aux PM2.5 augmente le risque de mortalité de 15 à 21 % par tranche de 10 µg/m³ pour le cancer du poumon et de 12 à 14 % par tranche de 10 µg/m³ pour les maladies cardiovasculaires. En Algérie, l'exposition annuelle moyenne aux PM2.5 entre 1990 et 2017 a été estimée à 39 µg/m³ (Schwela 2024), un niveau qui, en 2019, était responsable de plus de 22 000 décès et de plus de 468 000 années de vie ajustées sur l'incapacité (DALY) (WHO 2022a) ; (WHO 2022b).

Dans les zones urbaines et industrielles, les concentrations de PM2.5 sont influencées par une combinaison d'activités anthropiques, de conditions météorologiques et de caractéristiques géographiques (Chen et al. 2022a) ; (Jing et al. 2020) ; (Meng et al. 2025). Cependant, avec l'urbanisation rapide, le rôle des paysages naturels, tels que les lacs salés ou les sebkhas, dans la modulation des PM2.5 reste sous-étudié. L'occupation et l'utilisation des sols (LULC) jouent un rôle crucial dans les émissions d'aérosols (Yousefi et al. 2023). Elles peuvent induire des variations climatiques locales, influençant ainsi la mobilisation et le transport atmosphérique des PM2.5, soit en limitant, soit en favorisant leur dispersion (Wang et al. 2018).

La Grande Sebkha d'Oran (GSO) est l'un des plus grands lacs salés d'Algérie et a été désignée site Ramsar en 2001 (Benkesmia et al. 2023). Cette formation géographique unique, caractérisée par une salinité élevée et des variations saisonnières du niveau de l'eau, joue un rôle significatif dans le climat local et la qualité de l'air (Hachemi et al. 2020). Les PM2.5 proviennent de sources internes incluant le trafic, l'industrie, la production d'énergie et la construction, ainsi que du transport à longue distance (Almeida et al. 2020) ; (Nguyen et al. 2022). Les sebkhas émettent de grandes quantités de poussières minérales et d'aérosols, particulièrement pendant les périodes sèches lorsque les sédiments de surface sont exposés à l'érosion éolienne (Li et al. 2021) ; (Abbas et al. 2024). Ces émissions peuvent contribuer à des concentrations élevées de PM2.5, surtout dans les zones urbaines situées sous le vent. La distribution spatio-temporelle des PM2.5 est influencée

par les interactions entre les émissions de la Sebkha et les conditions météorologiques locales, notamment la direction du vent, la température et l'humidité (Nguyen et al. 2022) ; (Yang et al. 2017). Par exemple, les vents dominants du sud et du sud-ouest à Oran peuvent transporter des aérosols salins et de la poussière de la GSO vers la ville, particulièrement pendant l'été lorsque les taux d'évaporation sont élevés.

De nombreuses études ont été menées pour évaluer la qualité de l'air par diverses approches méthodologiques. Par exemple, (Kumar et al. 2022) ont comparé des techniques d'interpolation spatiale dans ArcGIS, spécifiquement les méthodes de pondération par l'inverse de la distance (IDW), de krigeage et de spline, pour cartographier des indicateurs de la qualité de l'air tels que le SO2, le NO2 et les matières particulaires en suspension (SPM) à Mumbai. À Xining, en Chine, (Hu et al. 2020) ont analysé les variations spatio-temporelles des concentrations de PM2.5 à l'aide de données de concentration de polluants atmosphériques au sol. Leur étude a identifié des sources primaires comprenant les lacs salés, la poussière et les processus de combustion. De plus, ils ont évalué l'impact des tempêtes de sable sur les niveaux de pollution. Les résultats ont révélé que pendant les tempêtes de sable, les concentrations de Na^{+}, Ca^{2+} et Mg^{2+} augmentaient de manière marquée, indiquant des contributions substantielles de la poussière et des lacs salés environnants. (Filonchyk et Hurynovich 2020) ont examiné les effets de l'urbanisation rapide en Chine sur la qualité de l'air en utilisant des données satellitaires MODIS pour étudier l'épaisseur optique des aérosols (AOD) et l'exposant d'Angström (AE). Leurs conclusions indiquaient que les concentrations de PM2.5 dépassaient les normes nationales chinoises de qualité de l'air ambiant. Enfin, en utilisant des données de concentration de polluants atmosphériques au sol, (Biswas et al. 2020) ont étudié les variations saisonnières des concentrations de PM2.5, PM10, CO, NO2 et SO2 à travers trois zones — deux à Calcutta et une à Siliguri. Ils ont rapporté une corrélation positive entre les températures moyennes quotidiennes et les niveaux de PM2.5 et de CO, soulignant l'influence des conditions météorologiques sur les fluctuations saisonnières des polluants.

Bien que la pollution par les PM2.5 soit devenue une préoccupation majeure de santé publique, la littérature scientifique sur les émissions de particules provenant des lacs salés reste extrêmement limitée. À ce jour, seules deux études ont exploré cette question : l'une sur l'assèchement du Grand Lac Salé aux États-Unis (Grineski et al. 2024), et une autre sur le rôle des lacs asséchés dans la génération de tempêtes de poussière saline dans les régions arides (Ge et al. 2019). Cependant, aucune n'a spécifiquement étudié l'impact des lacs salés sur les concentrations de PM2.5 en surface.

Cette étude comble cette lacune en se concentrant sur la Grande Sebkha d'Oran (GSO), l'une des plus grandes dépressions salines d'Algérie, située à seulement 10 km au sud-ouest de la ville densément peuplée d'Oran. Malgré son importance écologique et ses caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques uniques, aucune recherche préalable n'a examiné sa contribution potentielle à la pollution régionale par les PM2.5. Alors que des études locales ont exploré divers aspects environnementaux de la GSO, tels que la dynamique des eaux de surface (Benkesmia et al. 2023), les systèmes aquifères (Benziane et Boualla 2022) et les interactions sol-eau (Boualla et al. 2019), le lien entre la GSO et les PM2.5 n'a pas été exploré. Pour combler cette lacune critique, nous employons une méthodologie basée sur la télédétection qui combine l'épaisseur optique des aérosols dérivée de MODIS (AOD 47) avec l'algorithme de Van Donkelaar pour estimer les concentrations de PM2.5 au niveau du sol. Cette approche est validée à l'aide d'un ensemble de données multicapteurs (MODIS, MISR, SeaWiFS, VIIRS) en conjonction avec le modèle de transport chimique GEOS-Chem. Malgré l'intérêt croissant pour l'intelligence artificielle et les approches d'apprentissage automatique pour la modélisation et la prédiction de la pollution de l'air, l'application de telles techniques dans cette étude a été contrainte par l'accès limité aux données d'observation au sol. En particulier, l'absence de stations de surveillance locales des PM2.5 et d'archives météorologiques a empêché l'entraînement et la validation de modèles de ML avancés. Par conséquent, la méthodologie adoptée ici s'est appuyée sur des algorithmes de télédétection robustes et bien documentés, tels que le modèle de Van Donkelaar, soutenus par le modèle de transport GEOS-Chem et une validation satellitaire multi-capteurs.

Problématique

La pollution atmosphérique par les particules fines PM2.5 constitue aujourd'hui un enjeu environnemental et sanitaire majeur, particulièrement dans les espaces urbains et industriels. À Oran, plusieurs sources anthropiques contribuent à la dégradation de la qualité de l'air, mais le rôle des milieux naturels, notamment la Grande Sebkha d'Oran, demeure encore peu étudié. Cette dépression saline pourrait représenter une source importante d'aérosols et de poussières sous l'effet des conditions climatiques locales. Toutefois, l'absence de stations de mesure au sol et le manque d'études spécifiques limitent la compréhension de son influence réelle sur les concentrations de PM2.5. Dès lors, comment la Grande Sebkha d'Oran influence-t-elle la variabilité spatio-temporelle des PM2.5 dans la région ?

Objectifs de l'étude

Cette étude vise principalement à évaluer la contribution de la Grande Sebkha d'Oran aux concentrations de PM2.5 dans la région d'Oran en utilisant une approche de télédétection. Elle cherche à : (1) cartographier la distribution spatio-temporelle des PM2.5 via l'épaisseur optique des aérosols (AOD MODIS) et le modèle de Van Donkelaar ; (2) analyser l'influence des conditions météorologiques (vent, température, humidité) et de l'occupation des sols sur le transport des aérosols issus de la sebkha ; (3) quantifier l'apport relatif des sources naturelles (GSO) versus anthropiques. L'objectif final est de combler le vide scientifique sur l'impact des lacs salés arides sur la pollution particulaire en contexte méditerranéen et de fournir des éléments scientifiques pour une meilleure gestion environnementale.

Pour atteindre les objectifs soulignés, le travail est divisé en trois chapitres essentiels et complémentaires :

Le premier chapitre présente le cadre théorique et conceptuel de cette étude en abordant les principales notions liées à la pollution atmosphérique, avec un intérêt particulier porté aux particules fines PM2.5, leurs sources, leurs caractéristiques ainsi que leurs impacts environnementaux et sanitaires.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation détaillée de la zone d'étude, notamment sa localisation géographique, ses caractéristiques physiques, climatiques et démographiques.

Le troisième chapitre traite de l'utilisation des techniques de télédétection et des potentialités de Google Earth Engine dans l'extraction et l'analyse des concentrations de PM2.5, ainsi que de l'étude de leur relation avec certains paramètres climatiques influençant leur variabilité spatio-temporelle.

Chapitre 1 :

Aspect théorique de l'étude

1- Introduction

La pollution atmosphérique constitue l'un des défis environnementaux et sanitaires les plus pressants du XXIe siècle, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où les sources naturelles et anthropiques interagissent de manière complexe. Parmi les polluants atmosphériques, les particules fines PM2.5 occupent une place centrale en raison de leur impact majeur sur la santé humaine, leur rôle dans le forçage climatique et leur persistance dans l'atmosphère. En Algérie, et plus spécifiquement dans la wilaya d'Oran, la qualité de l'air est influencée non seulement par les activités humaines (trafic routier, industries, urbanisation rapide), mais également par des sources naturelles puissantes liées aux particularités géomorphologiques du territoire, notamment la présence de la Grande Sebkha d'Oran.

Vaste dépression endoréique saline située à seulement une quinzaine de kilomètres au sud de l'agglomération oranaise, la Grande Sebkha représente un écosystème fragile dont la dynamique hydrologique, édaphique et éolienne contribue significativement à l'émission de poussières minérales et salines. Dans un contexte de changement climatique marqué par l'intensification des phénomènes extrêmes (sécheresses prolongées, vagues de chaleur et tempêtes de poussières), comprendre le rôle de cette sebkha dans la variabilité spatio-temporelle des concentrations de PM2.5 devient une nécessité scientifique et un impératif de santé publique.

Ce chapitre vise à poser les bases conceptuelles et scientifiques de l'étude. Il présente tout d'abord les caractéristiques générales des aérosols atmosphériques et des particules fines PM2.5, leurs sources, leurs impacts sur la santé et le climat. Il aborde ensuite la notion de zones humides et plus particulièrement celle des sebkhas, leurs fonctions écologiques et hydrologiques, ainsi que leur vulnérabilité face à la sécheresse, à l'érosion éolienne et aux tempêtes de poussières. Une attention particulière est accordée à la contribution des sebkhas à la pollution atmosphérique naturelle et à la variabilité des PM2.5 dans la région d'Oran.

Enfin, ce chapitre met en lumière le potentiel de la télédétection satellitaire comme outil moderne de surveillance et d'analyse, et explore les approches de gestion durable des risques environnementaux, notamment à travers la norme ISO 14001 et les principes de la Convention de Ramsar.

2- Pollution atmosphérique et particules fines PM2.5

Les aérosols atmosphériques constituent l'un des éléments les plus dynamiques et les plus complexes de l'atmosphère terrestre. Ils regroupent un ensemble de particules liquides ou solides en suspension, dont le diamètre aérodynamique varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres. Ces particules proviennent de sources très diverses et subissent, tout au long de leur cycle atmosphérique, des transformations physico-chimiques intenses : réactions homogènes et hétérogènes, coagulation, condensation, évaporation, interactions avec la vapeur d'eau (hygroscopicité) et processus photochimiques induits par le rayonnement ultraviolet (Seinfeld & Pandis, 2016 ; Pöschl, 2005).

Ces aérosols jouent un rôle central dans de nombreux phénomènes environnementaux : formation et modification des nuages par nucléation, dégradation de la couche d'ozone stratosphérique, production d'ozone troposphérique, smogs photochimiques, pluies acides et altération du bilan radiatif terrestre. Leur effet sur le climat s'exerce à la fois de manière directe (diffusion et absorption du rayonnement) et indirecte (modification des propriétés optiques et de durée de vie des nuages). Selon le GIEC (IPCC, 2021 ; 2023), l'incertitude associée aux aérosols reste l'une des principales limites à la fiabilité des modèles climatiques globaux.

Parmi les fractions particulaires, les PM2.5 (particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 µm) suscitent une préoccupation majeure en raison de leur fort impact sanitaire. Leur petite taille leur permet de pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire, d'atteindre les alvéoles pulmonaires et de traverser la barrière alvéolo-capillaire pour entrer dans la circulation sanguine. Les conséquences sont multiples : exacerbation des maladies respiratoires chroniques (asthme, BPCO), augmentation du risque cardiovasculaire, cancers du poumon, effets neurotoxiques, impacts sur le développement fœtal et mortalité prématurée (WHO, 2021 ; Burnett et al., 2018 ; Cohen et al., 2017).

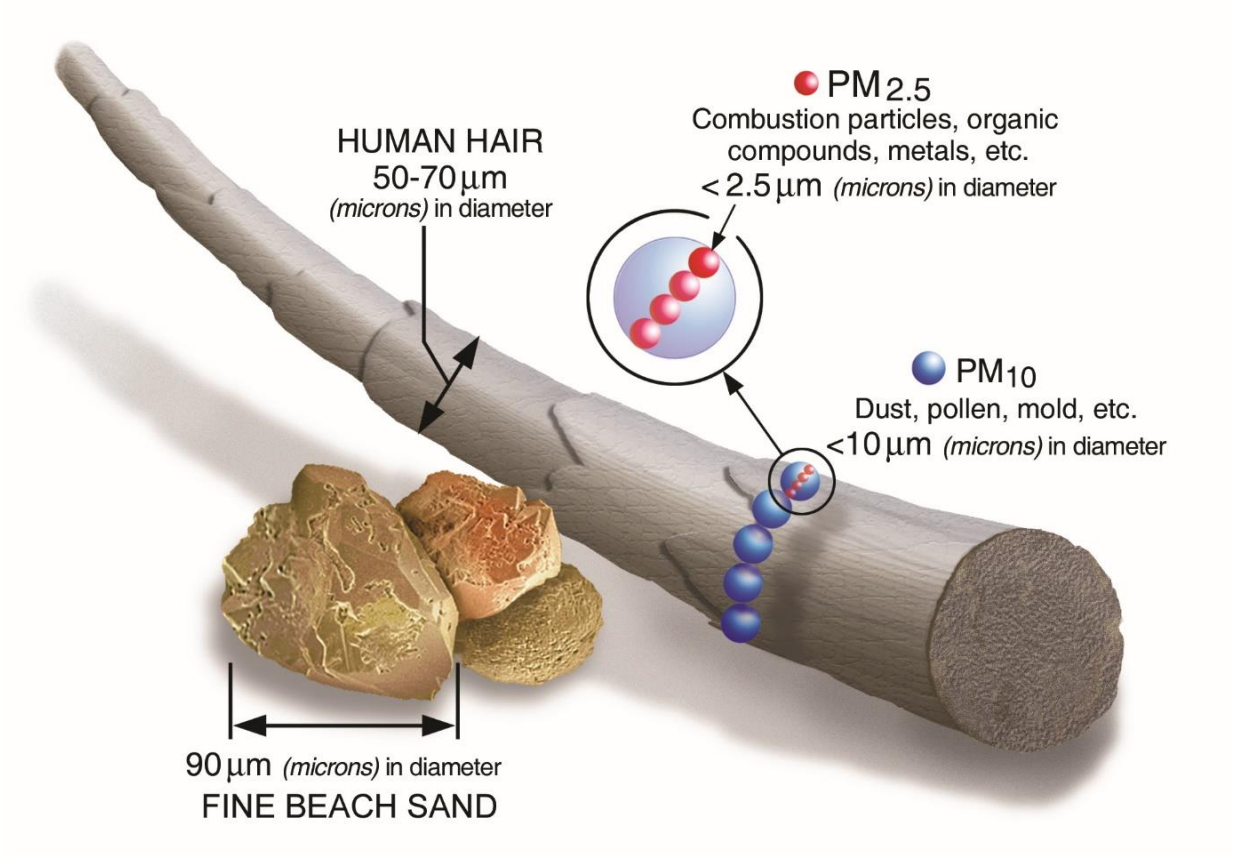


Figure 1.1 Exemple de la particule PM2.5 en comparant avec le cheveu humain (50-70 µm) et le sable fin d'une plage (90 µm) (Source : https://hydroterra.com.au/dust-and-dust-measurement-an-introduction/) 18 May 2022

Le rapport *State of Global Air* (Health Effects Institute, 2022) estime que l'exposition aux PM2.5 est responsable de plus de 6,7 millions de décès prématurés par an dans le monde. En Afrique du Nord, les concentrations moyennes annuelles dépassent largement les recommandations de l'OMS. Les sources anthropiques (trafic, industrie, combustion) coexistent avec des sources naturelles dominantes dans les régions arides : poussières sahariennes, embruns marins et émissions issues des sebkhas.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les PM2.5 sont le polluant atmosphérique le plus nocif, lié à des problèmes de santé importants aux États-Unis comme dans le monde entier. En 2019, l'exposition à long terme aux PM2.5 a causé environ 4,14 millions de décès dans le monde, représentant 62 % de toutes les morts liées à la pollution de l'air. Plus précisément, leurs dangers peuvent être divisés en effets à court terme et à long terme :

2-1 Effets à court terme sur la santé

Une exposition à court terme à des niveaux élevés de PM2.5 peut provoquer des effets immédiats sur la santé tels que : (1) Irritation des yeux, du nez et de la gorge, (2) Toux, éternuements et difficultés respiratoires, (3) Aggravation des crises d'asthme, (4) Battements cardiaques irréguliers.

2-2 Effets à long terme sur la santé

Une exposition à long terme peut entraîner des problèmes de santé graves, notamment : (1) Maladies cardiovasculaires telles que les crises cardiaques, (2) Maladies respiratoires telles que la maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC), (3) Risque accru de cancer du poumon, (4) Décès prématuré chez les personnes atteintes de maladies cardiaques ou pulmonaires.

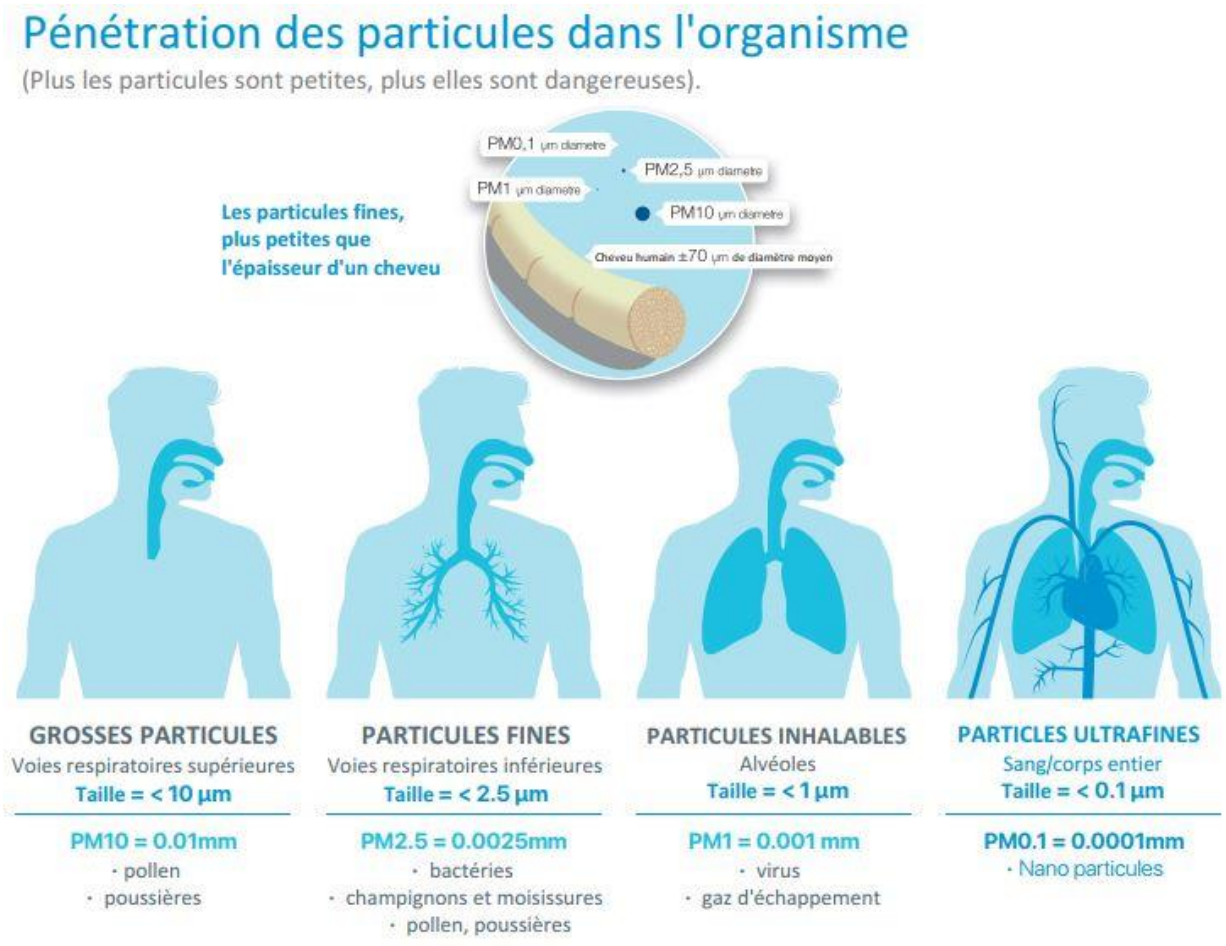


Figure 1.2 Pénétration des particules dans l'organisme (Source : https://www.afprofilters.com/fr/mesurer-particules-fines-pm1-pm25-pm10/)*16 janvier 2017*

Les PM2.5 proviennent de diverses sources, à la fois humaines et naturelles, et peuvent être composés de centaines de produits chimiques différents. Les principaux contributeurs incluent :

A- Sources de combustion : La combustion de combustibles fossiles dans les véhicules, les centrales électriques et les industries est une source majeure. Le chauffage ou la cuisson au bois contribue également de manière significative. Les récents feux de forêt sont aussi une des causes de la hausse des niveaux de PM2.5. Pour les contre-mesures, consultez : Comment se protéger après un feu de forêt ?

B- Sources intérieures : Fumées de cuisson, fumée de tabac et bougies.

C- Processus industriels : Les usines, les chantiers de construction et les opérations minières libèrent des PM2.5 dans l'atmosphère.

D- Agriculture : Les activités agricoles, y compris l'élevage et l'utilisation d'engrais, peuvent générer des PM2.5.

E- Sources naturelles : Bien que l'activité humaine soit en grande partie responsable, des événements naturels comme les feux de forêt, les tempêtes de poussière et les éruptions volcaniques contribuent également aux niveaux de PM2.5.



Figure 1.3 Principales sources des concentrations en PM2.5 (Source : https://www.inkbird.com/fr/blogs/news/how-pm2-5-affects-your-health-sources-and-effects) 11 avril 2025

3- Zones humides : définition, classification, fonctions et importance stratégique

Les zones humides constituent l'un des écosystèmes les plus productifs, les plus diversifiés biologiquement et les plus vulnérables de la planète. Situées à l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques, elles jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des paysages et dans la régulation des processus biogéochimiques à l'échelle locale, régionale et globale. L'eau, qu'elle soit permanente ou temporaire, stagnante ou courante, représente le facteur écologique déterminant qui contrôle la structure des sols, la composition des communautés végétales et animales, ainsi que les flux de matière et d'énergie (Mitsch & Gosselink, 2015 ; Keddy, 2010).

