

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université BLIDA 1
Faculté de Technologie

Département Génie des Procédés



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie d'environnement

Intitulé du mémoire

**Modélisation du taux des concentrations des
particules fins atmosphériques dans une
zone urbaine.**

Présentée par :

LAIDOUCI Nadjat

EZZEROUG EZZRAIMI Amel

Encadré par :

Dr. IBRIR Abdellah

Promotion 2024/2025

Remerciements et Gratitude

Tout d'abord, on rend grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la volonté, la force, la patience et le courage nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à Dr. Abdellah IBRAHIM, notre promoteur de mémoire, pour le temps qu'il nous a consacré, ainsi que pour la qualité de ses conseils et de ses orientations. Son accompagnement constant, tant sur le plan scientifique que moral, a été déterminant dans la réalisation de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail et pour l'intérêt qu'ils lui portent.

On souhaite également remercier tous nos enseignants, qui nous ont transmis leurs connaissances et ont enrichi notre parcours universitaire au fil des années.

Enfin, on adresse nos remerciements les plus chaleureux à nos parents, familles et à nos proches, pour leur soutien moral, leur patience et leur encouragement inestimable tout au long de cette aventure.

Dédicaces

إلى النورين اللذين أنارا دربي، إلى من علماني أن الطموح لا سقف له،

إلى أمي وأبي...

كل كلمات الشكر تقف عاجزة أمام عطاءكما، فبكما بدأت الرحلة وبكما اكتملت.

إلى سندي في الحياة، أخويّ العزيزين، لقمان ومحمد كنتما ظهري حين تعب، وبهجتي حين ضاقت الأيام، شكرًا لكما من القلب.

إلى جدتي الحبيبة...

لطيبة قلبك ودعواتك التي كانت لي سلاحًا خفيًا في كل محطة.

إلى "أمي نعيمة" شكرًا لدعائك ودعمك الدائم ولوجودك،

إلى خالتي، إلى خالي، وإلى عمي وزوجته... شكرًا لأنكم كنتم لي دومًا العائلة التي تسند وتدعم بكل حب، وشكرًا لأنكم لم تبخلوا عليّ يومًا، لا بكلمة طيبة ولا بدعاء ولا بتشجيع.

إلى عائلتي كلها، لكم جميعًا محبة لا توصف وامتنان لا ينتهي.

إلى أصدقائي وزملائي كلهم الذين شاركوني درب العلم والتعب، كنتم البلسم في لحظات الإرهاق، والفرح في أوقات الإنجاز، أخصّ بالذكر: حياة، سيرين، ابتسام، ومارية والى صديقة طفولتي نسرين كنتنّ لي أكثر من صديقات، كنتنّ روحًا تسند روحي.

ولا أنسى رفيقة دربي في هذا العمل، زميلتي وصديقتي الغالية آمال، لقد كان لتعاوننا وصدق نيتنا أكبر الأثر في إخراج هذا الجهد المشترك إلى النور.

إلى كل من مرّ في طريقي وترك أثرًا جميلًا... هذا الإنجاز ليس لي وحدي، بل لكم جميعًا.

Dédicaces

من قال انا لها " نالها "

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق محفوفا بالتسهيلات لكني فعلتها ونلتها
فما سلكنا البدايات الا بتيسيره، وما بلغنا النهايات الا بتوقيقه وما حققنا الغايات الا بفضلله

فالحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

الى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة.. ونصح الأمة.. الى نبي الرحمة ونور العالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

اهدي نجاحي الى الجدار الذي استند عليه في تعبي وحزني.. الى الكتف التي اضع عليها اثقالي واليد التي تربت علي في كل
حين ...

الى عزيزي وحبيبي الذي احبه بقدر هذا العالم وأكثر، الوطن الذي أنتمي اليه والأرض التي تحتويني الى اول الداعمين لي
بابا الغالي

الى من جعل الجنة تحت اقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها الى الانسانة العظيمة التي لطالما تمننت ان تقرر عينها
في يوم كهذا

امي الغالية

اليكم عائلتي

الى من شددت عضدي بهم فكانوا ينابيع ارتوي منها

الى قرة عيني اختي واخوتي

الى من اخترته سنداً لي بعد والدي.... الى الروح النقية التي تشبهني.....