La définition la plus largement reconnue et utilisée au niveau international est celle de la Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, adoptée à Ramsar (Iran) en 1971. Selon l'Article 1.1 de cette convention : « Les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres » (Convention de Ramsar, 1971).



Figure 1.4 Extrait des zones humides (Source https://www.cieau.com/connaitre-leau/leau-dans-la-nature/zones-humides/) 06 janvier 2025

Cette définition se distingue par son caractère large et fonctionnel. Elle ne se limite pas aux milieux aquatiques permanents, mais inclut également les zones inondées de manière temporaire ou saisonnière. L'Article 2.1 de la Convention élargit encore cette notion en permettant d'inclure les zones adjacentes (rives, berges, îles) lorsqu'elles sont liées fonctionnellement à la zone humide principale. Cette approche inclusive a permis d'inscrire plus de 2 500 sites Ramsar dans le monde, couvrant plus de 250 millions d'hectares (Ramsar Convention Secretariat, 2023).

Sur la base de cette définition, les zones humides sont généralement classées en trois grandes catégories principales :

3-1 Zones humides marines et côtières : Elles incluent les lagunes, les estuaires, les mangroves, les marais salants, les deltas, les récifs coralliens et les zones intertidales. Ces milieux sont fortement influencés par les interactions entre eaux marines et continentales.

3-2 Zones humides continentales (ou intérieures) : Elles regroupent les lacs, les rivières, les marais d'eau douce, les tourbières, les sebkhas, les chotts et les zones inondables. La Grande Sebkha d'Oran appartient à cette catégorie.

3-3 Zones humides artificielles : Créées ou fortement modifiées par l'homme, elles comprennent les réservoirs, les étangs d'aquaculture, les rizières, les canaux, les gravières et les stations de traitement des eaux usées (Ramsar Convention Secretariat, 2018).

Les zones humides rendent des services écosystémiques d'une valeur inestimable, souvent classés selon le cadre du Millenium Ecosystem Assessment (2005) en quatre catégories principales: (1) **Services d'approvisionnement** (eau, poissons, roseaux, bois, ressources génétiques), (2) **Services de régulation** (régulation hydrologique (stockage et ralentissement des crues), recharge des nappes phréatiques, épuration naturelle des eaux (rétention des nutriments, sédiments et polluants), régulation du climat (séquestration du carbone) et protection contre l'érosion), (3) **Services culturels** (patrimoine culturel, spirituel, récréatif, touristique et éducatif), (4) **Services de soutien** (formation des sols, cycles biogéochimiques et maintien de la biodiversité).

L'étude de Costanza et al. (2014) a estimé la valeur économique annuelle des services rendus par les zones humides à plus de 26 000 milliards de dollars américains, soit l'un des écosystèmes les plus précieux par unité de surface. Elles abritent en outre une biodiversité exceptionnelle, servant d'habitats à de nombreuses espèces endémiques ou menacées, et constituent des sites critiques pour les oiseaux migrateurs le long des grandes voies de migration (notamment la voie paléarctique-africaine).

Dans le contexte du changement climatique, les zones humides jouent un rôle majeur d'adaptation et d'atténuation. Elles agissent comme des « éponges naturelles » face aux événements extrêmes (inondations et sécheresses) et stockent d'importantes quantités de carbone organique, contribuant ainsi à la régulation du climat global (IPCC, 2022). Cependant, ces écosystèmes sont parmi les plus menacés : plus de 35 % des zones humides mondiales ont disparu depuis 1970, principalement sous l'effet de l'urbanisation, de l'agriculture intensive, du drainage et de la pollution (Ramsar Convention Secretariat, 2023).

4- Les sebkhas : caractéristiques, typologie, formation et rôle dans les environnements arides et semi-arides

Les sebkhas (ou sabkhas) constituent des formations géomorphologiques caractéristiques des régions arides et semi-arides, particulièrement répandues en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et dans certaines zones désertiques côtières. Ces milieux représentent des dépressions fermées où s'accumulent les sels sous l'effet combiné d'une forte évaporation, d'une faible pluviométrie et d'un drainage limité. Les sebkhas sont généralement caractérisées par des sols salins ou hypersalins, une végétation halophile clairsemée et une dynamique hydrologique fortement saisonnière (Goudie & Wells, 1995 ; Warren, 2006).

Du point de vue morphologique, les sebkhas apparaissent comme des plaines basses relativement plates, souvent recouvertes de croûtes salines blanches composées principalement de chlorure de sodium (halite), de gypse et d'autres évaporites. Ces croûtes se forment sous l'effet de l'évaporation intense qui provoque la remontée capillaire des eaux souterraines riches en sels dissous. En période humide, les sebkhas peuvent être temporairement inondées par les eaux de ruissellement ou les précipitations saisonnières, tandis qu'en période sèche elles deviennent des surfaces très fragiles et sensibles à l'érosion éolienne (Cooke et al., 1993).

Les sebkhas peuvent être classées en deux grandes catégories : les sebkhas côtières et les sebkhas continentales. Les sebkhas côtières se développent à proximité des littoraux marins et sont influencées directement par les intrusions marines, les marées et les embruns salés. Elles sont fréquentes dans les régions côtières du Golfe Persique, du Sahara atlantique et du littoral méditerranéen. Les sebkhas continentales, quant à elles, se situent à l'intérieur des terres dans des bassins endoréiques fermés. Elles sont alimentées principalement par les eaux de ruissellement provenant des reliefs environnants, les oueds temporaires et les remontées de nappes phréatiques salées. La Grande Sebkha d'Oran en Algérie constitue un exemple représentatif de sebkha continentale (Benyahia et al., 2014).



Figure 1.5 Extrait de la sebkha (Source https://elwatan.dz/la-dgf-celebrera-la-journee-mondiale-des-zones-humides-a-bechar/)

La formation des sebkhas est étroitement liée aux conditions climatiques et géologiques des milieux arides. Dans les zones à faible pluviométrie et forte évaporation, les eaux de surface et les eaux souterraines concentrent progressivement les sels dissous. Au fil du temps, ces sels précipitent et s'accumulent dans les dépressions fermées, donnant naissance à des dépôts évaporitiques. Les mouvements tectoniques jouent également un rôle important dans la formation des sebkhas en créant des bassins de subsidence favorables à l'accumulation des eaux et des sédiments. Dans certains cas, les variations climatiques quaternaires ont contribué à l'évolution de ces milieux en alternant des phases humides et arides qui ont modifié les régimes hydrologiques et sédimentaires (Rosen, 1994).

Les sols des sebkhas possèdent des caractéristiques physico-chimiques particulières. Ils présentent généralement une forte teneur en sels solubles, une faible perméabilité et une structure fragile. Les phénomènes de dessiccation provoquent fréquemment l'apparition de fissures polygonales et de croûtes superficielles. Ces propriétés rendent les sebkhas particulièrement sensibles à l'érosion éolienne, notamment lorsque la couverture végétale est réduite. Les vents forts peuvent alors mobiliser de grandes quantités de poussières fines et de particules salines, contribuant à la dégradation de la qualité de l'air dans les régions avoisinantes (Middleton & Goudie, 2001).

Malgré des conditions environnementales extrêmes, les sebkhas jouent un rôle écologique majeur dans les régions arides et semi-arides. Elles abritent une biodiversité spécifique adaptée à la salinité élevée et aux contraintes hydriques. La végétation halophile est dominée par des espèces telles que Salicornia, Suaeda, Atriplex et Salsola, capables de survivre dans des sols fortement salins. Ces plantes jouent un rôle essentiel dans la stabilisation des sols et la réduction de l'érosion éolienne. Les sebkhas constituent également des habitats importants pour de nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs qui utilisent ces milieux comme zones de repos, d'alimentation et de reproduction le long des voies migratoires afro-paléarctiques (Mitsch & Gosselink, 2015).



Figure 1.6 Rôle des sebkhas pour les oiseaux migrateurs (Source : https://fr.hespress.com/127645-protection-des-zones-humides-le-maroc-peut-mieux-faire.html) jeudi 27 février 2020 - 10:41

Sur le plan hydrologique, les sebkhas agissent comme des zones tampons capables de stocker temporairement les eaux de ruissellement lors des épisodes pluvieux. Elles contribuent ainsi à limiter les risques d'inondation dans les zones périphériques. Elles participent également aux échanges entre les eaux de surface et les nappes souterraines. Toutefois, dans les contextes de changement climatique et d'augmentation des périodes de sécheresse, ces écosystèmes deviennent de plus en plus vulnérables. La diminution des apports hydriques et l'intensification de l'évaporation favorisent l'assèchement des surfaces et augmentent les risques de désertification (IPCC, 2021).

Les activités humaines accentuent souvent cette fragilité environnementale. L'urbanisation, le surpâturage, l'exploitation des ressources en eau et les pratiques agricoles inadaptées contribuent à la dégradation des sebkhas. La destruction du couvert végétal favorise la remise en suspension des particules fines et accentue les phénomènes de tempêtes de poussières. Dans certaines régions, les sebkhas deviennent ainsi des sources importantes de pollution atmosphérique naturelle, notamment en PM10 et PM2.5 (Goudie, 2014).

5- Dynamique environnementale des sebkhas : sécheresse, érosion et tempêtes de poussières

5-1 La sécheresse : un facteur structurant

La sécheresse constitue un facteur structurant majeur dans la dynamique environnementale des sebkhas. Dans les régions arides et semi-arides, elle se manifeste sous trois formes interconnectées — météorologique, édaphique et hydrologique — entraînant un assèchement prolongé des sols, une concentration capillaire des sels en surface et la formation de croûtes salines friables

(Chikhaoui et al., 2017 ; Zeidan, 2025). Ce processus fragilise la cohésion des sédiments, réduit drastiquement le couvert végétal halophile et augmente considérablement la vulnérabilité des sols à l'érosion éolienne. Dans le cas de la Grande Sebkha d'Oran, l'intensification des épisodes de sécheresse accentue le dessèchement de la surface, favorisant la mobilisation des particules fines (PM2.5) lors des vents forts (Bendib, 2025 ; WMO, 2025).

La sécheresse se manifeste sous trois formes interconnectées :

- **Sécheresse météorologique** : déficit prolongé de précipitations.
- **Sécheresse édaphique** : manque d'eau disponible dans les sols.
- **Sécheresse hydrologique** : baisse des niveaux des nappes et des ressources en eau de surface.



Figure 1.7 Processus de sécheresse (Source : https://www.wwf.fr/nos-champs-daction/secheresse-comprendre-pour-agir)

Ces phénomènes sont amplifiés par la nature endoréique du bassin et la forte évaporation. Les périodes de déficit pluviométrique prolongé entraînent le dessèchement complet de la surface, la concentration des sels par évaporation capillaire et la formation de croûtes salines cassantes. La faible couverture végétale, déjà limitée par la salinité élevée, se dégrade davantage, laissant les sols exposés aux agents érosifs (Sécheresse : définition, causes, conséquences, 2024).

5-2 L'érosion éolienne : processus dominant

Dans les environnements semi-arides l'érosion éolienne est largement prédominante par rapport à l'érosion hydrique (qui reste faible en raison de la rareté et de l'irrégularité des pluies). Le processus commence par la dessiccation des sols salins qui perdent leur cohésion. Lorsque la

vitesse du vent dépasse le seuil d'érosion (généralement entre 6 et 20 km/h selon la granulométrie et l'humidité du sol), les particules fines sont mobilisées par trois mécanismes principaux :

- **Saltation** : bonds des particules de sable (0,1 à 0,5 mm) ;
- **Suspension** : mise en suspension des particules fines (PM10 et PM2.5) ;
- **Reptation** : déplacement par roulement des grains plus grossiers.

Les sols de la sebkha, riches en limons, argiles et sels, sont particulièrement sensibles. Les activités anthropiques (surpâturage, agriculture en périphérie, urbanisation) accentuent cette vulnérabilité en réduisant encore le couvert végétal protecteur (Bensaïd, 2006 ; Hachemi et al., 2020).

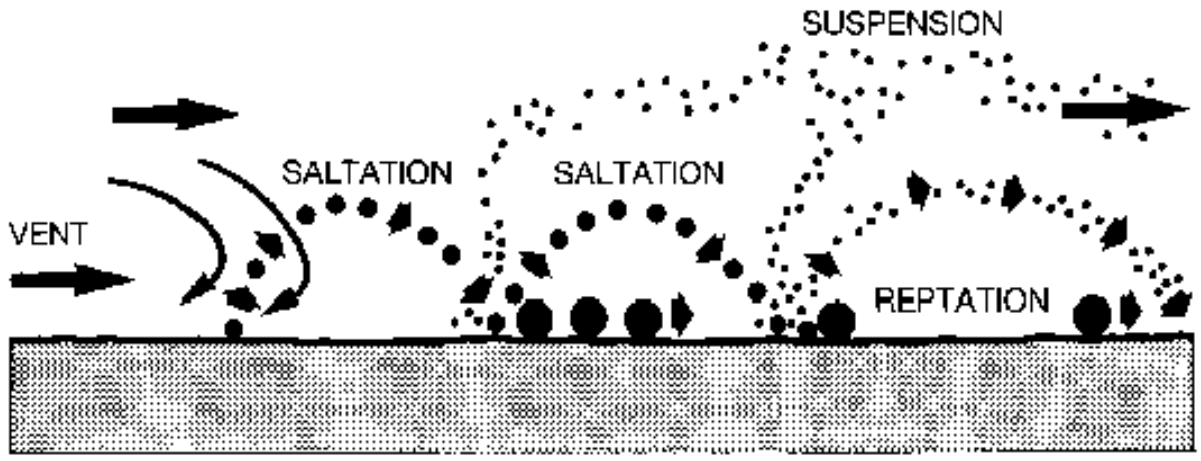


Figure 1.8 Les mécanismes de l'érosion éolienne (Source : https://www.fao.org/4/t0492f/t0492f04.htm) **5-2026**

5-3 Tempêtes de poussières (Sand and Dust Storms)

Les épisodes de vents forts, fréquents en période sèche, déclenchent des tempêtes de poussières locales ou régionales. Ces phénomènes transportent les particules salines et minérales sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres, affectant directement l'agglomération oranaise. Les impacts sont multiples:

- Dégradation de la qualité de l'air par augmentation des concentrations de PM2.5 et PM10
- Réduction de la visibilité (risques pour le transport aérien et routier)
- Effets sanitaires (maladies respiratoires, irritations)
- Dépôts sur les cultures, les infrastructures solaires et les bâtiments

- Altération des écosystèmes récepteurs par apport de sels.

Cependant, ces poussières jouent aussi un rôle positif à l'échelle globale en transportant des nutriments (fer, phosphore) vers les océans et les forêts lointaines (WMO, 2025 ; Goudie & Middleton, 2006).



Figure 1.9 Exemple d'une tempête de poussière (Source : https://fr.mongabay.com/2024/06/quel-phenomene-environnemental-se-cache-derriere-ces-impressionnantes-tempetes-de-poussiere/) **27 Juin 2024**

Dans le cas de la Grande Sebkha d'Oran, la combinaison de la sécheresse récurrente, de la faible perméabilité des sols, de l'absence de végétation dense et des vents dominants (ouest et nord-ouest) crée des conditions optimales pour l'émission de poussières. Les études diachroniques par imagerie radar et Landsat montrent une variabilité importante de l'étendue de l'eau en surface et une tendance à l'assèchement accentué ces dernières décennies, renforçant la sensibilité éolienne du milieu (Benkesmia et al., 2023 ; Hachemi et al., 2020).

Cette dynamique environnementale place les sebkhas au cœur des enjeux de désertification, de dégradation des terres et de pollution atmosphérique naturelle en Algérie nord-occidentale. Elle appelle à une surveillance continue et à des stratégies de restauration écologique adaptées.

6- Contribution des sebkhas à la pollution atmosphérique naturelle

La contribution des sebkhas à la pollution atmosphérique naturelle représente un phénomène complexe et multifactoriel, particulièrement prononcé dans les environnements arides et semi-

arides d'Afrique du Nord. Contrairement à la pollution anthropique issue des activités humaines, la pollution naturelle liée aux sebkhas est principalement d'origine géochimique et géomorphologique, bien qu'elle soit souvent amplifiée par les conditions climatiques et les perturbations anthropiques périphériques.

Le premier mécanisme majeur est la mobilisation éolienne des particules salines et minérales. Les sols des sebkhas, riches en sels (chlorure de sodium, sulfate de calcium sous forme de gypse), en argiles et en particules silteuses, deviennent extrêmement fragiles en période de dessèchement. Lorsque l'humidité superficielle descend en dessous d'un seuil critique, la cohésion des particules diminue, facilitant leur soulèvement par le vent. Les processus de saltation (saut des particules grossières), de suspension (transport des fines particules en altitude) et de reptation permettent la mise en suspension de quantités importantes de PM10 et surtout de PM2.5. Ces particules, souvent chargées en sels hygroscopiques, peuvent rester en suspension pendant plusieurs jours et être transportées sur des dizaines voire des centaines de kilomètres (Goudie & Middleton, 2006 ; Chikhaoui et al., 2017).

Le deuxième mécanisme est lié à l'évaporation capillaire et à la concentration des sels en surface. Dans les sebkhas, la nappe phréatique souvent peu profonde remonte par capillarité. L'évaporation intense, caractéristique du climat semi-aride (plus de 1 500 mm/an à Oran), provoque la précipitation de croutes salines et gypseuses à la surface du sol. Ces efflorescences, très friables, sont facilement fragmentées et émises sous forme d'aérosols lors des épisodes venteux. Les sels volatils et les particules fines ainsi libérées contribuent non seulement à l'augmentation des concentrations de PM2.5, mais aussi à la formation d'aérosols secondaires par réactions chimiques dans l'atmosphère (Zeidan, 2025).

Troisièmement, les variations saisonnières du niveau de la nappe phréatique jouent un rôle déterminant. En période humide (hiver), l'inondation partielle de la sebkha stabilise temporairement les sols. En revanche, durant la longue saison sèche (été), le niveau de la nappe baisse, favorisant le dessèchement profond des sédiments et la formation de fissures polygonales. Ces fissures augmentent la surface exposée au vent et facilitent l'émission de poussières. Les études géotechniques réalisées sur la Grande Sebkha d'Oran ont mis en évidence une forte variabilité lithologique avec des horizons d'argiles gypseuses très sensibles à ces fluctuations (Chikhaoui et al., 2017).

Quatrièmement, les caractéristiques géologiques et sédimentologiques de la sebkha renforcent sa contribution à la pollution particulaire. Les dépôts quaternaires, constitués d'alluvions issues de

l'érosion des massifs environnants (Murdjadjo et Tessala), combinés aux précipitations évaporitiques historiques, créent un réservoir important de particules fines. La présence abondante de gypse et de sels solubles confère aux aérosols émis une composition chimique particulière, souvent plus hygroscopique et plus réactive que les poussières désertiques classiques.

Enfin, les activités humaines périphériques exercent un effet amplificateur. Le surpâturage, l'agriculture irriguée mal gérée, l'urbanisation rampante et le défrichement réduisent le couvert végétal protecteur, augmentant ainsi la vulnérabilité des sols de la sebkha à l'érosion éolienne. Cette interaction entre facteurs naturels et anthropiques rend parfois difficile la distinction claire entre pollution « naturelle » et pollution « induite ».



Figure 1.10 Exemple de la contribution des sebkhas à la pollution atmosphérique

7- Télédétection et surveillance des PM2.5 : approches, méthodes et applications

La télédétection (remote sensing) est devenue, au cours des deux dernières décennies, un outil incontournable et particulièrement puissant pour la surveillance de la pollution atmosphérique par les aérosols et les particules fines PM2.5. Dans les régions où les réseaux de stations de mesure au sol sont rares, coûteux ou inégalement répartis — comme c'est le cas en Algérie et dans de nombreux pays d'Afrique du Nord —, la télédétection offre une solution spatiale et temporelle continue qui complète efficacement les observations in situ.

Le paramètre fondamental mesuré par satellite est la Profondeur Optique des Aérosols (AOD ou Aerosol Optical Depth). Il s'agit d'une mesure sans dimension qui quantifie l'extinction totale (diffusion + absorption) du rayonnement solaire par les aérosols sur l'ensemble de la colonne atmosphérique. Plus l'AOD est élevé, plus la charge atmosphérique en aérosols est importante.

Parmi les capteurs les plus utilisés figurent :

- **MODIS** (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) à bord des satellites Terra et Aqua (NASA) : résolution spatiale de 3 à 10 km, revisite quotidienne, algorithmes Dark Target (sur surfaces sombres) et Deep Blue (sur surfaces brillantes comme les déserts et sebkhas) ;
- **VIIRS** (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) à bord de Suomi NPP et NOAA-20 ;
- **MISR** (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) qui permet une meilleure caractérisation des propriétés des aérosols grâce à ses neuf angles de vue ;
- **TROPOMI** (TROPOspheric Monitoring Instrument) à bord de Sentinel-5 Precursor (ESA) pour une résolution plus fine et une détection des polluants gazeux associés ;
- Capteurs géostationnaires (ex. : Himawari-8/9, GOES-R) offrant une fréquence horaire ou sub-horaire.

Cependant, l'AOD ne fournit pas directement les concentrations de PM2.5 au niveau du sol. La conversion AOD en PM2.5 nécessite des approches sophistiquées :

A- Modèles de transport chimique atmosphérique (CTM) : tels que GEOS-Chem, utilisés par van Donkelaar et al. (2006, 2010, 2021) pour produire des estimations globales de PM2.5 à haute résolution (0,01° × 0,01°). Ces modèles intègrent la hauteur de la couche limite planétaire (PBL), l'humidité relative, la composition chimique des aérosols et les profils verticaux.

B- Approches statistiques et empiriques : régression linéaire multiple, modèles géographiquement pondérés (GWR), ou modèles mixtes qui combinent AOD avec des variables météorologiques (température, humidité, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique) et des données d'occupation du sol.

C- Méthodes d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle : Random Forest, Gradient Boosting Machines (XGBoost, LightGBM), réseaux de neurones profonds (CNN, LSTM) et modèles hybrides. Ces approches ont montré une amélioration significative de la

précision (R^2 souvent supérieur à 0,85 dans les validations croisées) en tenant compte des non-linéarités et des interactions complexes entre variables (Shen et al., 2024 ; Li et al., 2023).

7-1 Avantages de la télédétection

- Couverture spatiale large et homogène, y compris dans les zones désertiques et semi-arides difficiles d'accès ;
- Fréquence temporelle élevée permettant le suivi des événements épisodiques (tempêtes de poussières) ;
- Possibilité d'analyser les tendances à long terme (plus de 20 ans avec MODIS) ;
- Coût relativement faible comparé au déploiement d'un réseau dense de stations au sol ;
- Capacité à cartographier les gradients spatiaux et à identifier les « points chauds » de pollution.

7-2 Limites et sources d'incertitude

- Sensibilité réduite aux aérosols proches du sol lorsque la couche limite est basse ;
- Influence de la hauteur des aérosols dans la colonne atmosphérique ;
- Difficultés liées à la présence de nuages, à la brillance des surfaces (déserts, sebkhas) et à la variabilité de la composition chimique des aérosols ;
- Nécessité d'une calibration locale avec des données in situ pour réduire les biais régionaux.

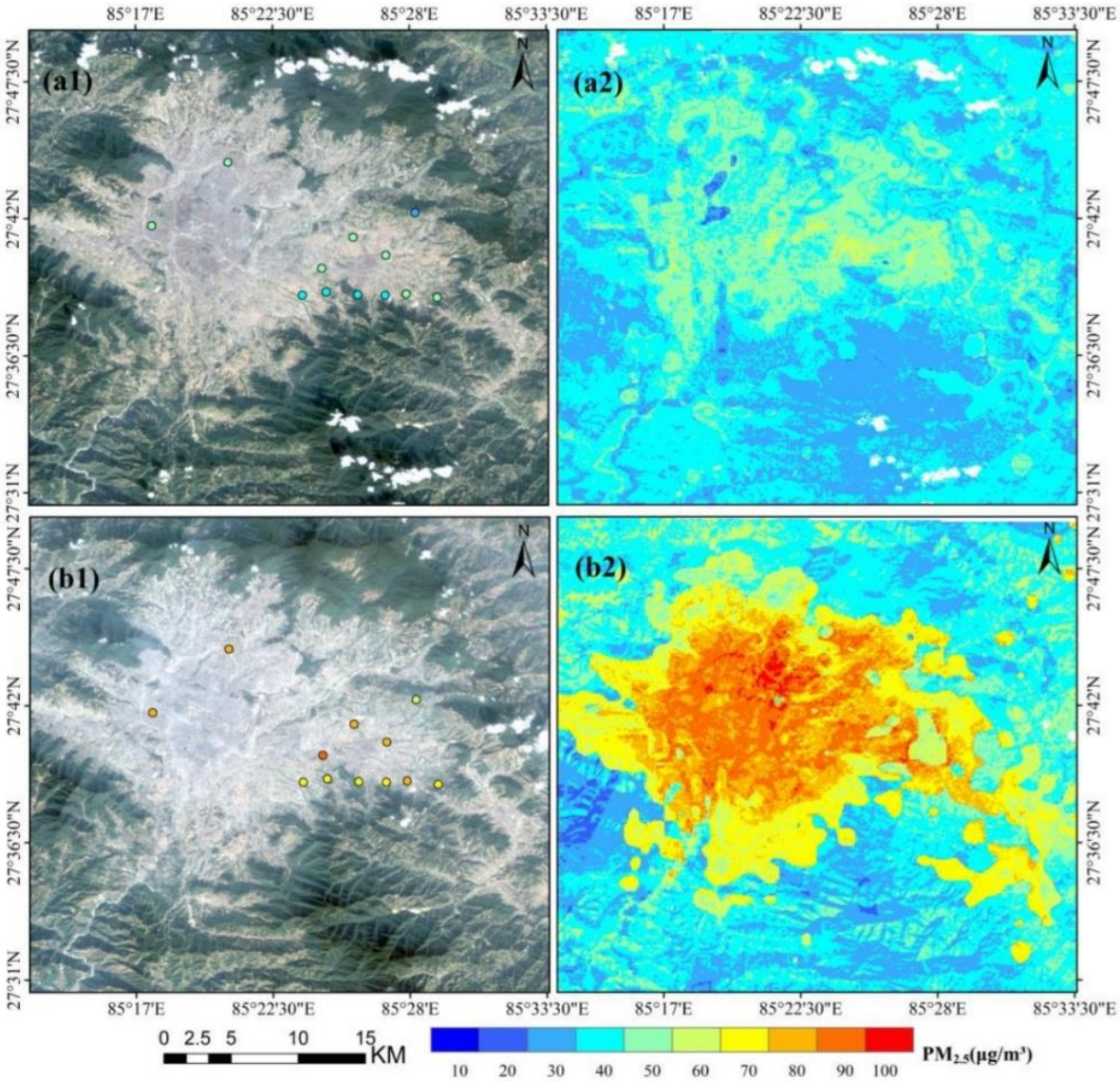


Figure 1.11 Exemple d'utilisation de la télédétection dans le suivi temporel des concentrations en PM2.5 (Source : https://www.mdpi.com/2072-4292/15/23/5489) **24 November 2023**

8- Gestion des risques, approches de durabilité et outils de management environnemental

La gestion durable des sebkhas et de la pollution atmosphérique associée nécessite une approche intégrée, multidisciplinaire et participative combinant connaissances scientifiques, outils techniques, cadres réglementaires et engagement des parties prenantes.

La norme internationale ISO 14001 (Système de Management Environnemental) représente l'un des outils les plus structurés et les plus reconnus à l'échelle mondiale. Elle est basée sur le cycle d'amélioration continue PDCA (Plan-Do-Check-Act ou Roue de Deming) et permet aux organisations et aux collectivités territoriales d'identifier leurs aspects environnementaux significatifs, d'évaluer les risques et opportunités, de définir des objectifs et cibles, et de mettre en œuvre des actions préventives et correctives (ISO, 2025 ; Morin & Marquis).

Dans le contexte spécifique des sebkhas, l'application de l'ISO 14001 peut concerner :

- Le suivi continu de la qualité de l'air et des concentrations de PM2.5 ;
- La stabilisation des sols superficiels (techniques de fixation biologique avec espèces halophytes, géotextiles, ou amendements) pour limiter la remise en suspension des poussières ;
- La restriction ou la régulation des activités anthropiques (urbanisation, agriculture, industries) lors des épisodes de vents forts ou de sécheresse extrême ;
- Le renforcement du couvert végétal et la restauration écologique des franges de la sebkha ;
- La sensibilisation et l'implication des populations locales et des acteurs économiques.

D'autres approches complémentaires sont nécessaires :

- **Approche écosystémique et Ramsar** : intégration des principes de la Convention de Ramsar dans les documents d'urbanisme (PDAU, Schémas directeurs) afin de préserver les fonctions hydrologiques et écologiques des zones humides salines ;
- **Gestion intégrée des zones côtières et semi-arides (GIZC)** : coordination entre acteurs (wilaya, communes, agences de l'environnement, protection civile) ;
- **Outils de planification territoriale** : cartographie des zones à risque, zonage réglementaire, création de corridors écologiques ;
- **Mesures techniques** : mise en place de rideaux végétaux brise-vent, techniques de lutte contre l'érosion éolienne, utilisation de suppressants chimiques non polluants en cas d'urgence ;
- **Systèmes d'alerte précoce** : intégration des données de télédétection et des prévisions météorologiques pour anticiper les pics de PM2.5 et protéger les populations vulnérables (enfants, personnes âgées, malades respiratoires).

Au niveau politique et institutionnel, il est indispensable de renforcer la coopération entre le Ministère de l'Environnement, l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE), la Protection Civile, les universités et les collectivités locales. La mise en place de plans d'action locaux de lutte contre la pollution particulaire et d'adaptation au changement climatique s'avère urgente.

Enfin, une approche de justice environnementale doit être adoptée, car les populations des quartiers sud et sud-est d'Oran, souvent les plus exposées aux poussières de la sebkha, sont également celles qui disposent des ressources les moins importantes pour faire face aux impacts sanitaires et socio-économiques.

9- Conclusion

Ce premier chapitre a posé les fondements théoriques, scientifiques et méthodologiques de l'étude. Il a mis en évidence le rôle complexe et ambivalent des sebkhas dans les environnements semi-arides : écosystèmes fragiles aux fonctions écologiques et hydrologiques importantes, mais également sources naturelles significatives de pollution atmosphérique par les PM2.5.

L'analyse a souligné l'importance des interactions entre climat, géomorphologie, dynamique éolienne et activités humaines. Elle a également démontré le potentiel de la télédétection comme outil de surveillance spatiale et temporelle performant, ainsi que la nécessité d'une gestion intégrée reposant sur des outils normalisés tels que l'ISO 14001 et les principes de la Convention de Ramsar.

Les chapitres suivants décriront en détail la zone d'étude, présenteront la méthodologie adoptée et analyseront les résultats empiriques relatifs à la variabilité spatio-temporelle des PM2.5 dans la région d'Oran.

Chapitre 2 :

Description de la zone d'étude

1- Introduction

Ce chapitre propose une description détaillée de la zone d'étude. Il vise à analyser ses caractéristiques physiques, environnementales et humaines afin de mieux appréhender sa dynamique spatiale et environnementale.

Il s'ouvre par une présentation générale de la zone, mettant en avant la localisation géographique d'Oran et de la Grande Sebkha, ainsi que leur importance à l'échelle régionale. Il aborde ensuite le cadre physique et environnemental à travers l'étude de la géologie, de la lithologie (appuyée par des cartes géologiques et lithologiques) et des conditions climatiques, notamment les précipitations, représentées via une carte pluviométrique.

Enfin, il examine les aspects humains et l'occupation du sol, en s'intéressant à la population, à sa densité et à la répartition spatiale des activités, à l'aide de cartes thématiques. L'ensemble de l'analyse s'appuie sur l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), et plus particulièrement du logiciel ArcGIS, pour le traitement, l'analyse et la cartographie des données exploitées.

2- Description de la zone d'étude

2-1 Aperçu historique de la zone d'étude

La ville d'Oran (Ouahran) fut fondée en 903 par des marchands andalous sous l'autorité des Omeyyades de Cordoue. Établie sur un site portuaire naturel à Mers el-Kébir, elle servait de comptoir commercial reliant l'arrière-pays tellien, notamment le royaume zianide de Tlemcen, aux réseaux méditerranéens. Son nom, d'origine berbère probable (« wahran » : les lions), témoigne d'une occupation ancienne par les tribus berbères. Durant les périodes almoravide, almohade et zianide, Oran connaît un essor commercial important et accueille des populations andalouses fuyant la Reconquista à la fin du XVe siècle.

Conquise par les Espagnols en 1509, Oran devient une place forte stratégique en Méditerranée occidentale. Disputée entre Espagnols et Ottomans, elle est reprise par ces derniers en 1708, puis de nouveau par les Espagnols en 1732. Un violent séisme en 1790 entraîne sa destruction partielle et l'évacuation espagnole définitive en 1792, marquant son retour sous la Régence d'Alger.

Occupée par les Français en janvier 1831, Oran devient le chef-lieu du département d'Oran. La colonisation transforme profondément la ville par le développement du port, l'extension urbaine et l'arrivée massive de populations européennes. Au XXe siècle, elle constitue l'une des villes les plus européennes d'Afrique du Nord.

Après l'indépendance en 1962, marquée par l'exode des pieds-noirs, Oran redevient une métropole majeure de l'Ouest algérien, pôle économique, portuaire, universitaire et culturel (berceau du raï), avec une agglomération dépassant aujourd'hui le million d'habitants.

2-2 Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya d'Oran (Figure 2.1) est située dans le nord-ouest de l'Algérie, en bordure de la mer Méditerranée. Elle s'étend sur une superficie de 2 114 km² et occupe une position stratégique sur le littoral oranais, à environ 432 km à l'ouest d'Alger. Son chef-lieu, la ville d'Oran, se trouve au fond d'une baie ouverte sur le golfe d'Oran, à proximité du port de Mers el-Kébir.

La wilaya est limitée au nord par la mer Méditerranée sur une façade maritime d'environ 120 km, à l'est par la wilaya de Mostaganem, au sud-est par celle de Mascara, au sud-ouest par la wilaya de Sidi Bel Abbès et à l'ouest par celle d'Aïn Témouchent. Son relief est contrasté : il associe une étroite plaine littorale, des massifs montagneux tels que le Murdjajo (Aïdour) à l'ouest d'Oran et

le Tessala au sud, ainsi que la vaste dépression de la Grande Sebkha d'Oran, située au sud de la ville (Oran, 2025).

Le climat est de type méditerranéen semi-aride, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers relativement doux et humides, avec des précipitations annuelles moyennes comprises entre 350 et 450 mm. Cette situation géographique confère à la wilaya une vocation à la fois portuaire, agricole et industrielle.

La ville d'Oran est située à l'ouest de l'Algérie entre -0.54° et -0.71° de longitude ouest et 35.34 et 35.76° de latitude nord. Administrativement elle est limitée à l'ouest par la commune de Messerghin, au nord-ouest par celle de Mers El Kébir, au nord par la mer Méditerranée, au Nord-est par Bir El Djir, à l'est par Sidi Chahmi et au sud par la commune d'Es Sénia. Avec 25057ha de superficie, la ville d'Oran est une métropole régionale, c'est la deuxième ville et un pôle économique important du pays.

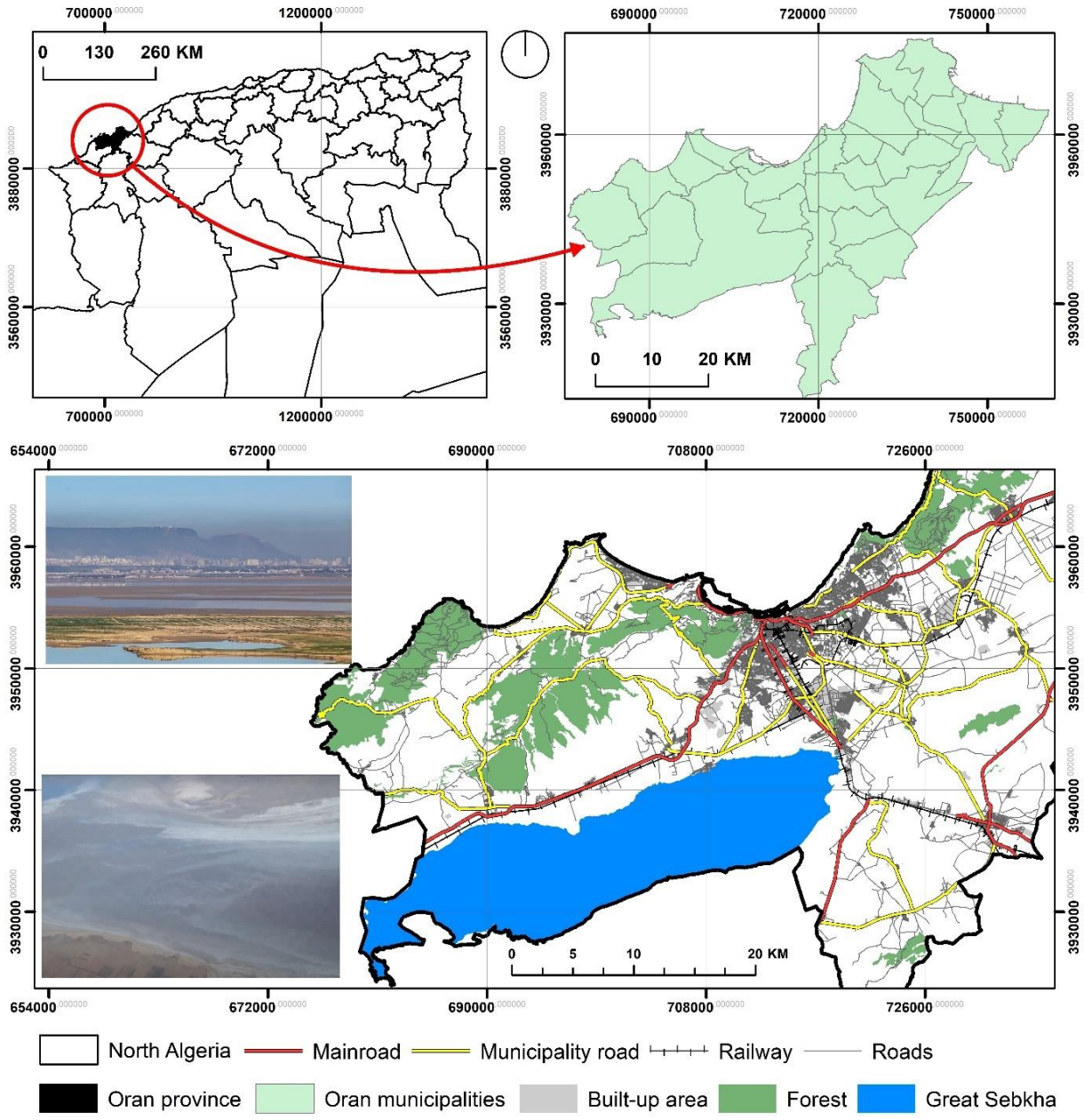


Figure 2.1 Localisation de la zone d'étude

2-3 La grande Sebkha d'Oran GSO

La Grande Sebkha d'Oran (Figure 2.2 et Figure 2.3) est un lac salé temporaire situé à environ 15 km au sud de la ville d'Oran, sur le territoire de la commune de Misserghin, à seulement 12 km de la mer Méditerranée. Elle occupe le fond d'une vaste dépression fermée, d'origine tectonique, située à une altitude moyenne de 110 mètres. Cette dépression est encadrée au nord par le massif du Murdjajo et au sud par le massif du Tessala.

De forme elliptique et orientée sud-ouest/nord-est, la sebkha s'étend sur une longueur d'environ 40 km pour une largeur variant entre 6 et 13 km. Sa topographie apparaît plane, mais elle présente

une légère pente vers l'ouest, avec un point bas à 80 mètres et un point haut à 82 mètres d'altitude (selon le nivellement général de l'Algérie). Dans son extrémité occidentale émerge un îlot culminant à 136 m, interprété comme une butte témoin de la sédimentation continentale pléistocène.

La Grande Sebkha s'est formée à la fin du Pliocène (Villafranchien) et au début du Quaternaire. À cette époque, les deux anticlinaux (Murdjajo au nord et Tessala au sud) encadraient un synclinal où se sont accumulées les eaux de ruissellement, donnant naissance à un bassin fermé. D'origine tectonique, cette dépression constitue aujourd'hui un bassin endoréique (BOUANANI & BENYAHIA, 2015).

Elle est alimentée par un réseau hydrographique drainant principalement les massifs du Tessala et du Murdjajo. Les eaux de surface, chargées en sels, forment une pellicule d'eau peu profonde (10 à 30 cm) en période humide. Cette lame d'eau s'évapore complètement durant l'été sous l'effet d'une forte évaporation et du climat semi-aride méditerranéen qui caractérise la région. Les précipitations annuelles varient entre 378 et 473mm. (Fiche descriptive Ramsar Algérie, 2019) ; (Sebkha d'Oran, 2025)

La salinité de la saumure est très élevée, atteignant localement plus de 100 g/l de sels dissous, soit près de trois fois celle de l'eau de mer. Les terres périphériques de la sebkha sont principalement mises en valeur par l'agriculture. Cependant, la présence de sel affecte négativement les franges sud de l'agglomération oranaise ainsi que les abords de l'aéroport d'Oran (pistes et infrastructures).

La Grande Sebkha d'Oran constitue l'une des zones humides les plus importantes de l'Ouest algérien. Classée site Ramsar depuis 2001, elle représente un écosystème salin endoréique caractérisé par une biodiversité adaptée aux conditions arides et hypersalées.

Du point de vue de la flore, la végétation de la Grande Sebkha d'Oran est principalement composée d'espèces halophiles capables de résister à une forte salinité. Les formations végétales dominantes comprennent : les salicornes et soudes (Suaeda sp.), les joncs (Juncus sp.), Arthrocnemum glaucum, quelques peuplements de roseaux (Phragmites australis), Scirpus sp., des touffes de palmier nain (Chamaerops humilis), quelques tamaris (Tamarix sp.) (Ramsar 2019).

Autour du bassin versant, on observe également des formations forestières composées de :

Pin d'Alep, eucalyptus, chêne-liège, thuya et cèdre.

Cette flore joue un rôle écologique essentiel dans la fixation des sols salins, la réduction de l'érosion et l'accueil de nombreuses espèces animales.

Pour la faune, la sebkha possède une richesse faunistique remarquable, surtout ornithologique. Elle constitue une importante aire d'hivernage, de repos et d'alimentation pour les oiseaux migrateurs paléarctiques. Parmi les espèces les plus représentatives figurent : le flamant rose (Phoenicopterus roseus), le tadorne de Belon (Tadorna tadorna), le tadorne casarca (Tadorna ferruginea), l'oie cendrée (Anser anser), plusieurs espèces d'échassiers et d'oiseaux limicoles) (Ramsar 2019).

Le site dépasse régulièrement le seuil international de 1 % des populations mondiales pour certaines espèces, notamment le flamant rose et le tadorne de Belon, ce qui confirme son importance écologique internationale.



Figure 2.2 Localisation de la grande Sebkha d'Oran (**Source** : (Ramsar Sites Information Service, 2001))



Figure 2.3 La Grande Sebkha d'Oran

3- Les caractéristiques topographiques

3-1 Les reliefs

La ville d'Oran est établie au fond d'une baie ouverte sur le golfe d'Oran, dominée à l'ouest par le massif de l'Aïdour (ou Murdjadjo), qui culmine à 429 m et sépare la ville de la commune d'Es-Senia. À l'est, l'urbanisation s'étend principalement vers Bir El Djir (AOUNIA & BELBRAHIM , 2021-2022 , p. 28).

La wilaya d'Oran présente six grandes unités géomorphologiques. Au nord, la bordure côtière est marquée par des falaises rocheuses et des collines du Sahel (monts d'Arzew et massif du Murdjadjo), qui forment des escarpements abrupts entre Arzew et Canastel. Au sud-ouest s'étend la basse plaine littorale de Bousfer–Les Andalouses, une pénéplaine légèrement inclinée vers la mer et drainée par l'oued Sidi Hammadi.

Le vaste plateau d'Oran–Gdyel s'étend des piémonts du Murdjadjo jusqu'au Sahel d'Arzew. Il se caractérise par l'absence de réseau hydrographique organisé et par la présence de nombreuses dépressions endoréiques, dont la Grande Sebkha d'Oran. Au sud, la plaine de la M'leta occupe la zone entre les piémonts du massif de Tessala et la bordure nord de la sebkha.

Les dépressions majeures, notamment la Grande Sebkha d'Oran (située autour de 80-82 m d'altitude) et les salines d'Arzew, constituent des éléments structurants du territoire. Le littoral alterne falaises rocheuses et plages sableuses, offrant une grande diversité morphologique.

La figure 2.4 et le tableau 2.1 présentent la répartition altimétrique de la wilaya d'Oran révèle un relief majoritairement bas et peu accidenté. Plus de la moitié de la superficie totale (52,65 %) se situe en dessous de 108 mètres d'altitude, tandis que près de 24 % se trouve entre 109 et 157 mètres. Les zones situées au-dessus de 229 mètres ne représentent que 6,12 % de la superficie totale. Cette dominance des basses et moyennes altitudes confère à la wilaya un caractère relativement plat, favorable à l'urbanisation et aux activités agricoles, mais également exposé aux risques d'inondation dans les secteurs les plus bas.