الى من قبلت به صديقا لقلبي ورفيقا لدربي وانيسا لروحي وشريكا لي ولبقية حياتي "A"

"إلى من غرسوا فينا حبّ العلم، وكانوا لنا آباءً وأمّهاتٍ في مسيرة التعلم... إليكم يا أساتذتي، كل الامتنان والحب، فكنتم
اليد التي أمسكت بنا لننهض، والنور الذي بدّد عتمة الجهل. شكراً لقلوبكم قبل كلماتكم"

"لكم منّا دعاء لا ينقطع، وذكرى لا تُنسى"

لكل من كان عوناً في هذا الطريق ... صديقاتي ومن أحب

الى من تمنوا رؤيتي في هذا المكان

الى الذين حملوا دفاترهم، كتبهم وامالهم الكبيرة على دروب العلم والمعرفة

الى طلبة غزة الذين رحلوا قبل ان تكتمل الحكاية

وقبل ان ينادى بأسمائهم في يوم التخرج

سلاماً على ارواحهم الطاهرة

نمذجة معدل تركيز الجسيمات الجوية الدقيقة في منطقة حضرية

الملخص:

يشكل تلوث الهواء بمختلف أشكاله خطراً كبيراً وأولياً على صحة الإنسان. وتشمل هذه الأشكال المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) والجسيمات الدقيقة (PMi) بأحجامها المختلفة. تركز هذه الدراسة على مراقبة قياسات تركيز PMi من أجل نمذجة ظاهرة تشتت PMi كدالة للظروف الجوية (MC) في منطقة حساسة للتلوث تقع في مركز مصطفى باشا الجامعي (CHUMP) في الجزائر العاصمة. يهدف العمل إلى نمذجة التطور اليومي لتركيزات الجسيمات أقل من 1 ميكرومتر (PM-1)، و2.5 ميكرومتر (PM-2.5)، و4 ميكرومتر (PM-4)، و10 ميكرومتر (PM-10) وPM-Total، بناءً على الظروف الجوية، باستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي للشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). تم تسجيل البيانات الساعية حول تركيزات PM1 و CM في الغلاف الجوي في وقت واحد في محطة مراقبة جودة الهواء التلقائية الموجودة في موقع حضري في الجزائر، باستخدام جهاز قياس الغبار الناعم، FIDAS® 200. وبلغ عدد بيانات PM1 التي تم جمعها 835 قياساً. ولتحقيق هذه الغاية، تمت كتابة برنامج MATLAB® لربط تركيزات PMi. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن النموذج القائم يتمتع بأداء تنبؤي جيد، مع معامل تحديد $R^2 = 0.9789$ وخطأ الجذر التربيعي المتوسط $RMSE = 0.8067$.

الكلمات المفتاحية: تلوث الغلاف الجوي ; نمذجة ; PMi ; بيئة حضرية ; تشتت ; نموذج رياضي ; Fidas200® ; RNA.

Modeling of the concentration rate of fine atmospheric particles in an urban area

Abstract:

Air pollution with its different forms represents a significant and primary danger to human health. Among these forms, can cite Volatile Organic Compounds (VOCs) as well as Fine Particulate Matter (PMi) with their different sizes. This study focuses on monitoring PMi concentration measurements in order to model the phenomenon of [PMi] dispersion as a function of meteorological conditions (MC) in a pollution-sensitive area, located at the Mustapha Pacha University Hospital (CHUMP) in Algiers. The work aims to model the daily evolution of particle concentrations below 1µm (PM-1), 2.5 µm (PM-2.5), 4 µm (PM-4), 10 µm (PM-10) and PM-Total, based on meteorological conditions, using artificial intelligence algorithms Artificial Neural Networks (ANN). Hourly data on atmospheric concentrations of PMi and CM were recorded simultaneously at an automatic air quality monitoring station located at an urban site in Algiers, using the fine dust measuring device, FIDAS® 200. The number of data collected on PM was 835 measurements. For this, a MATLAB® program was written to correlate PMi concentrations. The results obtained show that the established model has good predictive performance, with a coefficient of determination $R^2 = 0.9789$ and the root mean square error $RMSE = 0.8067$.

Key words: The atmospheric pollution; PMi; Modeling; Urban environment; dispersion; mathematical model; RNA; Fidas® 200.