Tableau 2.1 Répartition spatiale des altitudes dans la zone d'étude

Classes	Superficie (ha)	Superficie (%)
-9 – 108 m	15133.09	52.65
109 – 157	6834.97	23.78
158 – 228	5017.08	17.45
229 – 341	1327.69	4.62
342 – 507 m	425.05	1.50
Total	**28737.90**	**100**

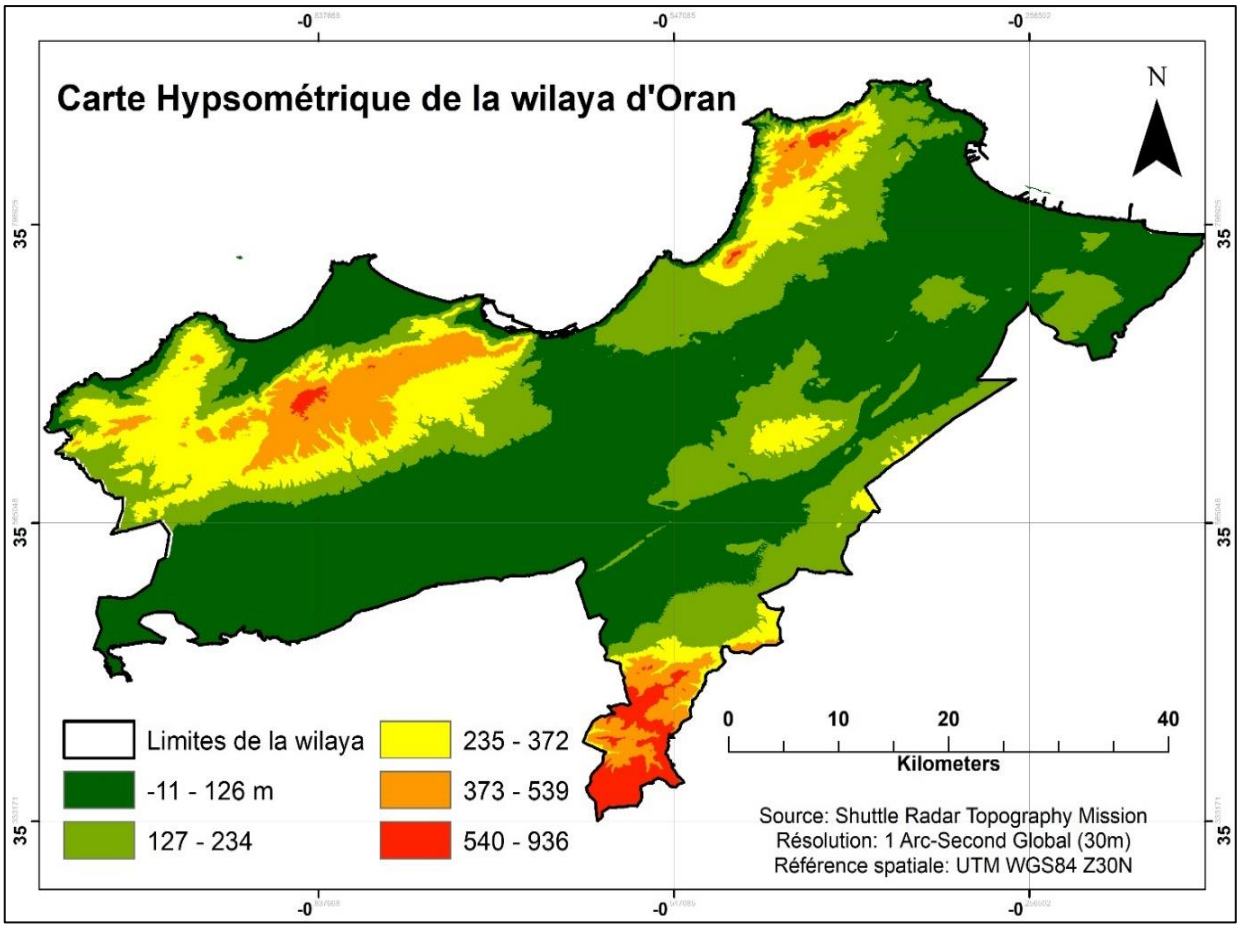


Figure 2.4 Distribution spatiale des altitudes dans la wilaya d'Oran

3-2 les pentes

La wilaya d'Oran est dominée par des reliefs peu accidentés. Plus de la moitié de sa superficie (58,58 %) présente des pentes très faibles (0-4°), tandis que les pentes modérées (4-8°) couvrent 20,12 %. Les pentes fortes à très fortes (>12°) ne représentent que 12,85 % du territoire. Cette prédominance des faibles dénivellations offre des conditions favorables à l'urbanisation et aux

activités agricoles, mais rend également le territoire vulnérable à l'érosion diffuse. La figure 2.5 et le tableau 2.2 présentent la distribution spatiale des classes de pentes dans la wilaya d'Oran.

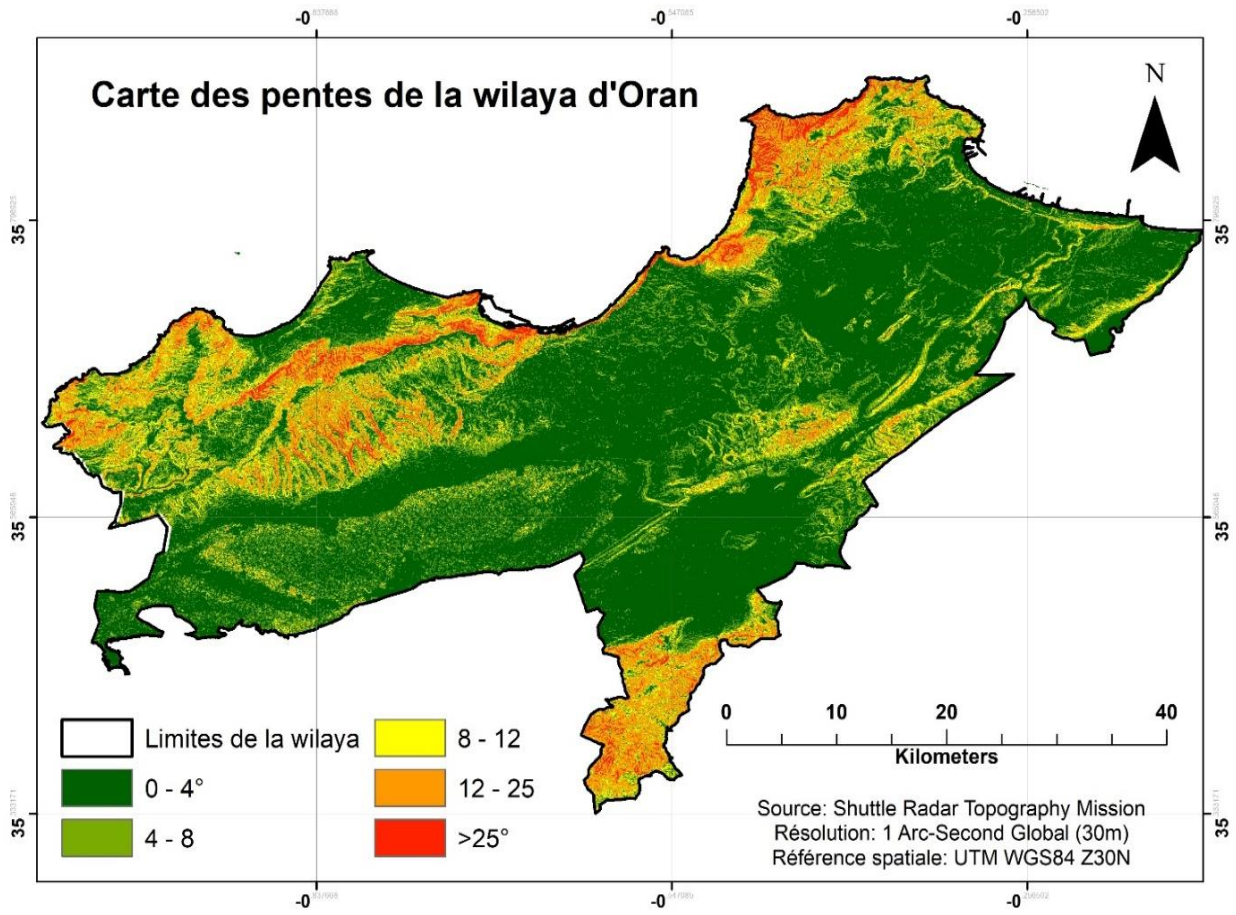


Figure 2.5 Distribution spatiale des classes de pentes dans la wilaya d'Oran

Tableau 2.2 Distribution spatiale des classes de pentes dans la wilaya d'Oran

Classes	Superficie ha	Superficie %
0 - 4°	125106.35	58.58
4 - 8°	42976.35	20.12
8 - 12°	18029.28	8.44
12 - 25°	22835.52	10.69
+ 25°	4602.59	2.16

4- Les caractéristiques géologiques de la Grande Sebkha d'Oran

Les formations superficielles et sub-superficielles de la Grande Sebkha d'Oran sont essentiellement constituées d'alluvions quaternaires récentes. Ces dépôts sédimentaires reflètent

l'histoire géologique d'un bassin endoréique soumis à des alternances de phases humides et de forte évaporation.

Les couches profondes se caractérisent principalement par des argiles gypseuses, présentant une grande variabilité lithologique :

- Des argiles gypseuses blanches à beige ;
- Des argiles cohésives de couleur brun-beige à brun verdâtre ;
- Des croûtes alternantes de gypse et de grès sableux ;
- Des sables argileux fortement gypseux.

Cette présence abondante de gypse témoigne d'une forte salinité historique des eaux et d'une intense activité évaporitique.

Selon une étude géotechnique réalisée sur le site (Chikhaoui et al., 2017), deux principaux types de sols ont été identifiés en fonction de leur position par rapport à la nappe phréatique :

Sol 1 (de 0 à 4 mètres de profondeur), subdivisé en deux horizons :

Layer 1-Sample-1 : entre 0,6 m et 2 m ; Layer 1-Sample-2 : entre 2 m et 4 m.

Sol 2 (de 4 à 8 mètres de profondeur).

Les caractéristiques géologiques de la grande sebkha d'Oran sont affichées dans la figure 2.6 et la figure 2.7.

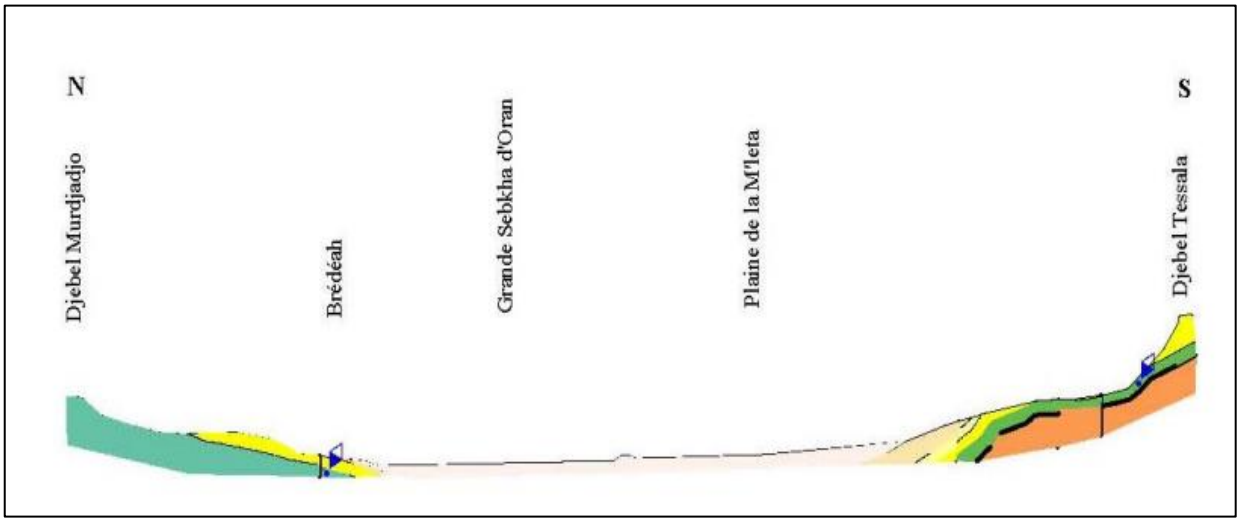


Figure 2.6 Profile géologique de la sebkha d'Oran, Dj Murdjadjo- Dj Tessala (Source : http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/01/08-%20Benziane%20%2877-92%29.pdf) 2013

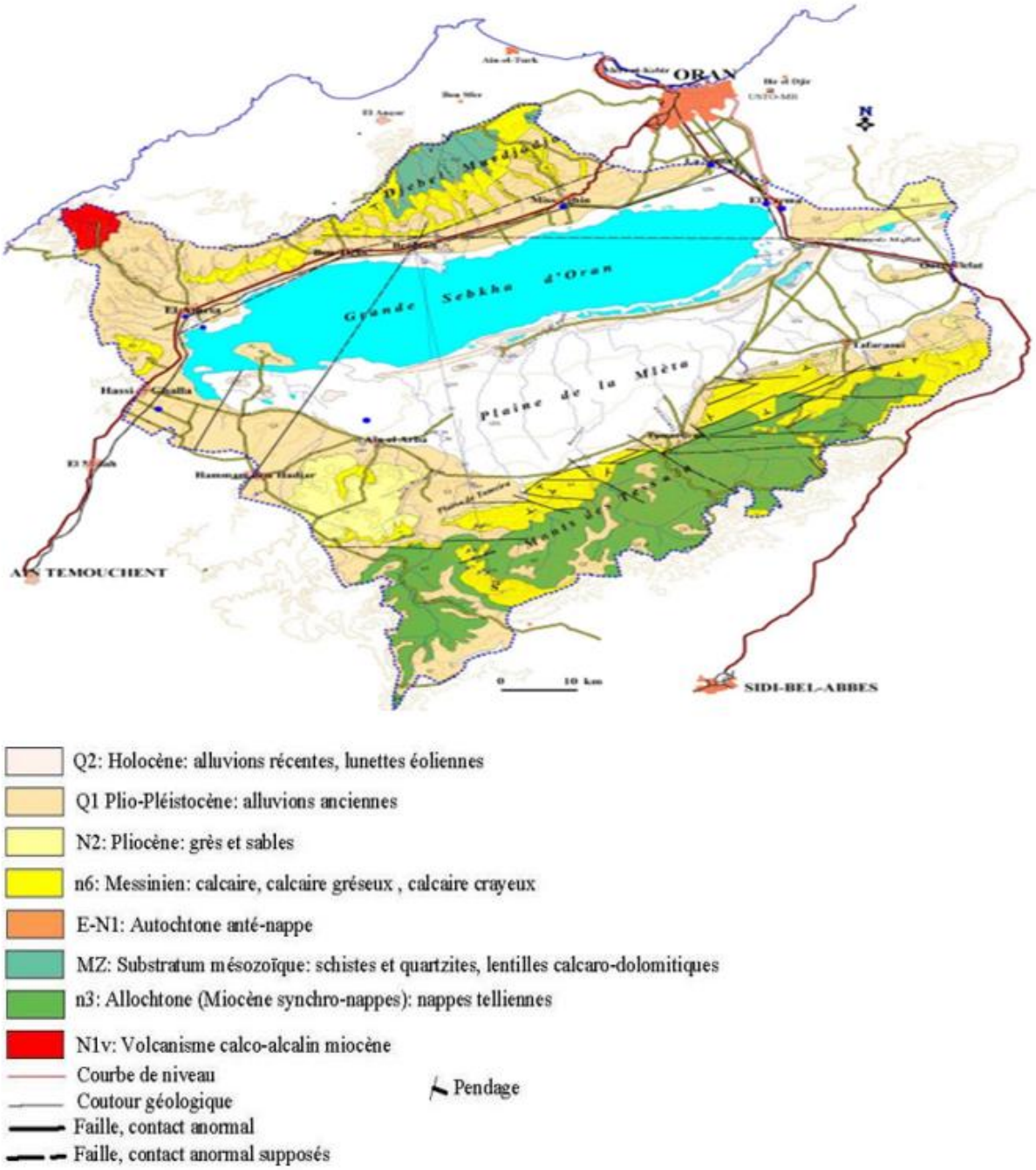


Figure 2.7 Les caractéristiques géologiques de la grande sebkha d'Oran (Source : http://www.israbat.ac.ma/wp-content/uploads/2015/01/08-%20Benziane%20%2877-92%29.pdf)

2013

5- Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Oran possède un climat méditerranéen semi-aride, marqué par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et relativement humides. Les températures estivales dépassent souvent 30 °C, tandis que les précipitations se concentrent principalement entre novembre et mars. L'influence de la mer Méditerranée modère les écarts thermiques et favorise une humidité variable. Les vents dominants, notamment marins, jouent un rôle important dans la dispersion des polluants atmosphériques et le confort climatique urbain.

Dans ce mémoire, les paramètres climatiques constituent une partie primordiale ; ils exercent une influence marquée sur les concentrations en PM2.5 à Oran. Les températures élevées estivales favorisent la formation d'aérosols secondaires, tandis que les précipitations hivernales assurent un lessivage efficace des particules. Une humidité relative élevée favorise l'hygroscopicité et l'agglomération des particules, augmentant leur temps de résidence. Enfin, les vents modérés à forts, dominants à Oran, contribuent à la dispersion et à la dilution des polluants atmosphériques.

5-1 Les températures

Oran connaît des températures modérées grâce à l'influence maritime. Les hivers sont doux avec des minima rarement inférieurs à 8 °C, tandis que les étés sont chauds avec des maximas atteignant fréquemment 30 °C en juillet-août. La moyenne annuelle de 18,4 °C reflète un climat agréable, sans excès thermique marqué.

Tableau 2.3 Températures moyennes mensuelles (Climate-Data.org (1991-2021))

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**An**
T-Moy	11.8	12.1	14.1	16.2	19.1	22.9	25.6	26.2	23.6	20.4	15.5	12.8	**18.4**
T-Min	8.6	8.9	10.7	12.6	15.4	18.9	21.6	22.5	20.3	17.0	12.4	9.7	**15.0**
T-Max	15.2	15.6	17.8	19.9	22.8	26.9	29.9	30.5	27.6	24.3	18.8	16.2	**22.3**

5-2 Les précipitations

Les précipitations annuelles sont faibles (378 mm), typiques d'un climat semi-aride. Elles sont très concentrées entre octobre et avril (plus de 75 % du total annuel). L'été est presque totalement sec, avec moins de 10 mm entre juin et août, ce qui entraîne une forte sécheresse estivale.

Tableau 2.4 Précipitations moyennes mensuelles (Climate-Data.org (1991-2021))

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**An**
P (mm)	57	42	45	38	21	5	1	3	15	34	68	49	**378**
Jours de pluie	6	5	5	4	3	1	1	1	2	4	7	6	**45**

5-3 L'humidité relative

L'humidité relative reste élevée toute l'année (moyenne annuelle de 70 %) grâce à l'influence maritime. Elle est maximale en hiver (74 %) et minimale en juillet (64 %). Cette humidité modérée atténue les fortes chaleurs estivales mais accentue la sensation de froid en hiver.

Tableau 2.5 humidité moyennes mensuelles (Weather Spark & Climate-Data.org (1991-2020))

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**An**
HR (%)	74	73	72	69	68	65	64	66	69	72	72	74	**70**

5-4 Les vents

Oran est une ville ventée avec une vitesse moyenne annuelle de 15-16 km/h. Les vents les plus forts soufflent en février. Les directions dominantes sont ouest et nord-ouest, apportant l'air maritime qui tempère le climat. Ces vents contribuent à l'évaporation élevée en été.

Tableau 2.6 Vitesse moyennes mensuelles (Weather Spark & Climate-Data.org (1991-2020))

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**An**
Vitesse (Km/h)	17	19	18	17	16	15	14	14	15	16	17	17	**16**

6- Les caractéristiques démographiques

6-1 Évolution de la population

Après l'indépendance, la croissance démographique de l'agglomération oranaise est restée relativement modérée jusqu'au début des années 1970, avant de s'accélérer fortement. La population est passée de 519 015 habitants en 1977 à 672 891 en 1987, puis à 822 980 en 1998 et 962 591 en 2008. Elle est estimée à 1 064 400 habitants au début de l'année 2015 (Kadri & Madani, 2015).

Cette évolution révèle un double processus marqué par une opposition centre-périphérie. La commune d'Oran connaît une stagnation, voire un déclin relatif, en raison de la saturation de ses tissus urbains anciens. À l'inverse, les communes périphériques enregistrent une croissance démographique soutenue, alimentée par les migrations internes en provenance de la ville-centre, mais aussi par des flux en provenance d'autres régions de la wilaya et du pays.

La commune d'Oran a vu sa population augmenter régulièrement entre 1962 et le début des années 1990, passant de 323 762 habitants en 1966 à 491 497 en 1977 (taux de croissance annuel moyen de 5,2 %). En 1987, elle atteint 609 823 habitants (taux de 2,4 %). Par la suite, la croissance ralentit considérablement : la population s'établit à 634 106 habitants en 1998 (taux de 0,4 %), puis recule à 609 014 habitants en 2008, affichant un taux de croissance négatif (-0,4 %). Ce retournement s'explique par le report de la croissance vers les communes limitrophes (Kadri & Madani, 2015).

Depuis la fin des années 1970, les communes périphériques, particulièrement à l'est de l'agglomération, sont devenues de véritables pôles d'attraction démographique.

Bir El Djir connaît une croissance spectaculaire : sa population passe de 2 455 habitants en 1966 à 152 151 habitants en 2008. Elle quadruple entre 1977 et 1987, puis connaît des taux de croissance exceptionnels de 372 % entre 1987 et 1998 et de 113 % entre 1998 et 2008.

Sidi Chami affiche une dynamique tout aussi remarquable, passant de 2 376 habitants en 1966 à 104 498 habitants en 2008. Sa population a presque quadruplé entre 1987 et 1998 (taux de croissance de 319 %), puis progressé de 88 % entre 1998 et 2008. Cette expansion est largement liée à la forte demande foncière et à la spéculation immobilière.

Es Sénia, quant à elle, connaît une croissance plus régulière mais soutenue, passant de 10 424 habitants en 1966 à 96 928 habitants en 2008. Cependant, son rythme de croissance a ralenti ces

dernières années en raison de la saturation du tissu urbain, de la hausse des prix du foncier et d'une concurrence accrue pour l'accès au sol.

Tableau 2.7 Évolution de la population par commune de l'agglomération oranaise 1966-2008 (ONS, Algérie)

Commune / Agglomération	1966	1977	1987	1998	2008
Oran	323 485	490 788	603 578	634 106	609 940
Bir el-Djir	513	806	6 254	68 302	136 079
Es-Sénia	8 478	14 347	15 721	29 831	43 685
Sidi Chahmi	2 376	3 585	5 257	14 413	22 680
Agglomération Oranaise	334 852	509 526	630 810	746 652	812 384

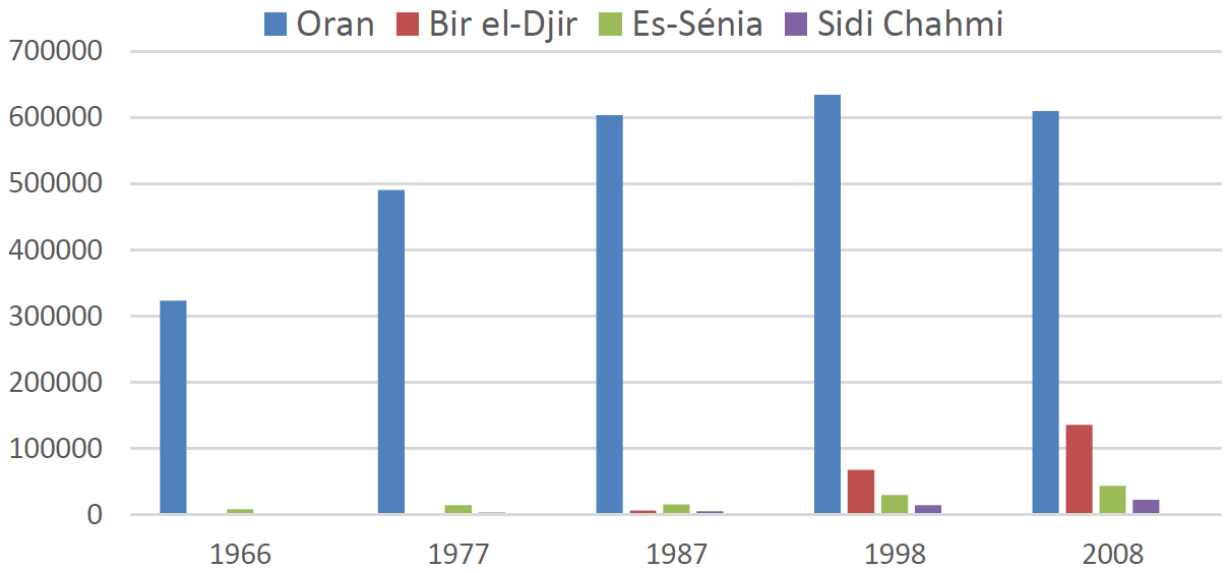


Figure 2.8 Évolution de la population par commune de l'agglomération oranaise 1966-2008

La carte de densité de population d'Oran (Figure 2.9) met en évidence une forte concentration démographique dans le centre urbain entre 2000 et 2020. Les zones centrales apparaissent constamment comme les plus denses, avec des valeurs dépassant 140 habitants/100 m², traduisant une urbanisation intense et une forte pression foncière. À partir de 2010, l'extension progressive des classes de densité moyenne et élevée vers les périphéries révèle un étalement urbain continu. En 2020, la densité devient plus diffuse et couvre une superficie plus importante, indiquant une croissance démographique soutenue, accompagnée d'une expansion spatiale des quartiers résidentiels et des activités urbaines périphériques.