Modélisation du taux des concentrations des particules fins atmosphériques dans une zone urbaine

Résumé :

La pollution atmosphérique avec ses différentes formes représente un danger important et primordial sur la santé humaine. Parmi ces formes, on cite les Composés Organiques Volatils (COV) ainsi que les Matières Particules fines (PMi) avec leurs différentes tailles. La présente étude s'intéresse aux suivis des mesures des concentrations des PMi afin de faire une modélisation du phénomène de la dispersion des [PMi] en fonction des conditions météorologiques (CM) dans une zone sensible à la pollution, située au Centre Hospitalo Universitaire Mustapha Pacha (CHUMP) à Alger. Le travail vise à modéliser l'évolution quotidienne des concentrations de particules inférieures à 1µm (PM-1), 2.5 µm (PM-2.5), 4 µm (PM-4), 10 µm (PM-10) et PM-Total, sur la base des conditions météorologiques, en utilisant l'algorithmes d'intelligence artificielle Réseaux de Neurone Artificiel (RNA). Les données horaires sur les concentrations atmosphériques de PMi et CM ont été enregistrées simultanément à une station de contrôle automatique de la qualité de l'air située sur un site urbain à Alger, à l'aide du dispositif de mesure des poussières fines, FIDAS® 200. Le nombre de données collectées sur les PM était de 835 mesures. Pour cela, un programme MATLAB® a été écrit afin de corrélér les concentrations de PMi. Les résultats obtenus montrent que le modèle établi a de bonnes performances prédictives, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.9789$ et la racine de l'erreur quadratique moyenne $RMSE = 0.8067$.

Mots Clés : La pollution atmosphérique ; PMi ; modélisation ; milieu urbain ; dispersion ; modèle mathématique ; RNA ; FIDAS® 200.

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste d'abréviation

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale	1
Chapitre I : GENERALITE SUR LA DISPERSION DES PARTICULES FINES ATMOSPHERIQUES	
I.1. Introduction	2
I.2. Atmosphère de la terre et sa composition	2
I.2.1. Couches atmosphériques : ordre et caractéristiques	3
I.2.1.1. Troposphère	3
I.2.1.2. Stratosphère	3
I.2.1.3. Mésosphère	3
I.2.1.4. Thermosphère	3
I.2.1.5. Exosphère	3
I.3. Pollution atmosphérique	3
I.3.1. Différents types de la pollution atmosphérique	4
I.3.1.1. Pollution atmosphérique locale	4
I.3.1.2. Pollution atmosphérique régionale	4
I.3.1.3. Pollution atmosphérique globale	5
I.3.2. Principaux polluants atmosphériques et leurs sources	5
I.3.2.1. Polluant primaire	5
I.3.2.1.1. Monoxyde de carbone	5
I.3.2.1.2. Dioxyde de soufre (SO ₂)	5
I.3.2.1.3. Oxydes d'azote (NO et NO ₂)	6
I.3.2.1.4. Particules	6
I.3.2.1.5. Métaux lourds	6

I.3.2.1.6. Hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV)	7
I.3.2.1.7. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	7
I.3.2.1.8. Méthane	7
I.3.2.1.9. L'ammoniac	7
I.3.2.2. Polluant secondaire	7
I.3.3. Particules atmosphériques (PMi)	8
I.3.3.1. Définition des particules atmosphériques	8
I.3.3.2. Classification des particules	8
I.3.3.2.1. Classification des particules selon leurs tailles	8
I.3.3.2.2. Classification des particules selon leurs origines	9
I.3.3.3. Composition des particules atmosphériques	9
I.3.3.2.2.1. Particules d'origine naturelle	9
I.3.3.2.2.2. Particules d'origine anthropique	10
I.4. Influence des facteurs météorologiques sur la concentration et la distribution des particules atmosphérique	11
I.4.1. Influence de la vitesse du vent	12
I.4.2. Influence de la précipitation des pluies	12
I.4.3. Influence de l'humidité	12
I.4.4. Influence de la température	12
I.5. Impact des matières particulières atmosphériques	13
I.5.1. Impact positifs	13
I.5.1.1. Pollinisation par le vent (anémogamie)	13
I.5.2. Impact négatifs	14
I.5.2.1. Effets sur la santé humaine	14
I.5.2.1.1. Effet sur l'appareil respiratoire	14
I.5.2.1.2. Effets sur la grossesse	14
I.5.2.1.3. Effets sur les animaux	14
I.5.2.1.4. Effets sur les végétaux	14
I.5.2.1.5. Effets sur le climat	15
I.5.2.1.6. Effets sur la visibilité	15
I.5.2.1.7. Effets sur l'économie	15
I.5.2.1.8. Effets sur le tourisme	16
I.6. Normes, législation et réglementation sur la qualité de l'air	16