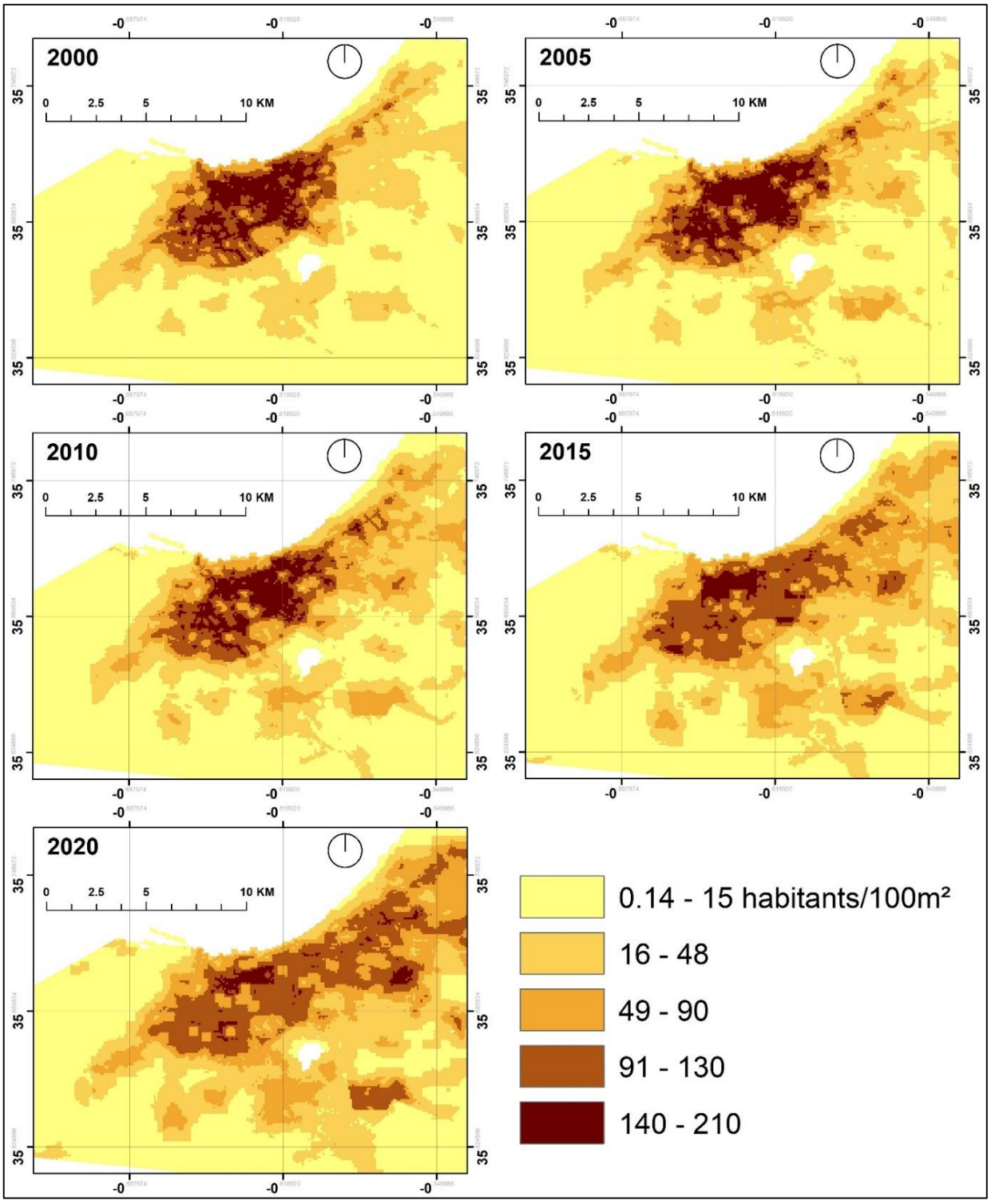


Figure 2.9 Évolution de la densité des populations pour les années 2000, 2005, 2010, 2015 et 2020

6-2 Évolution du parc de logements

La croissance démographique rapide de l'agglomération oranaise s'est accompagnée d'une expansion spatiale significative. Après l'indépendance, l'urbanisation est restée relativement modérée jusqu'à la fin des années 1970, période durant laquelle la commune d'Oran a connu une saturation progressive. Sa superficie urbanisée est ainsi passée de 2 414 ha en 1966 à 2 880 ha en 1977 (Kadri & Madani, 2015).

À partir de la fin des années 1970, l'extension urbaine s'est fortement accélérée, portée par la mise en œuvre de vastes programmes de logements en périphérie. Le parc immobilier a triplé en l'espace de quarante ans, passant de 76 442 logements en 1966 à 222 856 logements en 2008, dont 81 577 unités construites dans les communes périphériques. Depuis 2008, environ 25 000 logements supplémentaires ont été réalisés ou programmés (Direction du Logement et des Équipements Publics – DLEP).

Cette production massive de logements a entraîné une importante consommation foncière, estimée à 8 050 ha au début de l'année 2015. Au cours des trois dernières décennies, près de 3 782 ha ont été urbanisés, principalement dans les communes périphériques, avec une forte concentration à Bir El Djir.

Les trois communes de Bir El Djir, Sidi Chami et Es-Senia ont ainsi presque doublé leur superficie urbanisée, passant de 4 134 ha en 1987 à 6 993 ha en 2008.

6-2 Évolution spatio-temporelle du cadre bâti

Face à l'absence de données statistiques fiables et précises sur l'évolution de la zone d'étude, l'analyse a été menée par télédétection. Quatre images satellitaires Landsat des années 1984, 1999, 2011 et 2020 ont été traitées à l'aide d'une classification supervisée par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood). Cette approche a permis de quantifier de manière précise l'évolution du cadre bâti sur une période de 36 ans.

Les résultats révèlent une expansion rapide du tissu urbain. La superficie bâtie est passée de 3 964,15 ha en 1984 à 4 245,43 ha en 1999, soit une augmentation de 281,28 ha en 15 ans. Cette croissance s'est fortement accélérée entre 1999 et 2011, atteignant 9 906,13 ha, puis 11 057,98 ha en 2020, soit une augmentation supplémentaire de 1 151,85 ha en neuf ans.

Les taux d'évolution confirment cette dynamique : +7,1 % entre 1984 et 1999, +133,4 % entre 1999 et 2011, et +11,63 % entre 2011 et 2020.

Tableau 2.8 Évolution du cadre bâti de la ville d'Oran (Elmokertar and Azzi 2022)

Année	Superficie (ha)
1984	3 964.15
1999	4 245.43
2011	9 906.13
2020	11 057.98

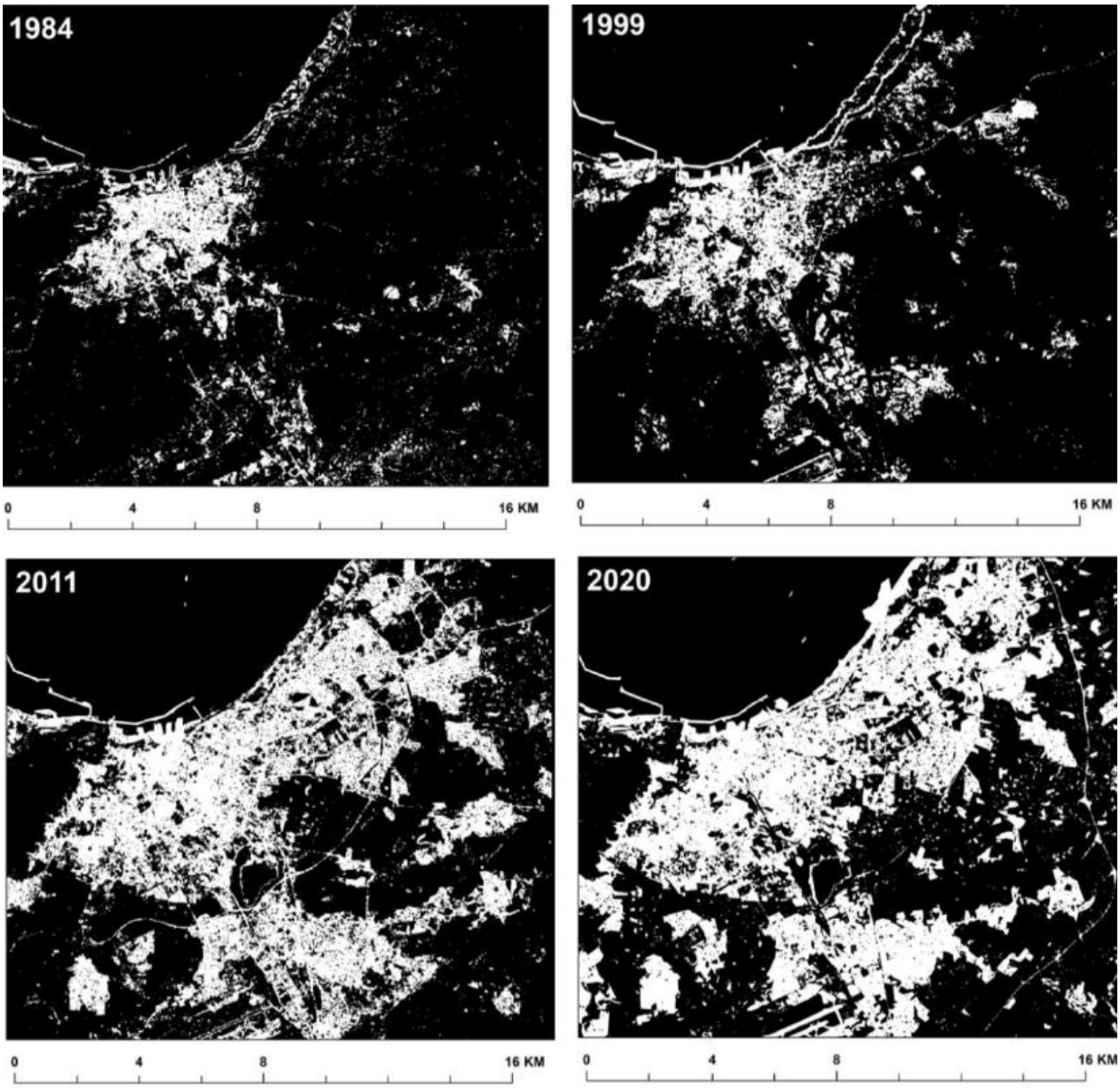


Figure 2.10 Évolution du cadre bâti de la ville d'Oran (Elmokertar and Azzi 2022)

7- Occupation des sols dans la zone d'étude

La figure 2.11 est une carte d'occupation du sol qui montre comment l'espace est utilisé dans la zone d'étude. Elles présentent la répartition des zones bâties, du couvert végétal, des sols nus ainsi que des surfaces d'eau. L'observation de ces cartes permet de mieux comprendre l'organisation du territoire et la manière dont les différentes activités sont réparties dans l'espace. Elles donnent également une idée générale sur la présence des zones urbaines et des milieux naturels.

À partir des images satellitaires et des techniques de télédétection, il a été possible d'identifier et de classifier les différents types d'occupation du sol. La zone d'étude est urbanisée avec plus de 33%, soit une surface de 12272 hectares. Les terrains nus présentent 55% de la surface totale. Ceci nous permis de conclure que la ville possède des terrains pour leur extension dans les différents horizons. Les terrains agricoles présentent 5% (1882,14 ha) et les surfaces d'eau à peine 1% de la surface totale. Avec 1692,88 ha (soit 4%), les forêts présentent une superficie faible. Ceci est le résultat des feux de forêt et des maladies (scolytes) des dernières années.

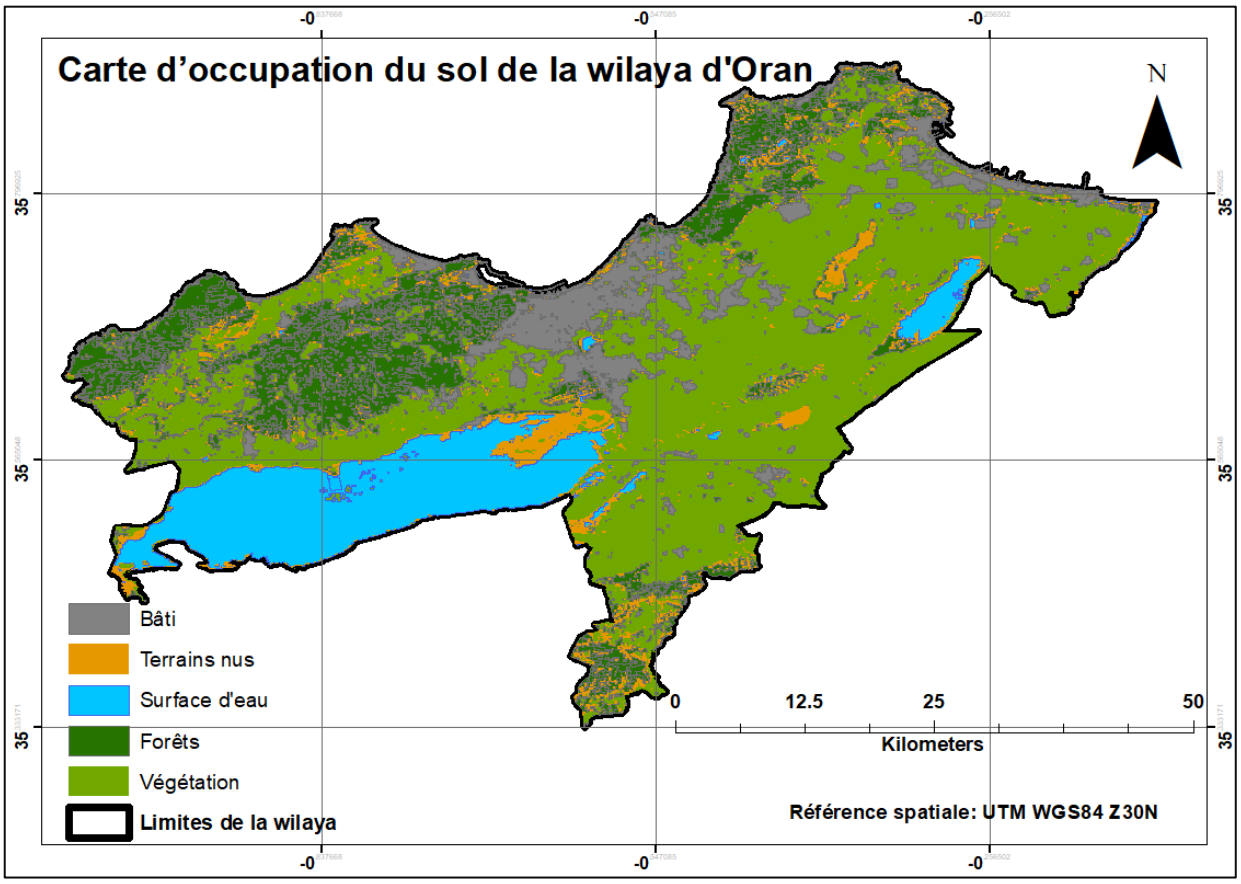


Figure 2.11 Carte d'occupation du sol de la wilaya d'Oran

8- Infrastructures routières et ferroviaires, éléments de liaison

La zone d'étude dispose d'un réseau de transport important (Figure 2.12) :

8-1 Réseau routier

La zone d'étude est caractérisée par un réseau routier dense, d'une longueur de 1500 km qui se répartit en : 13,58 km du réseau primaire, 180,87 km du réseau secondaire, 130,19 km est tertiaire, et 1174 km résidentiel.

8-2 Réseau ferroviaire

Le réseau ferroviaire comporte un réseau de 88 km de longueur, qui facilite l'accès des passagers et des marchandises. Par ailleurs, le projet du tramway devrait faciliter la liaison de l'aéroport à la ville d'Oran. Pendant l'année 2010, ce réseau a permis de transporter 4966106 voyageurs et plus de 4937183 tonnes de marchandise (Zagaye 2012).

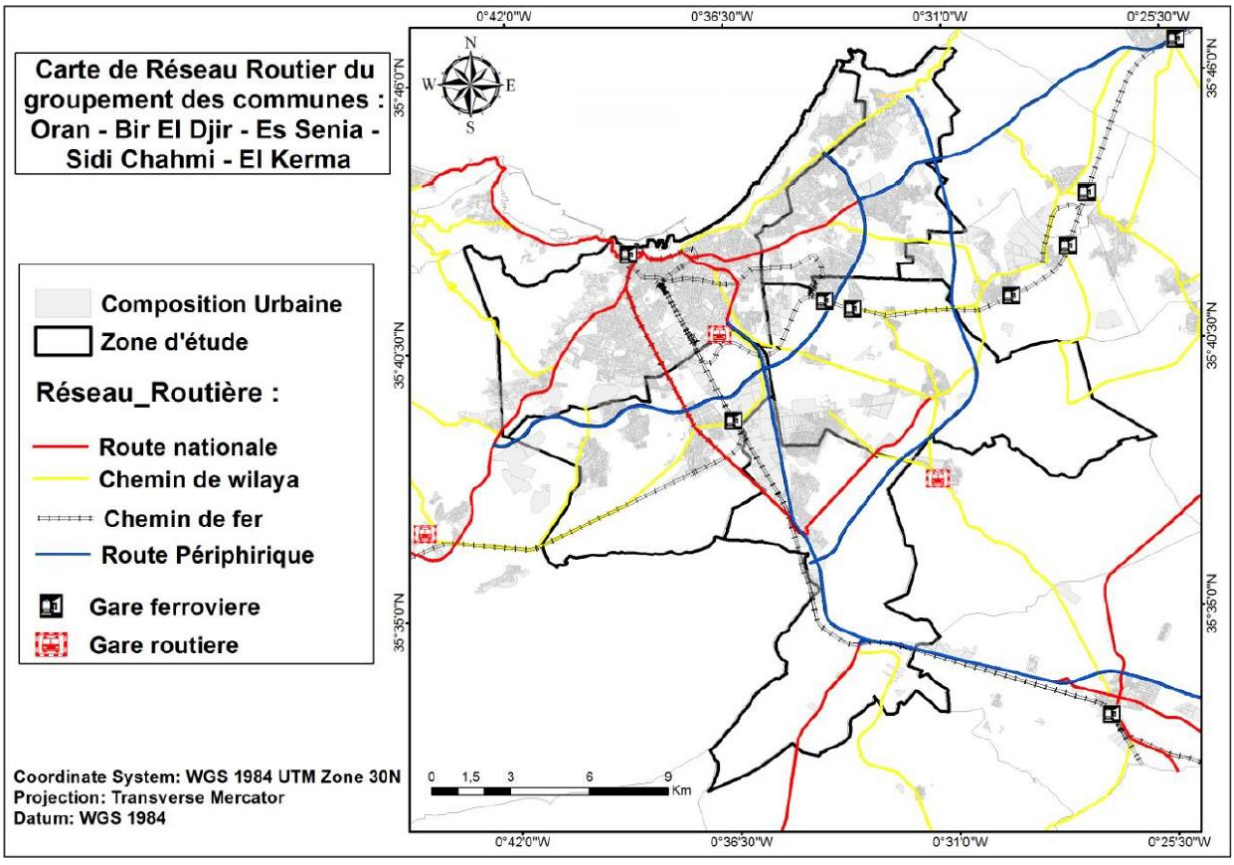


Figure 2.12 Infrastructures routières et ferroviaires

9- Les caractéristiques économique

La ville d'Oran représente un pôle d'attraction économique et industrielle et est un marché avantageux pour les PME/PMI. La capitale de l'Ouest attire de plus en plus d'investisseurs et d'hommes d'affaires depuis ces dix dernières années.

9-1 Le commerce

La ville d'Oran compte environ 64 785 commerçants dont 2 902 commerçants nouvellement installés. Les personnes physiques représentent plus de 53 262 commerçants, alors que les personnes morales représentent 11 523 commerçants. La production industrielle compte plus de 10 230 commerçants alors que le secteur du commerce extérieur est doté de plus de 2 990 entreprises. La ville d'Oran est dotée d'un tissu important de PME d'environ 17 793 entreprises. La majorité se concentre sur des secteurs comme les bâtiments et travaux publics (23.10%), secteur du commerce (21.54%) et transports et communications (13.85%) (Benomar 2010).

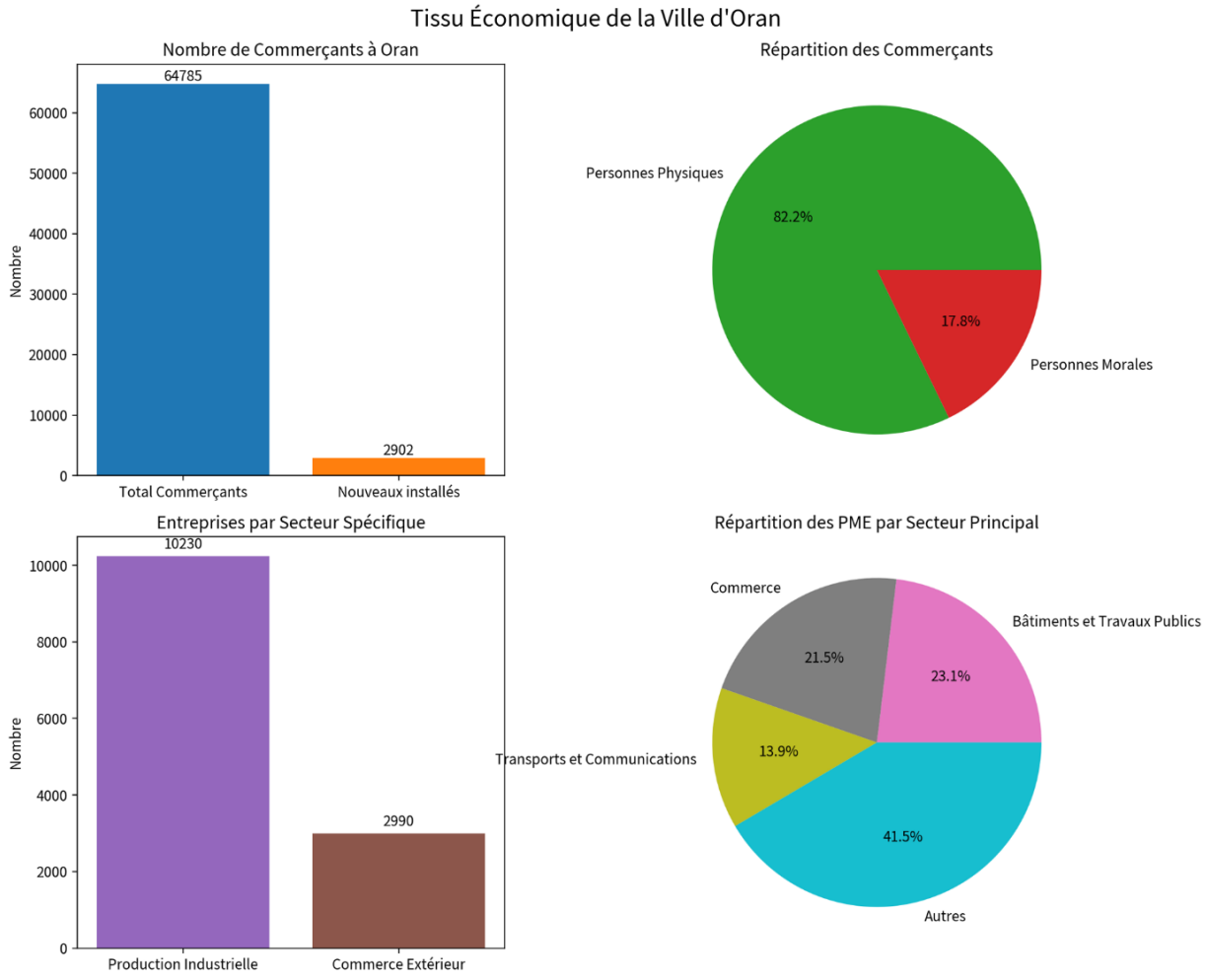


Figure 2.13 les caractéristiques commerciales de la ville d'Oran (Source : Benomar 2010)

9-2 Les activités industrielles

L'activité industrielle occupe une place de choix dans la wilaya d'Oran car elle constitue en son sein, une de ses plus grandes vocations. Le complexe pétrochimique d'Arzew constitue un potentiel productif très important et ce, même à l'échelle nationale compte-tenu de la dimension des unités qui y sont implantées et surtout des effets d'entrainement induits sur le développement des autres secteurs d'activité. En plus de ce complexe, la Wilaya dispose de cinq zones industrielles (03 zones industrielles d'Es-Sénia,01 zone industrielle de Hassi Ameur et 01 d'Arzew). Cela sans oublier les 21 zones d'activité 165 réparties à travers cinq communes qui se targuent de disposer d'atouts majeurs pour leur développement. Le secteur Industriel Public contient les branches d'activités Pétrochimie, Textile, Chimie, Matériaux de construction, Métallurgie, Energie, Sidérurgie, Agro-alimentaire. Notons aussi un Secteur Industriel Privé très actif qui touche essentiellement les branches d'activités : Transformation du plastique, Agro-alimentaire, Transformation du bois. Transformation du papier, Cuirs et peaux. En plus 39 gisements exploités pour l'activité minière.

10- Conclusion

Le chapitre 2 a offert une analyse approfondie de la zone d'étude, couvrant le territoire d'Oran et de la Grande Sebkha à travers ses dimensions physiques, géologiques, topographiques, climatiques, démographiques et humaines.

L'analyse cartographique a constitué l'outil central de cette description : les cartes de localisation et administratives ont permis de situer précisément la zone et ses communes, tandis que les cartes topographiques et des pentes ont révélé les contraintes et potentialités du relief pour l'urbanisation et l'occupation des sols. Les cartes géologiques et lithologiques ont, quant à elles, éclairé la nature des formations superficielles et leur évolution.

L'étude du climat méditerranéen semi-aride a mis en évidence les variations saisonnières et leurs incidences sur l'environnement local. Sur le plan humain, la forte croissance démographique, l'expansion urbaine continue vers les communes périphériques, ainsi que les modalités d'organisation de l'espace (occupation du sol et parc de logements) ont été soulignées.

Chapitre 3 :

Evaluation de l'effet de la GSO sur les variations des concentrations en PM2.5

1- Introduction

Cette section expose la méthodologie adoptée pour évaluer l'impact de la Grande Sebkha d'Oran (GSO) sur les concentrations de PM2.5 et leurs variations spatio-temporelles. La structure est organisée en quatre composantes principales. Premièrement, une description des sources de données utilisées dans l'étude, incluant les produits satellitaires, les ensembles de données météorologiques et les plateformes de traitement. Deuxièmement, la procédure d'estimation de la concentration de PM2.5 à partir de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) via l'algorithme de Van Donkelaar est expliquée. Troisièmement, l'approche de validation employant des données multicapteurs et le modèle GEOS-Chem est décrite. La dernière étape consiste à explorer l'influence spécifique de la GSO sur la dispersion des PM2.5 en utilisant l'indice d'aérosols absorbants (AAI).

2- Matériel et méthodes

2-1 Sources de données

L'objectif de cette étude était d'analyser l'impact de la GSO sur les variations spatiotemporelles des concentrations de PM2.5. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé le produit de données MCD19A2 Version 6.1. Selon (Lyapustin et Wang 2022), MCD19A2 est un produit de niveau 2 quadrillé de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) terrestre combiné de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra et Aqua, produit quotidiennement à une résolution spatiale de 1 km. Le produit de données AOD MCD19A2 contient les couches de jeux de données scientifiques (SDS) suivantes : l'AOD de la bande bleue à 0,47 µm et l'AOD de la bande verte à 0,55 µm. De plus, cette étude s'appuie spécifiquement sur la bande Optical Depth 47, qui est cruciale pour comprendre les effets des particules atmosphériques sur le climat, les conditions météorologiques et la santé humaine (Rahaman et al. 2023).

Nous avons employé la plateforme Google Earth Engine (GEE) et les codes de référence fournis par les fournisseurs de données pour extraire l'épaisseur optique des aérosols. Le choix de GEE est soutenu par de multiples études démontrant son efficacité dans la surveillance de la qualité de l'air (Halder et al. 2023) ; (Aghdam et al. 2024) ; (Rahaman et al. 2024).

Pour faciliter l'analyse, nous avons calculé les moyennes annuelles en utilisant la référence API suivante : data.reduce(ee.Reducer.mean()). Les images ont été découpées, exportées au format raster et converties en format vectoriel (shapefiles) en utilisant l'environnement ArcGIS. De plus, avant que les données ne soient utilisées, elles ont été transformées du système de référence GCS WGS1984 vers le système UTM WGS84 Zone 30. Cette conversion permet des calculs de surface précis pour l'analyse statistique comparative. Toutes les données, y compris leurs sources et résolutions, sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 3.1 : Détails des données utilisées dans l'étude

Données	Bandes	Résolution spatiale	Date	Fournisseur	Unité	Format
MCD19A2.061: Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth	Optical_Depth_047	1000 mètres	De 2012 à 2023	https://www.lpdaac.usgs.gov/products/mcd19a2v061/	Plage -100 à 8000 et facteur d'échelle de 0.001	Geotiff
V6.GL.02.02 Global Annual PM2.5 Grids from MODIS, MISR, SeaWiFS and VIIRS Aerosol Optical Depth (AOD)	/	0.01 x 0.01 deg	De 2012 à 2023	https://www.sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/sdei-global-annual-gwr-pm2-5-modis-misr-seawifs-viirs-aod-v5-gl-04/data-download	µg/m3	Geotiff
Sentinel-5P OFFL AER AI: Offline UV Aerosol Index	Absorbing Aerosol Index	1113.2 mètres	Du 08/08/2022 au 17/08/2022	https://www.developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p	/	Geotiff
Planetary boundary layer height (M2TMNXFLX (V5.12.4)	/	0.5 x 0.625 deg	De 2012 à 2023	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/	m	Geotiff
Pollution de l'air PM2.5, exposition annuelle moyenne	/	/	De 2012 à 2020	https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.PM25.MC.M3	µg/m3	xls
Données sur le vent	Vitesse du vent / Direction du vent	/	De 2012 à 2023	https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/	km/h / %	csv
Températures	/	/	/	/	Degré Celsius	/
Précipitations	/	/	/	/	mm	/
Humidité relative	/	/	/	/	%	/
Humidité de surface du sol (surface à 5 cm)	/	/	/	/	m^3/m^3	/
Pression de surface	/	/	/	/	hPa	/

2-2 Extraction des PM2.5 à l'aide de l'algorithme de van Donkelaar

Dans cette étude, nous avons utilisé l'algorithme développé par (Van Donkelaar et al. 2012) pour estimer les concentrations de PM2.5. Conformément à (Zhang et Kondragunta 2021), cet algorithme convertit l'épaisseur optique des aérosols (AOD) en PM2.5 en utilisant une relation de régression linéaire, spécifiquement, les pentes et les décalages (offsets) entre PM2.5 et AOD.

À Oran, l'une des principales villes d'Algérie, il n'y a malheureusement pas de stations de surveillance de la qualité de l'air. Pour développer notre modèle de régression linéaire, nous nous sommes appuyés sur les données officielles disponibles pour l'Algérie. Ces données, qui sont librement accessibles sur le site web de la Banque mondiale, ont été utilisées pour compenser l'absence de mesures locales. L'équation du modèle est définie comme suit :

$$PM_{2.5} = Pente\ x\ AOD + Offset$$

2-3 Validation des résultats à l'aide des données de NASA MODIS, MISR, SeaWiFS et VIIRS avec le modèle de transport chimique GEOS-chem

Pour vérifier l'exactitude des données de concentration de PM2.5, nous utilisons les données d'épaisseur optique des aérosols (AOD) de MODIS, MISR, SeaWiFS et VIIRS. Selon (Van Donkelaar et al. 2021), cet ensemble de données intègre des extractions d'AOD provenant de multiples algorithmes satellitaires, notamment le Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) de la NASA, le Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR), le MODIS Multiangle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC), le Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) Deep Blue, et le Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Le modèle de transport chimique GEOS-Chem est utilisé comme étape initiale pour lier cette mesure de la colonne totale d'aérosols aux concentrations de PM2.5 près de la surface.

2-4 Impact de la GSO sur les variations spatiotemporelles des concentrations de PM2.5 dans la ville d'Oran

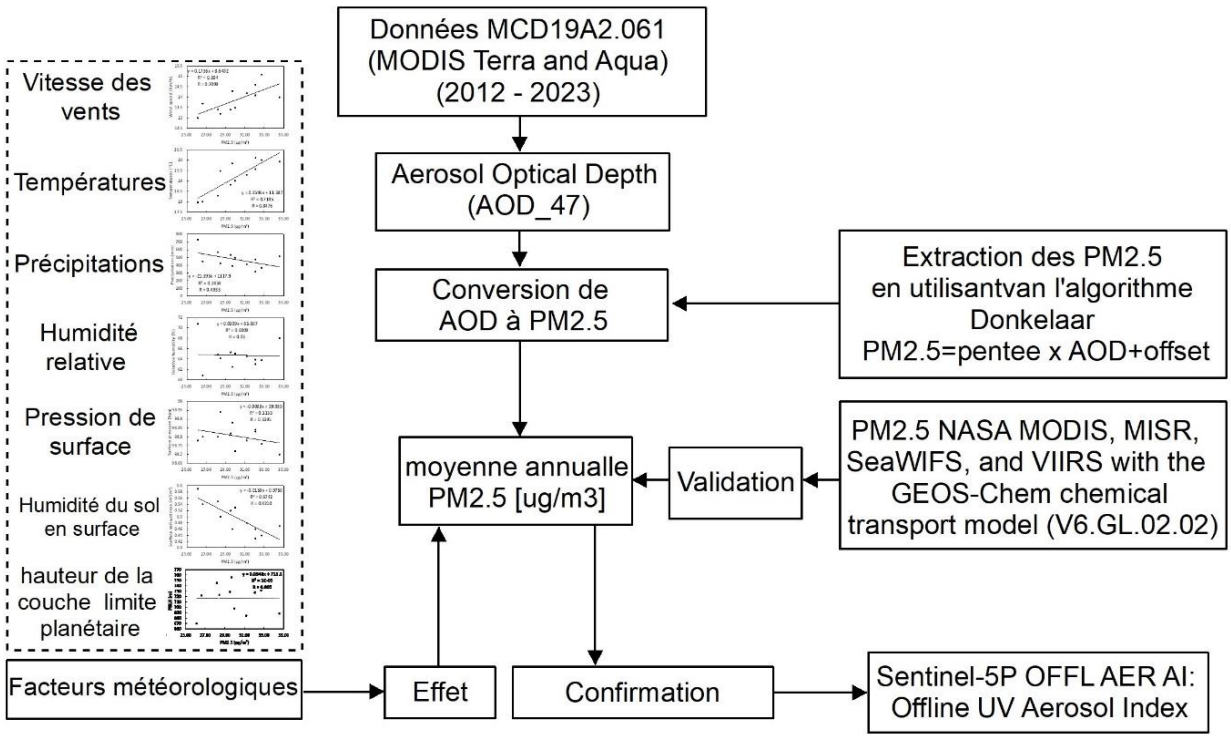
Pour confirmer que la source principale des concentrations de PM2.5 à Oran provient de la GSO, il est essentiel d'analyser leur mouvement. À cette fin, une période spécifique, du 8 août 2022 au 17 août 2022, a été sélectionnée. L'indice d'aérosols absorbants (AAI) a été utilisé comme indicateur clé pour suivre la trajectoire des particules atmosphériques. Selon (l'Agence spatiale européenne 2025), l'AAI permet la détection des aérosols absorbant les UV, tels que la poussière et la fumée, et des aérosols non absorbants (aérosols de sulfate). Contrairement aux mesures

satellitaires de l'épaisseur optique des aérosols, l'AAI peut être calculé même en présence de nuages, assurant une couverture mondiale quotidienne (Tang et al. 2022). Cette approche est particulièrement efficace pour surveiller les panaches d'aérosols épisodiques, y compris la poussière désertique, les cendres volcaniques et la fumée de combustion de biomasse.

Pratiquement, la sélection de la période résulte d'un processus en plusieurs étapes. Premièrement, l'année 2022 a été choisie arbitrairement. Ensuite, en utilisant la référence API de GEE (print(ui.Chart.image.series)), un graphique des variations quotidiennes de l'AAI tout au long de l'année a été généré.

Ce graphique a ensuite été utilisé pour identifier les valeurs de pic indiquant des concentrations élevées de PM2.5. Une fois cette étape terminée, il est devenu possible de télécharger les images correspondantes.

Les principales étapes sont résumées dans les figures 3.1 et 3.2.



Figures 3.1 Organigramme de la méthodologie adoptée

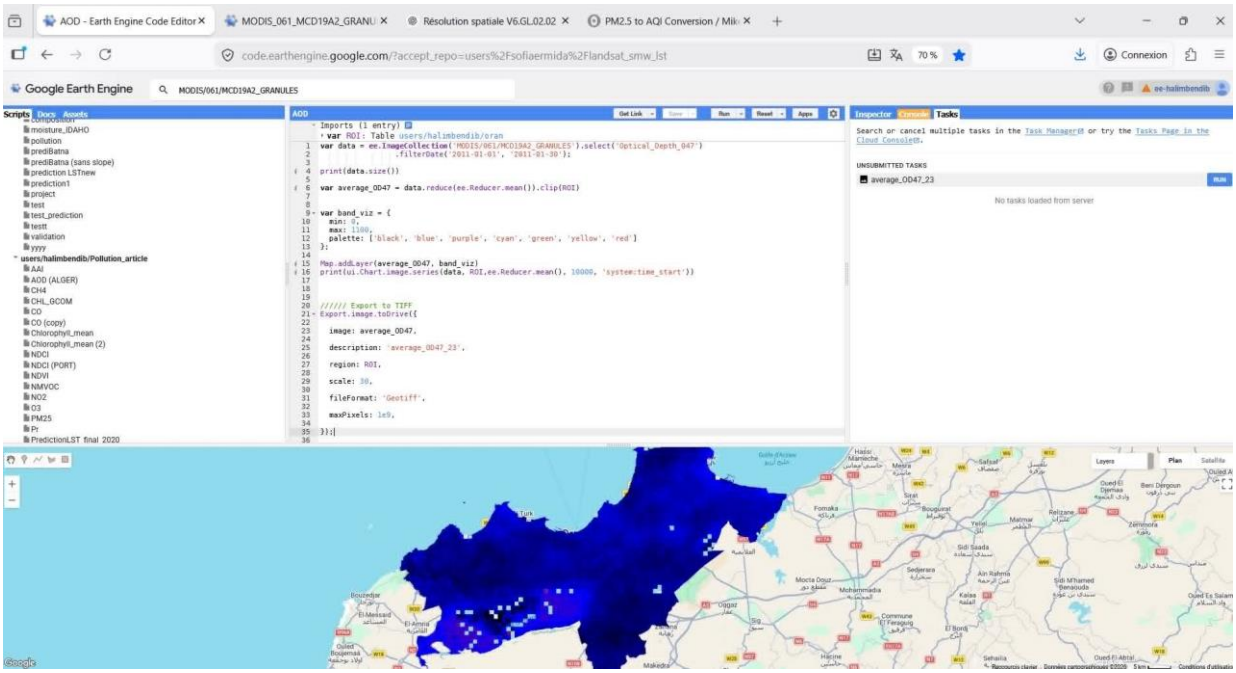


Figure 3.2. Extrait du code GEE utilisé dans cette étude

3- Résultats et discussion

3.1 Vérification des résultats à l'aide des données de NASA MODIS, MISR, SeaWIFS et VIIRS avec le modèle de transport chimique GEOS-chem

Avant d'analyser les résultats obtenus, il est essentiel de les valider pour garantir leur fiabilité et leur pertinence. Malheureusement, aucun enregistrement local des concentrations de PM2.5 n'est disponible dans la région d'Oran, ce qui rend le processus de validation plus difficile. En l'absence de données locales, la seule alternative fiable pour estimer les concentrations de PM2.5 est la combinaison des données MODIS, MISR, SeaWIFS et VIIRS avec le modèle de transport chimique GEOS-Chem.

Pour la validation, une analyse comparative a été menée en utilisant deux ensembles de données de concentrations de PM2.5 : l'un dérivé des données MODIS Terra et Aqua, et l'autre du modèle GEOS-Chem. Cette comparaison a été visualisée à travers une courbe de tendance, permettant d'évaluer la cohérence entre les ensembles de données. Le coefficient de détermination (Fig. 3a) a été calculé pour quantifier la force de la relation entre les deux ensembles de données. Un coefficient de corrélation de 90,68 % (avec une valeur p de 0,000046) a été obtenu, indiquant une corrélation forte et positive. Ce résultat suggère que les données sont non seulement fiables mais aussi cohérentes.

La valeur p extrêmement basse confirme en outre que cette corrélation est statistiquement significative, renforçant la crédibilité des résultats. De plus, les tendances de variation temporelle de la concentration de PM2.5 entre 2012 et 2023 soutiennent davantage cette corrélation (Figure 3.3).

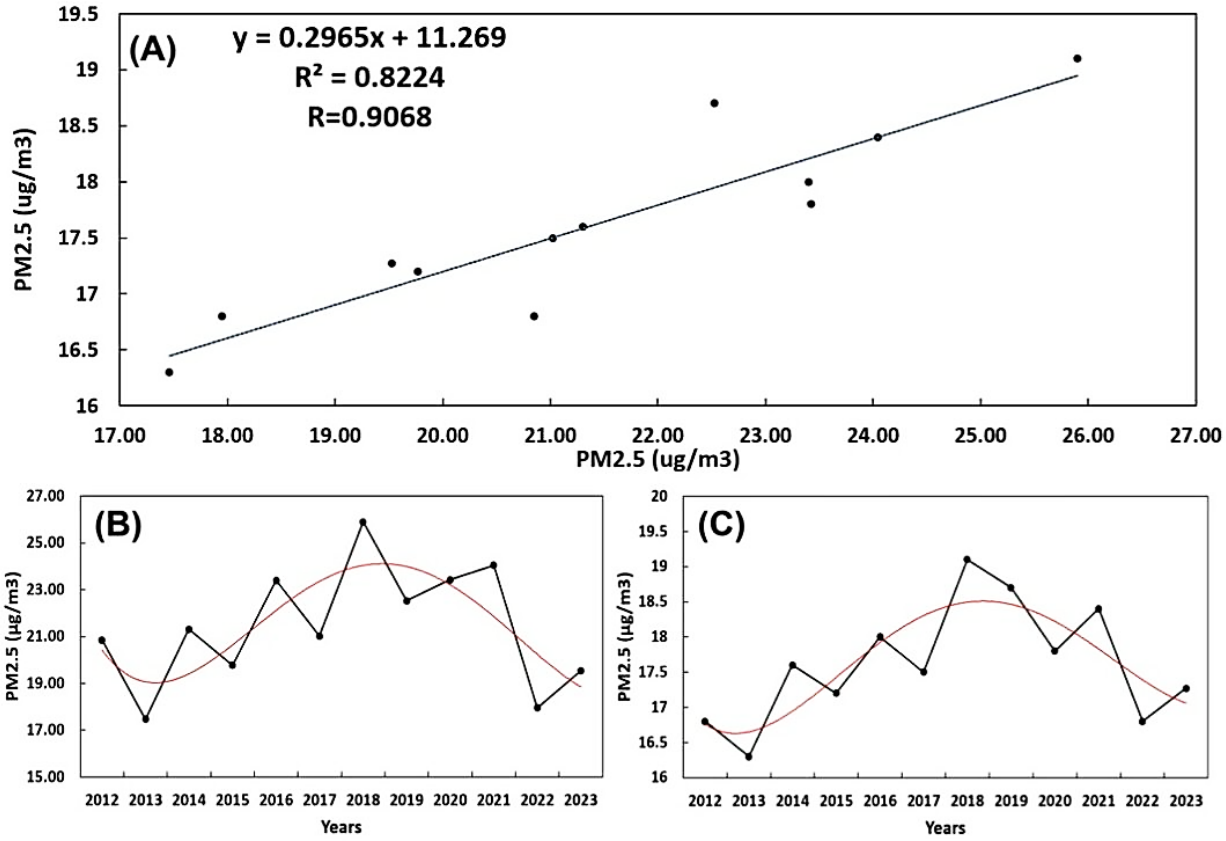


Figure 3.3 Corrélation entre les PM2.5 de MCD19A2.061 et les PM2.5 de PM NASA MODIS, MISR, SeaWIFS et VIIRS avec le modèle de transport chimique GEOS-Chem (A) PM2.5 de MCD19A2.061 (B), et des PM2.5 provenant de PM NASA MODIS, MISR, SeaWIFS et VIIRS avec le modèle de transport chimique GEOS-Chem (C)

3.2 Variations spatiotemporelles des concentrations de PM2.5

Les variations des concentrations de PM2.5 sont illustrées dans la Fig. 3.4. Pour faciliter la comparaison des différentes classes de concentration, il était crucial de les standardiser. À cet effet, le logiciel ArcGIS a été utilisé pour reclasser et harmoniser les classes selon les catégories définies par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA).