I.6.1. Réglementations algérienne	16
I.6.2. Réglementations Européenne (UE)	17
I.6.3. Réglementations Mondial (OMS)	18
Chapitre II : PROCESSUS METHODOLOGIQUES ET RESULTATS NUMERIQUE DES CONCENTRATIONS DES PMi	
II.1. Suivi des concentrations des particules fines au niveau du Centre Hospitalo Universitaire Mustapha Pacha (CHUMP)	19
II.1.1. Zone et période de mesure	19
II.1.2. Suivi en continu des concentrations des particules fines (PMi) dans un milieu urbain	20
II.2. Approche de modélisation numérique pour la prédiction des concentrations de PMi en fonction des variables météorologiques au CHUMP	24
II.2.1. Collection de la base de données	24
II .2.1.1. Analyse de sensibilité	24
II.2.1.2. Normalisation des données	25
II.2.1.3. Dé-normalisation des données	25
II.2. Etude statistiques des paramètres influençant des concentrations des PMi	25
II.2.2. Modélisation par les Réseaux de Neurone Artificiel (RNA)	27
II.2.2.1. Méthodologie de calcul	27
II.2.2.2. Choix des paramètres de RNA	28
II.2.2.3. Conception de réseau de neurone artificiel	29
II.3. Résultats et discussion	34
II.3.1. Interprétation des résultats	35
II.3.2. Critères de performances statistiques (Analyse et évaluation d'un modèle)	37
II.3.3. Interface graphique d'utilisateur du meilleur modèle	39
Conclusion Générale	41
Partie bibliographique	42
Annex	47

Abréviations

Abréviation	Signification
AERMOD	Modèle de dispersion atmosphérique des polluants
CITEPA	Centre interprofessionnelle technique d'études de la pollution atmosphérique
CM	Conditions météorologiques
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables
CHUMP	Centre-Hospitalo Universitaire Mustapha Pacha
COV	Composé Organique Volatile
ERA	Erreur Relative Absolue
Fidas200®	Fine Dust Aerosol Spectrometer
GES	Gaz à Effet de Serre
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HC	Hydro Carbure
IA	Intelligence Artificiel
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
LACCEI	Latin American and Caribbean consortium of Engineering Institutions
LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
MATLAB	Matrix Labor tory
MAE	Erreur Moyenne Absolue
MAPE	Erreur Moyenne Absolue en Pourcentage
MLP	Multi-Layer Perceptron
MSE	Mean Squared Error
NRMSE	Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne Normalisée
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONM	Office National de la Météorologie
ODD	Objectifs de développement durable
PM	Particulate Matter
QA	Qualité de l'Air
RMSE	Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne
RNA	Réseaux de Neurone Artificiel
RNAo	Réseaux de Neurone Artificiel optimisé.
SMOG	Simple Measure of Gobbledygook
SI	Système International
STD	Standard Deviation
TM	Métaux Traces
TSP	Total Suspended Particulate
UV	Ultra-Violet

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
Figure I.1 : Différentes couches de l'atmosphère	3
Figure II.1 : Implantation du site de mesure NESMA.	20
Figure II.2 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de février 2019.	21
Figure II.3 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de mars 2019.	21
Figure II.4 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois d'avril 2019	22
Figure II.5 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de mai 2019	22
Figure II.6 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de juin 2019	23
Figure II.7 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de juillet 2019	23
Figure II.8 : Répartition des impacts relatifs des variables d'entrée sur le modèle neuronal	25
Figure II.9 : Analyse de corrélation des données d'entrée pour les modèles prédictifs	27
Figure II.10 : Schéma de Principe de calcul des PMi par réseaux de neurones artificiels optimisé.	28
Figure II.11 : la différence en termes d'erreur pour les nombres de neurones dans chaque couche cachée	31
Figure II.12 : Schéma du Réseau de neurones artificiels optimise	32
Figure II.13 : Courbe de régression linéaire de la concentration des PMi calculée par les RNA optimisé avec la concentration des PMi expérimentale pour la phase globale	35
Figure II.14 : Courbe de régression linéaire de la concentration des PMi calculée par les RNA optimisé avec la concentration des PMi expérimentale pour la phase d'apprentissage	36
Figure II.15 : Courbe de régression linéaire de la concentration des PMi calculée par les RNA optimisé avec la concentration des PMi expérimentale pour la phase de test	37
Figure II.16 : Interface graphique d'utilisateur pour le calcul des concentrations des PMi	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
Tableau I.1 : les objectifs de qualité et les valeurs limites pour chaque polluant.	17
Tableau I.2 : Lignes directrices de l’OMS 2021 sur la qualité de l’air.	18
Tableau II.2 : Structure du RNA optimisé	29
Tableau II.3 : Modèle de réseau de neurones établi {(Couche d’entrée – couche cachée1)}	32
Tableau II.4 : Modèle de réseau de neurones établi {(Couche cachée 1 – couche cachée 2)}	33
Tableau II.5 : Modèle de réseau de neurones établi {[Couche cachée 2 – couche sortie]}.	34
Tableau II.6 : Résultats des paramètres statistiques du modèle RNAo développé dans ce travail.	41
Tableau AII.1 : l’ensemble des erreurs de chaque structure	47