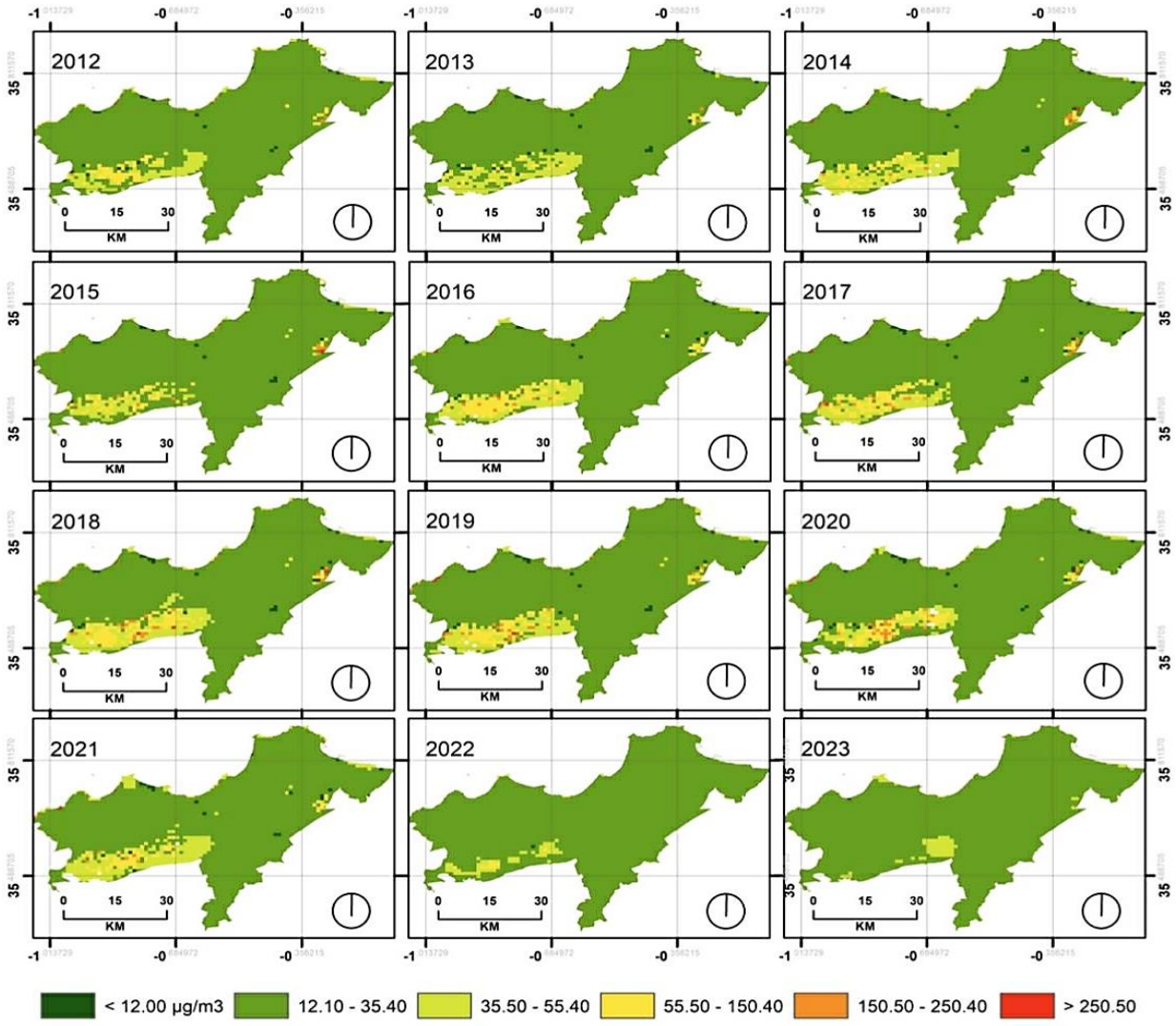


Figure 3.4 Variations spatiotemporelles de la concentration de PM2.5 de 2012 à 2023

En 2012, la concentration de PM2.5 était de 20,85 µg/m³. Ce niveau a diminué de manière significative en 2013, atteignant 17,46 µg/m³, ce qui représentait la concentration la plus basse de l'ensemble du jeu de données. Cependant, en 2014, une augmentation a été observée, portant la concentration à 21,30 µg/m³. Au cours des années suivantes, la concentration a fluctué : elle a diminué à 19,77 µg/m³ en 2015, avant de remonter à 23,40 µg/m³ en 2016, atteignant le niveau le plus élevé enregistré jusqu'alors. En 2017, une légère baisse a été notée (21,02 µg/m³), mais en 2018, une augmentation significative s'est produite, atteignant 25,90 µg/m³, la valeur la plus élevée de l'ensemble du jeu de données. La concentration a ensuite chuté à 22,53 µg/m³ en 2019, indiquant une modeste amélioration de la qualité de l'air. Une légère augmentation a suivi en 2020 (23,42 µg/m²), et la concentration a continué de croître en 2021, culminant à 24,04 µg/m³, la deuxième valeur la plus élevée enregistrée. Une amélioration notable s'est produite en 2022, avec une concentration tombant à 17,95 µg/m³, la deuxième valeur la plus basse. En 2023, une légère

augmentation a porté la concentration à 19,53 µg/m³, restant toujours en dessous des niveaux observés la plupart des années précédentes.

Tout au long de la période d'étude, des concentrations de PM2.5 persistantes et élevées (> 35,5 µg/m³) ont été observées dans les parties sud et sud-est de la zone d'étude, avec plusieurs points chauds de pollution isolés. Ces zones de forte concentration coïncident avec la Grande Sebkha d'Oran (GSO). Notamment, des points chauds de pollution ont été observés dans la zone industrielle d'Arzew, le port d'Oran, le littoral et les marais salants d'Arzew. En revanche, les régions du nord, de l'ouest et de l'est ont systématiquement présenté des des concentrations plus faibles (< 35,5 µg/m³), indiquant un environnement relativement stable et moins pollué.

Par rapport aux normes de qualité de l'air établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'EPA des États-Unis (Tableau 3.2), la qualité de l'air dans la Wilaya d'Oran est considérée comme modérée, variant entre 12,1 et 35,4 µg/m³, sauf dans la région de la GSO.

Le Tableau 3.3 présente la répartition de la surface affectée par chaque classe de concentration de PM2.5. Entre 2012 et 2023, la majorité des zones étaient associées à des concentrations allant de 12,10 à 35,40 µg/m³, avec une couverture de surface fluctuant entre 1833,60 ha (en 2018) et 2071,90 ha (en 2023). Cette classe représentait la plus grande partie de la zone d'étude, indiquant une prédominance de niveaux de pollution modérés.

Les concentrations inférieures à 12,00 µg/m³, considérées comme relativement faibles, ont montré une tendance à la baisse, passant de 15,28 ha en 2012 à 0,67 ha en 2023. En revanche, les concentrations allant de 35,50 à 55,40 µg/m³ ont fluctué sans tendance claire, culminant en 2021 à 208,17 ha, et atteignant un minimum de 56,32 ha en 2022.

Tableau 3.2 : Catégories de qualité de l'air définies par l'EPA des États-Unis (Zhang and Kondragunta 2021)

Catégorie AQI	Moyenne des concentrations de PM2.5 sur 24 h (µg/m3)	Valeur AQI
Bonne	0—12	0—50
Modérée	12.1—35.4	51—100
Malsaine pour les groupes sensibles	35.5—55.4	101—150
Malsaine	55.5—150.4	151—200
Très malsaine	150.5—250.4	201—300
Dangereuse	≥ 250.5	301—500

Tableau 3.3: Distribution des surfaces occupées par les concentrations de PM2.5 pour chaque classe dans la Wilaya d'Oran entre 2012 et 2023

	< 12.00 µg/m3	12.10 - 35.40	35.50 - 55.40	55.50 - 150.40	150.50 - 250.40	> 250.50
2012	15.28	1938.75	128.34	50.03	3.05	0.37
2013	21.55	1930.95	149.31	31.77	1.71	0.53
2014	15.12	1896.01	157.45	58.36	6.84	2.04
2015	12.09	1977.96	90.4	45.2	8.84	1.33
2016	12.89	1868.28	136.25	109.83	7.46	1.11
2017	15.73	1918.09	110.66	74.14	15.16	2.04
2018	18.54	1833.6	165.32	94.53	20.72	3.11
2019	17.7	1884.13	143.42	68.96	19.4	2.21
2020	19.74	1921.03	96.13	75.38	22.2	1.34
2021	16.11	1844.31	208.17	61.04	5.01	1.18
2022	1.12	2068.97	56.32	9.41	0	0
2023	0.67	2071.9	62.73	0.46	0.059	0

Les niveaux de pollution les plus critiques (≥ 150,50 µg/m³) étaient généralement rares mais ont montré des pics en 2014 (6,84 ha), 2018 (20,72 ha) et 2020 (22,20 ha). En 2022 et 2023, ces concentrations critiques ont considérablement diminué, atteignant 0 ha pour les catégories les plus extrêmes (c'est-à-dire > 250,50 µg/m³).

3.3 Effets des facteurs météorologiques

Les interactions entre les PM2.5 et les facteurs météorologiques jouent des rôles cruciaux dans l'analyse de la qualité de l'air (Yang et al. 2017) ; (Yousefi et al. 2023). Sept facteurs météorologiques (vitesse du vent, température, précipitation, pression de surface, humidité relative, humidité du sol en surface et hauteur de la couche limite planétaire) ont été sélectionnés et comparés aux concentrations de PM2.5 pour évaluer leur influence sur la GSO.

La figure 3.5 illustre les relations entre les concentrations de PM2.5 et les divers paramètres météorologiques, telles que déterminées par l'analyse de régression linéaire.

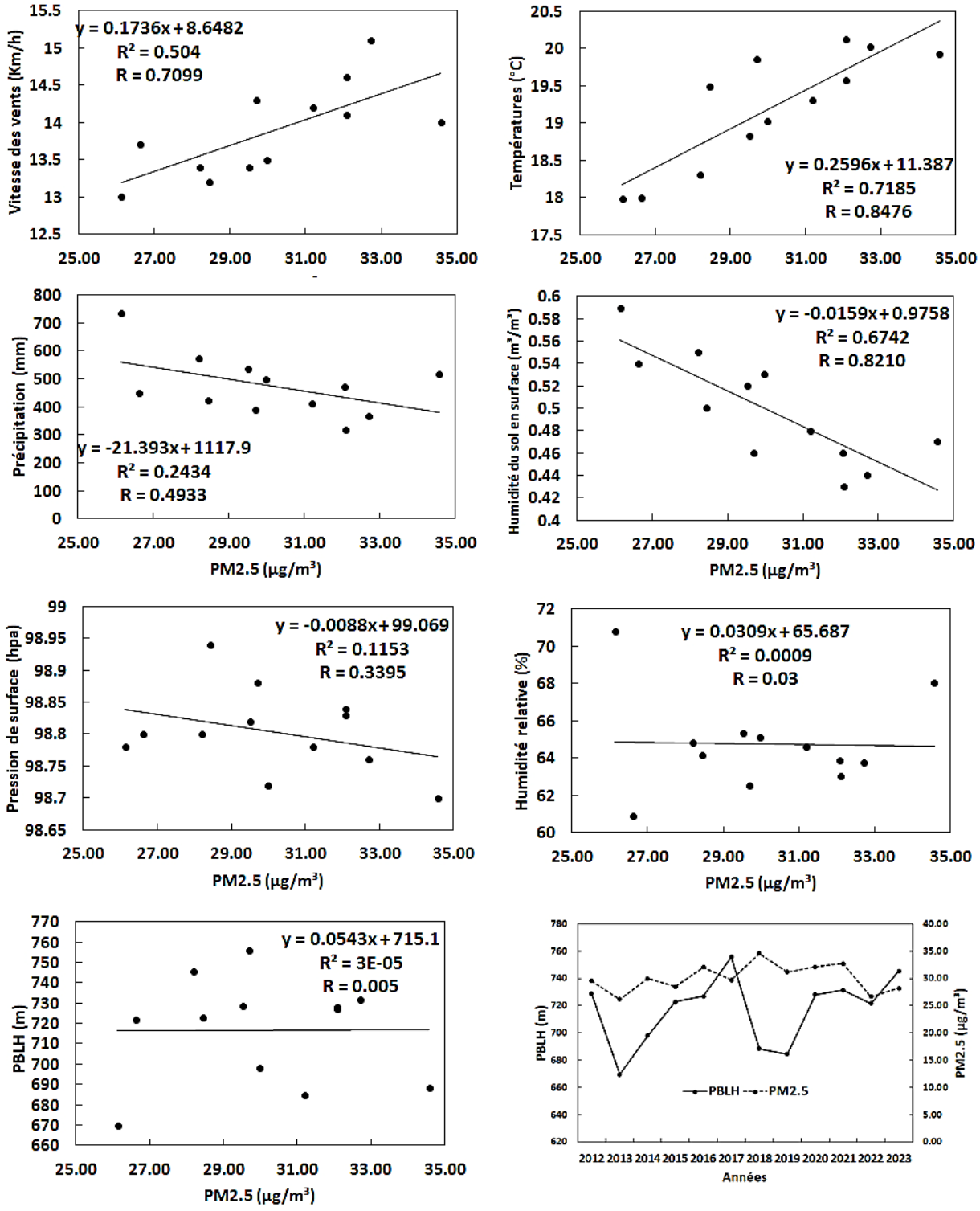


Figure 3.5 Valeurs du coefficient de corrélation (r) (a) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et la vitesse du vent, (b) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et les températures, (c) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et les précipitations, (d) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et l'humidité du sol en surface, (e) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et les concentrations et la pression de surface, (f) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et l'humidité relative, (g) corrélations entre les concentrations de PM2.5 et la hauteur de la couche limite planétaire, et (h) variations temporelles entre les concentrations de PM2.5 et la hauteur de la couche limite planétaire

Les résultats indiquent une forte corrélation positive entre la concentration de PM2.5 et la température (R=0,8476, p=0,000503), suggérant que des températures plus élevées sont significativement associées à des niveaux élevés de PM2.5. À l'échelle de la GSO, cette relation peut être attribuée aux fluctuations des niveaux d'eau entraînées par les cycles de précipitations et d'évaporation, qui affectent à la fois les émissions et la dispersion des PM2.5.

Inversement, l'humidité du sol en surface présente une forte corrélation négative (R=0,8210, p=0,001091), impliquant que l'augmentation de l'humidité du sol réduit les niveaux de PM2.5 — probablement en raison d'une réduction de la resuspension des poussières. La vitesse du vent démontre une forte corrélation positive (R=0,7099, p=0,009741), indiquant que des vitesses de vent élevées peuvent faciliter le transport et la dispersion des particules fines. Les précipitations montrent une corrélation négative modérée (R=0,4933, p=0,103407), ce qui s'aligne avec l'effet de lessivage attendu de la pluie pour éliminer les aérosols de l'atmosphère. La pression de surface présente une corrélation négative faible (R=-0,3395, p=0,279552), suggérant une influence minimale sur la variabilité des PM2.5.

Bien que l'humidité relative influence la croissance hygroscopique des aérosols et puisse modifier leur distribution granulométrique (Handschuh et al. 2022), aucune corrélation significative n'est trouvée dans cette étude (R=0,0300, p=0,92626), indiquant un rôle négligeable dans la modulation des niveaux de PM2.5. De même, la hauteur de la couche limite planétaire (PBLH) ne montre aucune corrélation significative (R=0,0050, p=0,987696).

Les résultats mettent en évidence la température, l'humidité du sol et la vitesse du vent comme les principaux moteurs de la concentration de PM2.5, tandis que les précipitations, la pression de surface, l'humidité relative et la PBLH présentent une influence limitée. Néanmoins, malgré la faible corrélation statistique, la dynamique temporelle entre les concentrations de PM2.5 et la PBLH fournit des informations précieuses sur l'origine des particules. Une faible PBLH reflète généralement des conditions atmosphériques stables associées à des inversions de température, qui favorisent l'accumulation de PM2.5. Ce phénomène est particulièrement marqué en 2013, 2018, 2019 et 2022, suggérant que des sources locales, telles que le trafic, l'industrie, la production d'énergie ou la construction, peuvent contribuer de manière significative.

En revanche, des valeurs élevées de PBLH dénotent une instabilité atmosphérique propice à la dispersion des particules (Tuna Tuygun et Elbir 2020). De telles conditions sont évidentes en 2014, 2016, 2020, 2021 et 2023, et dans une moindre mesure en 2015 et 2017. Ces résultats impliquent qu'environ 66 % de la variabilité des PM2.5 peut être expliquée par d'autres facteurs, en particulier

la vitesse du vent, renforçant l'hypothèse selon laquelle la GSO est une source primaire d'émissions.

De plus, une analyse de la direction du vent révèle une corrélation significative entre les vents du sud et des niveaux élevés de PM2.5. Par exemple, en 2018, la concentration la plus élevée enregistrée (34,57 µg/m³) coïncidait avec 38 % de vents provenant du sud à travers la GSO. Des schémas similaires sont observés en 2012, 2016 et 2020, avec des concentrations de PM2.5 de 29,52 µg/m³ (33 % de vents du sud), 32,07 µg/m³ (32 %) et 32,09 µg/m³ (28 %), respectivement. Ces résultats soulignent le rôle des vents du sud dans le transport et la dispersion des particules fines dans la région.

Les concentrations quotidiennes de PM2.5 apportent un soutien supplémentaire à ces conclusions. La Figure 4 montre la dominance annuelle de la classe « modérée » (12,10-35,40 µg/m³), parallèlement à de nombreuses occurrences de niveaux « malsains », « très malsains » et « dangereux » sur une base quotidienne. Le Tableau 4 résume le nombre de jours classés avec une qualité de l'air détériorée. Le nombre le plus élevé de jours « malsains » s'est produit en 2021 (124 jours), suivi de 2018 et 2019 (106 jours chacun). En revanche, l'année 2013 a compté le moins de jours malsains (57). Les jours « très malsains » ont culminé en 2022 (cinq jours), tandis que 2013 n'en a enregistré aucun.

Les jours « dangereux » — représentant la pire qualité de l'air — ont varié de manière significative, avec un maximum de cinq jours en 2021, tandis que certaines années n'en ont enregistré qu'un seul ou aucun.

Ces résultats mettent en évidence l'occurrence fréquente de niveaux de qualité de l'air inacceptables et soulignent la nécessité de stratégies efficaces d'atténuation de la pollution atmosphérique.

Tableau 3.4 : Nombre de jours classés comme malsains, très malsains ou dangereux sur la base de la concentration de PM2.5 (2012–2023)

Année	Nombre de jours malsains	Nombre de jours très malsains	Nombre de jours dangereux
2012	101	1	1
2013	57	0	0
2014	78	1	1
2015	88	3	0
2016	69	5	1
2017	84	3	1
2018	106	2	3
2019	106	1	2
2020	90	1	4
2021	124	3	5
2022	101	5	0
2023	71	3	1

3.4 Impact de la GSO sur les concentrations de PM2.5 dans la ville d'Oran

La Figure 6 illustre les variations spatiotemporelles de l'indice d'aérosols absorbants (AAI) sur la période du 8 au 17 août 2022, mettant en évidence l'impact direct de la GSO sur la qualité de l'air dans la ville située en aval. Le 8 août, l'AAI présentait une valeur moyenne de 1,17 dans la GSO, contre 0,46 dans la ville. Une augmentation significative a été observée le 9 août, atteignant 1,47 dans la GSO ; simultanément, Oran a enregistré une hausse de l'indice à 0,87. Cette corrélation a persisté le 10 août, lorsque l'AAI a fortement chuté à 0,21 dans la GSO, accompagnée d'une baisse similaire à 0,04 dans la ville.

Entre le 11 et le 13 août, un nouvel épisode de pollution est apparu, présentant des fluctuations synchrones entre les deux zones. Cette synchronicité suggère un lien direct entre les concentrations de particules fines dans la GSO et celles observées dans la ville. Par la suite, une amélioration de la qualité de l'air a été enregistrée du 14 au 16 août, avec des valeurs d'AAI respectives de 3,11, 0,55 et -0,162 dans la GSO, et de 2,76, 0,58 et -0,26 dans la ville, indiquant une évolution parallèle des indices. Une nouvelle vague de pollution est ensuite apparue le 17 août, avec l'AAI grimpant à 1,36 dans la GSO et coïncidant avec une augmentation similaire à 0,95 dans la ville.

Ces résultats démontrent une corrélation directe et immédiate entre les variations de l'AAI dans la GSO et celles enregistrées à Oran, impliquant que la pollution atmosphérique provenant de la GSO affecte de manière significative la qualité de l'air dans la ville en aval. Cette relation est confirmée statistiquement, avec un coefficient de corrélation de 96,31 % ($p < 0,00001$), soulignant la forte interdépendance entre les deux zones.

De plus, l'influence significative de la GSO sur les variations de concentration de PM2.5 a été corroborée par des observations post-COVID-19. En 2020, un confinement général et des mesures d'urgence strictes ont été mis en œuvre pour freiner la propagation du virus COVID-19. Celles-ci comprenaient la réduction des heures de travail, la suspension des croisières et du transport maritime, la diminution de l'activité industrielle et commerciale, ainsi que des restrictions sur les déplacements personnels. En théorie, de telles interventions auraient dû entraîner une baisse des concentrations de PM2.5. Cependant, les données montrent qu'en 2020, il y a eu 90 jours classés comme « malsains », un jour comme « très malsain » et quatre jours comme « dangereux ». De même, en 2021, 124 jours ont été jugés « malsains », trois comme « très malsains » et cinq comme « dangereux ». Ces conclusions indiquent que la source primaire de PM2.5 n'est pas uniquement anthropique ; au contraire, la GSO joue un rôle prédominant dans la dynamique régionale de la qualité de l'air.

3.5 Effets d'autres facteurs

Une étude précédente menée par (Bendib et Boutrid 2024b) a démontré, à l'aide de l'indice de pollution de l'air (API), que la ville d'Oran est responsable d'émissions dépassant 1,54x10^-2 mol/m², indiquant des niveaux de qualité de l'air allant de modérés à mauvais. L'étude a également révélé que ces émissions proviennent principalement d'un trafic dense, d'activités industrielles urbaines et du chauffage résidentiel. La source principale de monoxyde de carbone (CO) est le port d'Oran, tandis que la zone industrielle de Hassi Ameur est identifiée comme le principal contributeur de dioxyde de soufre (SO2). En revanche, la zone industrielle d'Es-Senia et l'aéroport d'Oran sont responsables des émissions d'ozone (O3) et de dioxyde d'azote (NO2), respectivement. Notamment, bien que la ville d'Oran contribue moins aux émissions de SO2 que les zones industrielles de Hassi Ameur et d'Oued Tlilet, ses opérations portuaires et son trafic routier contribuent tout de même aux niveaux de SO2, bien que dans une moindre mesure.

De plus, la stagnation du marché automobile, résultant de la suspension des agréments pour l'importation de véhicules neufs depuis 2017, a entraîné un déficit estimé à un million de véhicules neufs. Cette situation a augmenté la circulation de véhicules plus anciens, qui sont souvent plus

polluants. Ces conclusions sont soutenues par une étude menée par (Rahal et al. 2018, 2021), dont les résultats de simulation indiquent que pour chaque heure de trafic routier à Oran, environ 8,8 tonnes de CO, 1,04 tonne de NOx et 0,92 tonne de composés organiques volatils (COV) sont rejetées.

Les espaces verts urbains peuvent aider à réduire les concentrations de PM2.5 par des processus d'absorption et de dépôt (Chen et al. 2022b). Dans la zone d'étude, la baisse des concentrations et l'amélioration de la qualité de l'air (en particulier dans la ville d'Oran) peuvent refléter l'efficacité des politiques de gestion de la qualité de l'air en plus de conditions météorologiques favorables. Selon (Bendib et Boutrid 2024a, b), ceci est le résultat de la mise en œuvre du programme spécial lancé en 2007 pour promouvoir l'écologie urbaine à Oran. En tant que ville d'importance nationale, Oran a bénéficié de plusieurs projets visant à développer les espaces verts urbains. De plus, avec un budget de 34 milliards de dinars algériens (environ 2,5 millions de dollars US dollars), plus de 246 espaces verts et terrains de jeux, incluant le Jardin Méditerranéen (10 hectares) et le Jardin Sidi M'hamed (6 hectares), ont été créés ou rénovés en 2013. Ce projet comprenait également l'embellissement des rues par la plantation d'arbres, la création d'espaces verts linéaires en zone urbaine et l'amélioration des principaux axes routiers reliant la ville à ses environs, notamment Tlemcen, Mostaganem et Mascara. De plus, suite aux Jeux Méditerranéens de 2022, un plan de développement écologique a été lancé autour du Complexe Olympique d'Oran, couvrant une superficie de 13 hectares. Ce projet devrait contribuer à la réduction de la pollution atmosphérique d'ici 2025.

Bien que ces mesures aient été mises en œuvre, il est essentiel de souligner les conclusions de (Schwela 2024), qui indiquent que la gestion de la qualité de l'air (GQA), comprise comme une approche structurée plutôt qu'une réponse ponctuelle aux épisodes de pollution, semble être absente en Algérie. Il ne semble y avoir aucune base législative pour l'élaboration de plans de mise en œuvre pour un air pur ou de stratégies à long terme pour réduire la pollution atmosphérique.

En conclusion, bien que cette étude présente des résultats prometteurs et mette en évidence l'effet de la GSO sur la dispersion des PM2.5, il est crucial d'en reconnaître les limites pour mieux interpréter ses conclusions. Premièrement, nos résultats reposent principalement sur des analyses théoriques, car il n'existe actuellement aucune méthode fiable pour identifier avec précision l'origine des particules ou tracer leur mouvement exact. Par conséquent, un jugement définitif sur l'impact de la GSO reste prématuré. De plus, la résolution spatiale relativement faible des données utilisées (1000 m) constitue un facteur limitant, en particulier lorsqu'on tente d'évaluer l'impact des particules fines sur les environnements urbains, où les variations locales jouent un rôle crucial.

Une résolution plus fine permettrait des conclusions plus précises et une meilleure compréhension de la dynamique de dispersion. Un autre défi majeur réside dans la disponibilité des données météorologiques. En effet, l'absence d'enregistrements à long terme pour certains paramètres atmosphériques nous a contraints à limiter l'étude à une décennie, alors que l'extension de la série de données aux années 2000 aurait permis une analyse plus robuste et représentative des tendances à long terme.