INTRODUCTION GENERALE

Les particules fines (PM), classées selon leur taille (PM-1, PM-2.5, PM-4, PM-10, correspondant respectivement à un diamètre aérodynamique $\leq 1, 2.5, 4$ et $10 \mu\text{m}$, ainsi que les PM-Totales), constituent une part significative de la troposphère. Leurs concentrations (PMi) varient rapidement en fonction des conditions météorologiques, notamment les précipitations des pluies, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température [1]. Des études ont démontré que leur composition chimique a un impact majeur sur la santé humaine. Les PM-10 et leurs fractions comptent parmi les particules les plus nocives pour l'environnement et représentent un risque important pour la santé, favorisant des affections cardiorespiratoires chroniques et des troubles pulmonaires aigus (asthme, bronchite, etc.) lors de leur inhalation [2].

Pour surveiller la qualité de l'air (QA), des dispositifs de mesure des particules respirables ont été mis en place afin de prévenir ces risques. Toutefois, la pollution atmosphérique ne se limite pas aux particules. Ainsi, l'observation, la modélisation, la gestion et l'évaluation de ses effets sur la santé et l'environnement sont essentielles pour un développement durable (DD), en particulier en milieu urbain dense[3].

Afin de répondre à ces enjeux, une station NESMA, rattachée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), a été installée au centre universitaire Mustapha Pacha (Alger) [4]. Bien que cette méthode de suivi des polluants soit efficace, elle reste coûteuse en raison du prix élevé des équipements, de leur maintenance et des conditions strictes requises pour des résultats précis. Pour contourner ces contraintes, des approches numériques ont émergé, permettant de modéliser, estimer et prédire la pollution. Parmi elles, la modélisation des données PMi issues de la station NESMA vise à établir un modèle mathématique prédictif liant les concentrations de PMi aux conditions météorologiques (CM), avec un faible coût, une marge d'erreur acceptable et un temps de traitement réduit [5]. Le reste de ce mémoire est organisé comme suit : Chapitre 1 : représente une généralité sur la dispersion des particules fines atmosphériques. Chapitre 2 : il est consacré à la méthodologie et les résultats expérimentale et numérique. Et enfin une conclusion et perspectives.

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA DISPERSION DES PARTICULES FINES ATMOSPHERIQUES

I.1. Introduction

Les particules fines comme les PM_{2.5} et PM₁₀ sont de minuscules polluants présents dans l'air. Invisibles à l'œil nu, elles peuvent pourtant avoir un impact important sur la santé, en particulier sur le système respiratoire. Elles proviennent de sources naturelles comme la poussière, mais aussi d'activités humaines telles que la circulation automobile ou les industries. Une fois dans l'air, elles se déplacent avec le vent, la température et la topographie locale. Cela peut entraîner leur accumulation dans certaines zones, aggravant la pollution de l'air. D'après une étude présentée lors de la conférence LACCEI 2023, l'utilisation de modèles de simulation comme AERMOD permet de mieux comprendre la dispersion de ces particules dans le temps et l'espace, ce qui est essentiel pour la santé publique et la gestion environnementale [6].

I.2. L'atmosphère de la terre et sa composition

L'atmosphère est une enveloppe gazeuse d'environ 500 km d'épaisseur, relativement fine par rapport au rayon de la Terre, qui mesure environ 6 500 km. Elle est maintenue à la surface de la planète par la gravité. L'atmosphère terrestre est un mélange de gaz, principalement composé de diazote (N₂, 78 %) et de dioxygène (O₂, 21 %), ainsi que de quelques gaz en très faibles quantités, comme le dioxyde de carbone (CO₂, 0,038 %) et les gaz rares tels que l'argon (Ar, 1 %). Elle contient également des traces d'hélium, d'hydrogène, de néon, de krypton, de xénon, d'ozone et de méthane.

Les basses couches de l'atmosphère contiennent de la vapeur d'eau, dont la concentration varie entre 0 et 4 % en volume, jouant un rôle essentiel dans la formation des nuages. La basse atmosphère renferme aussi des constituants mineurs comme les poussières et les aérosols, qui ont une influence importante sur la condensation de l'eau, la formation des nuages et l'absorption ainsi que la réflexion du rayonnement solaire.

La composition chimique de l'atmosphère est restée relativement stable pendant environ 500 millions d'années. Cependant, depuis un siècle, elle évolue beaucoup plus rapidement sous l'effet des activités humaines [2,3].

I.2.1. Couches atmosphériques : ordre et caractéristiques

L'atmosphère terrestre est divisée en cinq couches (figure I.1). Chaque couche est caractérisée par un gradient de température différent en fonction de l'altitude [7].

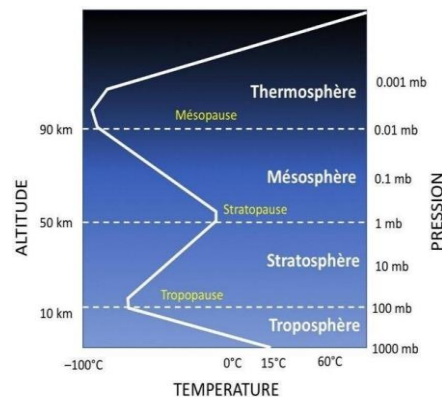


Figure I.1 : Différentes couches de l'atmosphère [7].

I.2.1.1. Troposphère

La troposphère (entre 0 et environ 15 km) est la première couche au-dessus de la surface de la terre et contient environ 85 à 90% de la masse totale de l'atmosphère de la terre. Elle se manifeste par une diminution de la température à mesure que l'altitude augmente. Le profil thermique de la troposphère résulte en grande partie du réchauffement de la surface de la terre par le rayonnement solaire. La chaleur est ensuite transférée dans la troposphère par une combinaison de transfert convectif et turbulent [7].

I.2.1.2. Stratosphère

Dans la stratosphère (environ 15 à 50 km), la température augmente en fonction de la hauteur. Ce réchauffement résulte de l'absorption directe du rayonnement solaire par la couche d'ozone, empêchant ainsi une grande partie du rayonnement ultraviolet nocif du soleil [7].

I.2.1.3. Mésosphère

La mésosphère, c'est une couche qui s'étend de 55 à 80 km, est caractérisée par des températures décroissantes avec une altitude croissante, atteignant environ 180 K à 80 km. Par rapport aux régions inférieures, les concentrations d'ozone et de vapeur d'eau dans la mésosphère sont négligeables, d'où les températures plus basses. Sa composition chimique est assez uniforme. Les pressions sont très faibles [7].

I.2.1.4. Thermosphère

Ensuite, la thermosphère s'installe là où les températures augmentent régulièrement avec l'altitude. C'est la couche de l'atmosphère qui est exposée pour la première fois au rayonnement solaire. La thermosphère comprend également l'ionosphère [7].

I.2.1.5. Exosphère

La limite supérieure de l'atmosphère terrestre est l'exosphère où l'atmosphère se confond avec l'espace. [7]

I.3. La pollution atmosphérique

La pollution de l'air est la contamination des environnements intérieurs ou extérieurs par tout agent chimique, physique ou biologique qui altère les caractéristiques naturelles de l'atmosphère.

Les principales sources de pollution atmosphérique incluent les appareils de combustion domestique, les véhicules à moteur, les installations industrielles et les incendies des forêts. Parmi les polluants les plus préoccupants pour la santé publique, on retrouve les particules en suspension (PM), le monoxyde de carbone, l'ozone, le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre. La pollution de l'air, qu'elle soit extérieure ou intérieure, est responsable de nombreuses maladies respiratoires et autres pathologies, constituant ainsi une cause majeure de morbidité et de mortalité.