Malgré ces limites, cette étude apporte une contribution précieuse à la compréhension du rôle de la GSO dans la dispersion des PM2.5 et répond efficacement à son objectif principal. Ces conclusions ouvrent la voie à des recherches futures visant à affiner ces résultats en s'appuyant sur des données plus détaillées et des approches méthodologiques complémentaires.

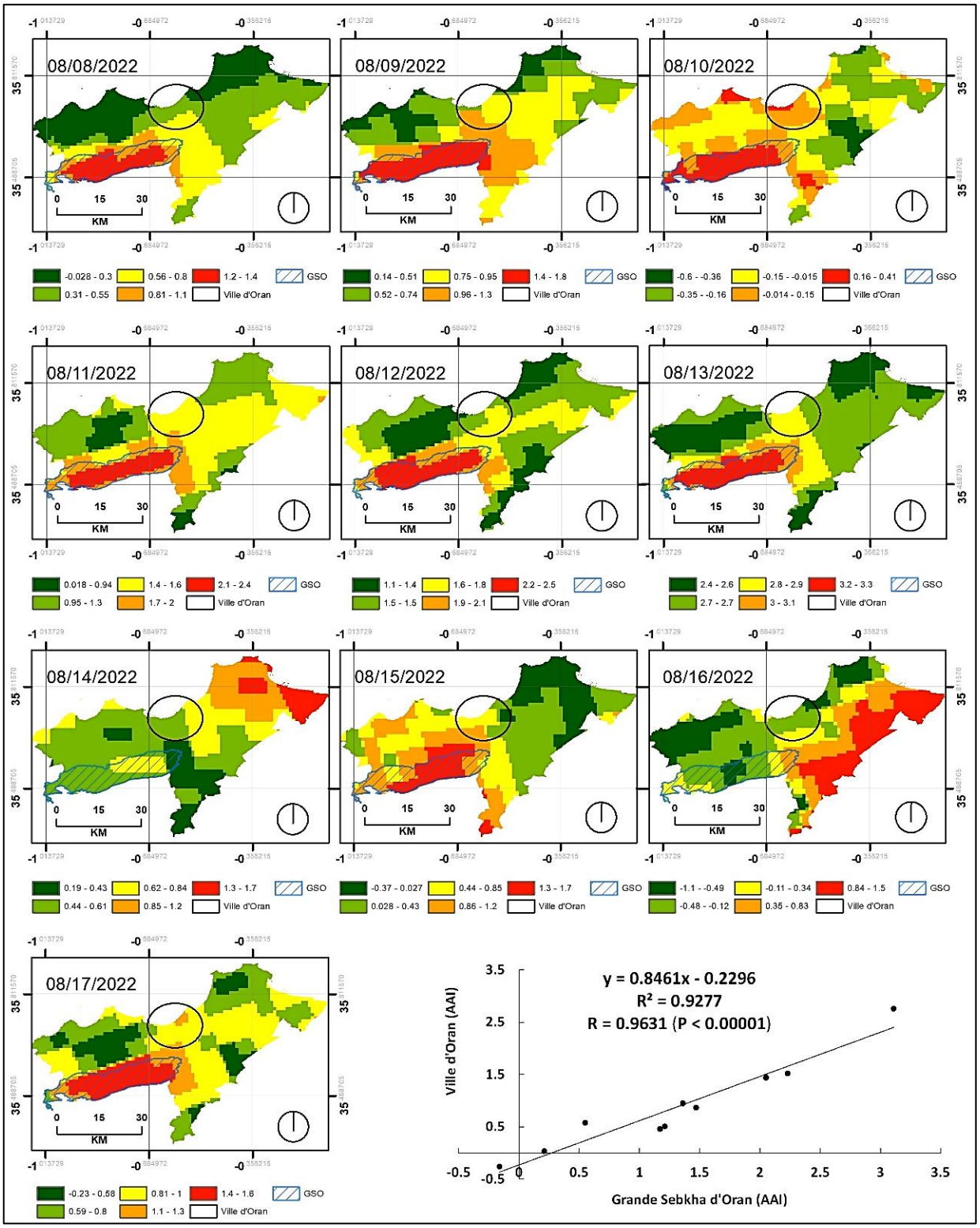


Fig. 3.6 Suivi du mouvement des aérosols du 15 septembre 2022 au 20 septembre 2022

La Figure 6 montre les variations de l'indice des aérosols absorbants (AAI) entre le 8 et le 17 août 2022

4- Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les outils et méthodes utilisés dans cette étude, notamment les données satellitaires et le modèle GEOS-Chem, afin d'analyser la pollution aux PM2.5 dans la région d'Oran. L'utilisation des satellites a rendu possible l'observation de la qualité de l'air sur une longue période, tandis que la validation des résultats a montré une bonne fiabilité des données obtenues. Cette approche a également permis de mieux comprendre l'évolution de la pollution entre 2012 et 2023, ainsi que l'influence des conditions météorologiques telles que la température, le vent, les précipitations et l'humidité sur la dispersion des particules fines. Ainsi, cette méthodologie constitue une base solide pour l'analyse des variations spatiotemporelles de la qualité de l'air dans la région étudiée.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette étude propose une analyse complète des variations spatiotemporelles des concentrations de PM2.5 dans la région d'Oran, en Algérie, avec un accent particulier sur l'influence de la Grande Sebkha d'Oran (GSO) et des facteurs météorologiques. En intégrant des données issues de satellites (MODIS, MISR, VIIRS) et le modèle de transport chimique GEOS-Chem, nous avons démontré le rôle significatif de la GSO en tant que source naturelle de PM2.5, particulièrement durant les périodes sèches et venteuses. Nos conclusions soulignent l'interaction complexe entre les facteurs environnementaux et anthropiques dans la configuration de la qualité de l'air, offrant des perspectives précieuses pour les décideurs et les chercheurs. Les principales contributions peuvent être résumées comme suit : (1) Quantification des tendances des PM2.5 (2012-2023) : En utilisant des données satellitaires, notamment l'AOD dérivée de MODIS et l'algorithme de van Donkelaar, nous avons révélé des fluctuations annuelles et spatiales significatives des concentrations de PM2.5, avec des pics en 2018 et 2021. (2) Identification des points chauds spatiaux : Des concentrations élevées de PM2.5 ont été systématiquement trouvées dans les régions sud et sud-est d'Oran, particulièrement autour de la GSO, confirmant son rôle de source d'émission naturelle majeure. (3) Corrélations météorologiques : Nous avons démontré de fortes corrélations positives entre les niveaux de PM2.5 et la température ainsi que la vitesse du vent, et de fortes corrélations négatives avec l'humidité du sol et les précipitations, mettant en évidence les facteurs climatiques clés influençant la dispersion des particules. (4) Validation de la précision des données : Les estimations de PM2.5 ont été validées par rapport aux données satellitaires mondiales et au modèle GEOS-Chem, et un coefficient de corrélation élevé de 90,68 % a été obtenu, confirmant la robustesse de la méthode d'estimation. (5) Preuve directe de l'impact de la GSO : À l'aide de l'indice d'aérosols absorbants (AAI), nous avons suivi les panaches d'aérosols se déplaçant de la GSO vers la ville d'Oran, avec une forte corrélation (R^2 = 96,31%) entre les variations d'aérosols dans les deux zones. (6) Malgré la réduction de l'activité anthropique pendant le confinement lié au COVID-19, les niveaux de PM2.5 sont restés élevés, renforçant le rôle prédominant de la GSO dans la détérioration de la qualité de l'air.

Pour s'appuyer sur les conclusions de ce travail, les études futures devraient envisager les pistes de recherche suivantes : (1) Utiliser des données à plus haute résolution spatiale et temporelle (< 1 km) pour capturer plus précisément les variations à l'échelle urbaine des concentrations de PM2.5 et améliorer la précision du modèle. (2) Bien que cette étude offre une compréhension fondamentale de l'influence de la GSO sur les variations spatiotemporelles des concentrations de PM2.5, les recherches futures devraient envisager d'intégrer des techniques modernes

d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle pour accroître la capacité prédictive et la profondeur analytique. Cependant, une telle intégration se heurte actuellement à des limites importantes dues au manque d'accès aux données d'observation au sol, notamment les mesures de PM2.5 en temps réel et les enregistrements météorologiques étendus. Ces contraintes ont justifié l'utilisation de données de télédétection et de modèles physiques validés dans la présente étude. (3) Étant donné les niveaux d'humidité élevés dans la région côtière d'Oran, l'intégration d'une analyse de la croissance hygroscopique des aérosols améliorerait la précision des estimations de concentration de PM2.5 et approfondirait notre compréhension de leur dynamique spatiotemporelle.

À la suite de cette étude, plusieurs recommandations clés ont émergé pour aider à réduire les émissions de PM2.5. Comme mentionné précédemment, Oran manque actuellement de stations locales de surveillance de la qualité de l'air. L'installation de telles stations améliorerait les capacités de surveillance des émissions et fournirait des données précises en temps réel. De plus, parallèlement au plan de promotion de l'écologie urbaine de la ville, des mesures de gestion des sols, telles que la plantation de végétation halophyte autour de la GSO, pourraient aider à stabiliser les sédiments et à réduire l'érosion éolienne. La gestion des niveaux d'eau de la Sebkha par l'acheminement direct des eaux usées traitées de la station d'épuration d'El Karma pourrait également aider à minimiser les périodes d'assec, qui sont une source majeure d'émissions de particules. Enfin, concernant les sources anthropiques, il est essentiel de renforcer les normes d'émission pour les industries et les ports, tout en encourageant l'adoption de modes de transport plus propres.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Abbas MS, Yang Y, Zhang Q et al (2024) Aperçu des aérosols des lacs salés : émissions, composition chimique et impacts sur la santé sous le changement climatique. Atmosphere 15:212. https://doi.org/10.3390/atmos15020212
2. Agence Spatiale Européenne (2025) Applications S5P. Qualité de l'air et pollution. https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s5p-applications. Consulté le 21 fév 2025.
3. Aghdam FZ, Hasanlou M, Dehghanijabbarlou M (2024) Quantification de la qualité de l'air urbain par l'imagerie satellitaire multispectrale et Google Earth Engine. J Atmos Solar Terr Phys 261:106301. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106301
4. Almeida SM, Manousakas M, Diapouli E et al (2020) Répartition des sources de particules ambiantes par modélisation des récepteurs dans les zones urbaines d'Europe et d'Asie centrale. Environ Pollut 266:115199. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115199
5. Ansmann, A., et al. (2011). Dust and smoke detection and retrieval using multiwavelength Raman and polarization lidars. Journal of Geophysical Research: Atmospheres.
6. Basemera S, Onyango S, Tumwesigyire J et al (2025) Impact des facteurs météorologiques sur la variation saisonnière et diurne des PM2.5 sur un site à Mbarara, Ouganda. Air 3:1. https://doi.org/10.3390/air3010001
7. Bendib A, Boutrid ML (2024a) Évaluation et prédiction des effets de la température de surface terrestre sur le confort thermique humain dans la ville d'Oran, Algérie. Theor Appl Climatol. https://doi.org/10.1007/s00704-024-05097-0
8. Bendib A, Boutrid ML (2024b) Utilisation des données Sentinel-5P TROPOMI pour l'évaluation de la qualité de l'air dans la ville d'Oran, Algérie occidentale. J Indian Soc Remote Sens 52:2235-2250. https://doi.org/10.1007/s12524-024-01951-w
9. Bendib, A. (2025). Variabilité spatio-temporelle des concentrations de PM2.5 dans la wilaya d'Oran : Apport de la télédétection et rôle de la Grande Sebkha. Revue Algérienne de Géographie (à paraître).
10. Benkesmia Y, Hassani MI, Kessar C (2023) Variation de l'étendue des eaux de surface dans la grande Sebkha d'Oran (NO de l'Algérie) à l'aide des données Landsat 1987-2019 : Interaction des facteurs naturels et des impacts anthropiques. Remote Sens Appl: Society and Environment 30:100953. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100953
11. Benyahia, M., Bouanani, A., & Chikhaoui, M. (2014). Les zones humides salines en Algérie : fonctionnement et vulnérabilité. Revue des Sciences de l'Eau, 27(2), 145-158.
12. Benziane A, Boualla N (2022) Contribution des techniques isotopiques à la connaissance du système aquifère de la grande Sebkha d'Oran. Appl Water Sci 12:128. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01659-7
13. Biswas K, Chatterjee A, Chakraborty J (2020) Comparaison des polluants atmosphériques entre Calcutta et Siliguri, Inde, et sa relation avec le changement de température. J Geovis Spat Anal 4:25. https://doi.org/10.1007/s41651-020-00065-4
14. Boualla N, Adjdir M, Benziane A, Bendraoua A (2019) Estimation généralisée des impacts globaux sur la qualité de l'eau sur les caractéristiques du sol dans le bassin de la Grande Sebkha d'Oran. Appl Water Sci 9:4. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0861-0
15. BOUANANI, A., & BENYAHIA, M. (2015). Étude hydrogéologique et géotechnique de la Grande Sebkha d'Oran. Bulletin des Sciences Géographiques, 12, 45-68.

16. Boutrid ML, Bendib A (2024) Effet des activités portuaires et des rejets urbains sur la qualité de l'eau dans le port d'Oran, Algérie occidentale. J Indian Soc Remote Sens. https://doi.org/10.1007/s12524-024-02003-z
17. Burnett, R., et al. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(38), 9592-9597.
18. Chen J, Zhang H, Xue J et al (2022a) Étude sur la distribution spatiale, les sources potentielles et le risque écologique des métaux lourds dans les eaux de surface et les sédiments du port de Shanghai, Chine. Marine Pollution Bulletin 181:113923. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113923
19. Chen Y, Ke X, Min M et al (2022b) Avons-nous besoin de plus d'espaces verts urbains pour atténuer la pollution par les PM2.5 ? Une étude de cas à Wuhan, Chine. Land 11:776. https://doi.org/10.3390/land11060776
20. Chikhaoui, M., Belayachi, N., Ammar, M., & Dashnor, H. (2017). Caractérisation géotechnique des sols de la Grande Sebkha d'Oran. Revue Française de Géotechnique, 150, 23-35.
21. Cohen, A. J., et al. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. The Lancet, 389(10082), 1907-1918.
22. Convention de Ramsar. (1971). Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau. Ramsar, Iran.
23. Cooke, R. U., Warren, A., & Goudie, A. (1993). Desert Geomorphology. UCL Press.
24. Costanza, R., et al. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 26, 152-158.
25. Filonchyk M, Hurynovich V (2020) Distribution spatiale et variation temporelle de la pollution atmosphérique dans le désert de Gobi Sud, Chine, durant 2016-2019. Environ Sci Pollut Res 27:26579-26593. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09000-y
26. Ge Y, Abuduwaili J, Ma L (2019) Lacs en terres arides et tempêtes de poussière saline. E3S Web Conf 99:01007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199901007
27. Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. Environment International, 63, 101-113.
28. Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). Desert Dust in the Global System. Springer.
29. Goudie, A. S., & Wells, G. L. (1995). The nature, distribution and formation of pans in arid zones. Earth-Science Reviews, 38(1-2), 1-69.
30. Grineski SE, Mallia DV, Collins TW et al (2024) Poussière nocive provenant des lacs qui s'assèchent : la préservation des niveaux d'eau du Grand Lac Salé (USA) diminue la poussière ambiante et les disparités raciales dans l'exposition de la population. One Earth 7:1056-1067. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.05.006
31. Hachemi K, Amrouni Y, Daoudi M, Bamousa AO (2020) Étude diachronique de la grande Sebkha d'Oran (Algérie occidentale) basée sur des images radar RSO (1992-2011). J Taibah Univ Sci 14(1):1433-1446. https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1825183
32. Hachemi, A., et al. (2020). Dynamique morphologique et sédimentologique de la Grande Sebkha d'Oran. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 26(2), 145-162.
33. Halder B, Ahmadianfar I, Heddam S et al (2023) Exploration annuelle des polluants atmosphériques au niveau national basée sur l'apprentissage automatique utilisant Sentinel-5P et Google Earth Engine. Sci Rep 13:7968. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34774-9
34. Handschuh J, Erbertseder T, Schaap M, Baier F (2022) Estimation des concentrations de PM2.5 en surface à partir de l'AOD : une combinaison de SLSTR et MODIS. Remote

Sensing Applications: Society and Environment 26:100716. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100716
35. Health Effects Institute. (2022). State of Global Air 2022. Special Report. Boston, MA.
36. Hu X, Yin Y, Duan L et al (2020) Variation temporelle et spatiale des PM2.5 à Xining, au nord-est du plateau Qinghai-Xizang (Tibet). Atmosphere 11:953. https://doi.org/10.3390/atmos11090953
37. Ilenič A, Pranjić AM, Zupančič N et al (2024) Évaluation de l'exposition aux particules fines (PM2.5) chez les usagers quotidiens actifs pour induire un changement de comportement afin de réduire la pollution de l'air. Science of The Total Environment 912:169117. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169117
38. IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
39. IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II. Cambridge University Press.
40. IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
41. Jing Z, Liu P, Wang T et al (2020) Effets des facteurs météorologiques et des précurseurs anthropiques sur les concentrations de PM2.5 dans les villes de Chine. Sustainability 12:3550. https://doi.org/10.3390/su12093550
42. Keddy, P. A. (2010). Wetland Ecology: Principles and Conservation (2nd ed.). Cambridge University Press.
43. Kumar A, Dhakhwa S, Dikshit AK (2022) Évaluation comparative de l'adéquation des techniques d'interpolation d'ArcGIS utilisant le schéma "leave-one-out" pour la cartographie de la qualité de l'air. J Geovis Spat Anal 6:9. https://doi.org/10.1007/s41651-022-00102-4
44. Li J, Liu W, Li L et al (2021) Hygroscopicité des mélanges de sels frais et vieillis provenant de lacs salés. Atmosphere 12:1203. https://doi.org/10.3390/atmos12091203
45. Lyapustin A, Wang Y (2022) Épaisseur optique des aérosols terrestres quotidienne MODIS/Terra+Aqua L2G Global 1km SIN Grid V061.
46. Meng J, Han W, Yuan C et al (2025) La capacité des interventions humaines à réguler la concentration de PM2.5 s'est considérablement améliorée en Chine. Environment International 195:109251. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109251
47. Middleton, N., & Goudie, A. (2001). Saharan dust: sources and trajectories. Transactions of the Institute of British Geographers, 26(2), 165-181.
48. Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). Wetlands (5th ed.). John Wiley & Sons.
49. Nguyen D-H, Lin C, Vu C-T et al (2022) Ozone troposphérique et NOx : une revue de la variation mondiale et des influences météorologiques. Environ Technol Innov 28:102809. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102809
50. OMS (2022a) Décès attribuables à la pollution de l'air ambiant de l'OMS. Observatoire de la santé mondiale (Rapport). Organisation mondiale de la santé. https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-deaths. Consulté le 15 fév 2025.
51. OMS (2022b) DALYs attribuables à la pollution de l'air ambiant de l'OMS. Observatoire de la santé mondiale (Rapport). Organisation mondiale de la santé. https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/mbd-aap-ambient-air-pollution-attributable-dalys. Consulté le 15 fév 2025.
52. Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. Angewandte Chemie International Edition, 44(46), 7520-7540.

53. Prospero, J. M., et al. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Reviews of Geophysics, 40(1).
54. Rahal F, Hadjou Z, Blond N, Aguejdad R (2018) Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques dans la région d'Oran, Algérie. Cybergeo. https://doi.org/10.4000/cybergeo.29111
55. 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 J Health Sci 3:52-57.
56. Rahaman SN, Ahmed SMM, Zeyad M, Zim AH (2023) Effet de la végétation et de la température de surface terrestre sur la concentration de NO2 : une approche de télédétection basée sur Google Earth Engine. Urban Climate 47:101336. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101336
57. Rahaman SN, Nelson J, Ali AAB et al (2024) Un cadre géostatistique multivarié pour évaluer la dynamique spatio-temporelle de la pollution de l'air et de la température de surface terrestre au Bangladesh. Earth Syst Environ. https://doi.org/10.1007/s41748-024-00418-9
58. Ramsar (2020) Algérie Grande Sebkha d'Oran.
59. Ramsar Convention Secretariat. (2018). The Ramsar Convention Manual: A guide to the Convention on Wetlands (6th ed.). Gland, Switzerland.
60. Ramsar Convention Secretariat. (2023). Global Wetland Outlook: Special Edition on Peatlands. Gland, Switzerland.
61. Rosen, M. R. (1994). The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. Geological Society of America Special Paper, 289, 1-18.
62. Sangkham S, Phairuang W, Sherchan SP et al (2024) Mise à jour sur les effets néfastes pour la santé de l'exposition aux PM2.5. Environ Adv 18:100603. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603
63. Schwela D (2024) Pollution par les particules et impacts sur la santé dans six pays d'Afrique du Nord. EJDEVELOP 4:1-22. https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2024.4.3.350
64. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (3rd ed.). John Wiley & Sons.
65. Tang F, Wang W, Si F et al (2022) Dérivation réussie de l'indice d'aérosols absorbants à partir de l'instrument de surveillance des gaz traces environnementaux (EMI). Remote Sensing 14:4105. https://doi.org/10.3390/rs14164105
66. Thangavel P, Park D, Lee Y-C (2022) Aperçus récents sur la toxicité médiée par les particules (PM2.5) chez l'homme : un aperçu. IJERPH 19:7511. https://doi.org/10.3390/ijerph19127511
67. Tuna Tuygun G, Elbir T (2020) Analyse temporelle à long terme de la relation entre les aérosols en colonne et en surface avec la hauteur de la couche limite planétaire sur un site côtier du sud de la Turquie. Atmos Pollut Res 11:2259-2269. https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.008
68. Van Donkelaar A, Hammer MS, Bindle L et al (2021) Estimations mondiales mensuelles des particules fines et leur incertitude. Environ Sci Technol 55:15287-15300. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05309
69. Van Donkelaar A, Martin RV, Pasch AN et al (2012) Amélioration de la précision des estimations quotidiennes des concentrations d'aérosols fins au niveau du sol dérivées par satellite pour l'Amérique du Nord. Environ Sci Technol 46:11971-11978. https://doi.org/10.1021/es3025319

70. Wang Y, Du H, Xu Y et al (2018) Relation de variation temporelle et spatiale et facteurs d'influence sur l'îlot de chaleur urbain de surface et la pollution par l'ozone dans le delta du fleuve Yangtze, Chine. Sci Total Environ 631-632:921-933. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.050
71. Warren, J. K. (2006). Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer.
72. WHO. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
73. WMO. (2025). Sand and Dust Storms: A Guide to Mitigation, Prediction and Monitoring. World Meteorological Organization.
74. Xing Y-F, Xu Y-H, Shi M-H, Lian Y-X (2016) L'impact des PM2.5 sur le système respiratoire humain. J Thorac Dis 8:E69-E74. https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19
75. Yang Q, Yuan Q, Li T et al (2017) Les relations entre les PM2.5 et les facteurs météorologiques en Chine : variations saisonnières et régionales. IJERPH 14:1510. https://doi.org/10.3390/ijerph14121510
76. Yousefi R, Shaheen A, Wang F et al (2023) Tendances des particules fines (PM2.5) issues des changements de surface terrestre et des politiques de pollution de l'air en Chine durant 1980-2020. Journal of Environmental Management 326:116847. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116847
77. Zeidan, M. (2025). Les sebkhas d'Afrique du Nord : Dynamique environnementale et impacts sur la qualité de l'air. Journal of Arid Environments, 215, 105-124.
78. Zhang H, Kondragunta S (2021) Estimation quotidienne et horaire des PM2.5 en surface à partir de l'AOD satellitaire. Earth and Space Science 8:e2020EA001599. https://doi.org/10.1029/2020EA001599