La qualité de l'air est étroitement liée au climat et aux écosystèmes terrestres à l'échelle mondiale. De nombreux facteurs responsables de la pollution atmosphérique, comme la combustion des combustibles fossiles, sont également des sources d'émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les politiques visant à réduire la pollution de l'air offrent un double avantage pour le climat et la santé, en diminuant la charge de morbidité liée à la pollution tout en contribuant à l'atténuation des changements climatiques à court et à long terme [9].

I.3.1. Les différents types de la pollution atmosphérique

I.3.1.1. La pollution atmosphérique locale

La première forme de pollution atmosphérique provient de sources proches, telles que les installations industrielles ou les véhicules. Les polluants les plus caractéristiques de cette échelle d'impact sont :

- les particules PM (Particulate Matter), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les métaux [10,11].

I.3.1.2. La pollution atmosphérique régionale

La seconde forme de pollution résulte de phénomènes physico-chimiques plus ou moins complexes, conduisant à la formation de polluants dits « secondaires » dans l'atmosphère à partir de polluants dits « primaires ». Un exemple important de ces polluants « secondaires » est l'ozone (O₃).

Cette forme de pollution est qualifiée de « régionale » car elle affecte un territoire étendu, tel que l'ensemble du Bassin parisien [10,11].

1.3.1.3. La pollution atmosphérique globale

La dernière forme de pollution concerne les substances impliquées dans les phénomènes de **changements climatiques**, notamment les « gaz à effet de serre », en particulier le dioxyde de carbone (CO₂).

La réglementation établit, pour certains indicateurs de pollution, des concentrations de référence afin d'orienter l'action des pouvoirs publics [10,11].

1.3.2. Les principaux polluants atmosphériques et leurs sources

La pollution résulte du rejet de substances nocives dans l'environnement, affectant la santé humaine et les écosystèmes. Les polluants se divisent en deux catégories : les polluants primaires, émis directement, et les polluants secondaires, formés par des réactions chimiques dans l'atmosphère [9].

1.3.2.1. Les polluants primaires

Les polluants primaires sont principalement émis dans l'atmosphère. Ils sont issus des sources de pollution comme le trafic routier, les industries, le chauffage et l'agriculture, etc.

Il s'agit par exemple : des oxydes de carbone, des oxydes de soufre, des oxydes d'azote, des hydrocarbures légers, des composés organiques volatils (COV), des particules (PM₁₀ et PM_{2.5}), des métaux lourds (plomb, mercure, cadmium...) [12,8,9,15].

1.3.2.1.1. Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz toxique, incolore et inodore, considéré comme l'une des principales causes d'intoxication dans le monde. Il résulte d'une combustion incomplète de matières organiques, notamment dans les appareils de chauffage défectueux ou les gaz d'échappement des véhicules. Sa dangerosité réside dans sa forte affinité pour l'hémoglobine, ce qui empêche le transport de l'oxygène vers les tissus et provoque une hypoxie cellulaire. Les symptômes de l'intoxication incluent des maux de tête, des vertiges et des troubles cardiaques, pouvant aller jusqu'à la perte de connaissance ou la mort dans les cas graves. Cette intoxication constitue une urgence médicale à court terme [16,17].

1.3.2.1.2. Le dioxyde de soufre (SO₂)

Le dioxyde de soufre (SO_2) est un gaz acide, irritant et soluble dans l'eau, émis principalement lors de la combustion des combustibles fossiles comme le charbon et le pétrole, qui contiennent des impuretés soufrées. Ce gaz est également produit par des activités industrielles et la métallurgie, tandis que l'activité volcanique en constitue une source naturelle. Lors de la combustion, le soufre contenu dans les combustibles est oxydé en SO_2 . Son inhalation provoque une irritation des muqueuses nasales et oculaires, et peut aggraver les maladies respiratoires, notamment chez les personnes sensibles comme les asthmatiques.

Sur le plan environnemental, le SO_2 ralentit la croissance végétale, acidifie les sols et contribue à des phénomènes tels que les pluies acides et le SMOG. Il détériore également le patrimoine bâti par son agressivité chimique. La mesure de sa concentration repose sur la fluorescence UV, et les normes de la directive européenne 2008/50/CE imposent des seuils stricts : $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur une heure (24 fois par an), $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24 heures (3 fois par an), et un seuil d'alerte de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant trois heures consécutives [17,18].

I.3.2.1.3. Les oxydes d'azote (NO_x et NO_2)

Les oxydes d'azote sont produits lors de la combustion dans les moteurs et chaudières. Le dioxyde d'azote est le plus nocif pour la santé humaine. Il irrite les voies respiratoires et favorise l'hyperréactivité bronchique, touchant particulièrement les enfants et les personnes asthmatiques. Ils contribuent également à la formation de polluants photochimiques tels que l'ozone et participent aux phénomènes de pluies acides [17].

I.3.2.1.4. Les particules

Issues principalement des combustions et des réactions chimiques atmosphériques, les particules d'un diamètre inférieur à 10 micromètres (PM_{10}) sont inhalables, tandis que les particules inférieures à 2,5 micromètres ($\text{PM}_{2.5}$) pénètrent plus profondément dans les poumons. Leur toxicité dépend de leur composition chimique, pouvant contenir des métaux lourds ou des hydrocarbures aromatiques polycycliques cancérogènes [17].

I.3.2.1.5. Les métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments naturels présents dans les roches et les sols. Les formations géologiques riches en métaux contribuent à la contamination des eaux, mais les principales sources de pollution proviennent des activités humaines, notamment industrielles, telles que l'exploitation minière, les anciennes industries ou encore les activités industrielles actuelles. Les éléments métalliques surveillés comprennent le fer, le chrome, le zinc et le nickel.

Parmi les métaux lourds, on trouve notamment le plomb (Pb), le mercure (Hg), l'arsenic (As), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni). Dans l'atmosphère, ils se présentent généralement sous forme

particulaire, à l'exception du mercure qui se trouve majoritairement sous forme gazeuse. Leurs sources incluent la combustion, les procédés industriels et l'incinération des déchets. Une fois inhalés ou absorbés, ces éléments peuvent s'accumuler dans l'organisme humain et entraîner des effets toxiques graves tels que des atteintes neurologiques, rénales ou hépatiques [19, 20, 21, 17, 22].

I.3.2.1.6. Les composés organiques volatils (COV)

Les composés organiques volatils (COV) sont des composés organiques ayant une pression de vapeur égale ou supérieure à 0,01 kilopascal à une température de 293,15 K (20 °C), ou présentant une volatilité équivalente dans des conditions d'utilisation particulières. Les COV sont émis par diverses sources telles que les solvants industriels et domestiques, les industries pétrochimiques et les gaz d'échappement des véhicules. Ils ont des effets néfastes sur la qualité de l'air et la santé humaine, provoquant des odeurs désagréables, des troubles respiratoires et neurologiques. Certains, comme le benzène et le formaldéhyde, sont classés comme cancérogènes. De plus, les COV contribuent à la formation de polluants photochimiques tels que l'ozone troposphérique, nocif pour l'environnement et la santé [23, 17].

I.3.2.1.7. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés organiques constitués d'au moins deux noyaux benzéniques. Ils sont principalement formés lors de la pyrolyse (décomposition thermique) et de la pyrosynthèse (recombinaison thermique) issues de la combustion incomplète de matières organiques telles que les combustibles fossiles ou d'autres substances riches en carbone et en hydrogène. Bien que leur origine soit surtout anthropique, les HAP peuvent également être générés naturellement, notamment lors des feux de forêts ou d'éruptions volcaniques [17, 24, 25].

I.3.2.1.8. Le méthane

Le méthane est considéré comme un gaz à effet de serre important. Il se forme dans les sols à la suite de la décomposition de la matière organique en conditions anaérobies (en absence d'oxygène). Dans un tel environnement, le méthane est très stable, mais en présence d'oxygène, il est transformé en dioxyde de carbone par des bactéries appelées méthanotrophes [26].

I.3.2.1.9. L'ammoniac (NH₃)

Principalement émis par les élevages agricoles via les lisiers, l'ammoniac est malodorant et irritant le système respiratoire à fortes concentrations. Dans l'air, il contribue à la formation de particules fines (nitrate d'ammonium) et à l'acidification ainsi qu'à l'eutrophisation des écosystèmes [17].

I.3.2.2. Les polluants secondaires

Les polluants secondaires ne sont pas directement rejetés dans l'atmosphère, mais ils proviennent de réactions chimiques de gaz entre eux. C'est le cas notamment de : l'ozone (O_3), dioxyde d'azote...

Certains polluants comme le dioxyde d'azote et les particules sont à la fois des polluants primaires et secondaires [12,13,14,15].

I.3.3. Les particules atmosphériques (PMi)

I.3.3.1. Définition des particules atmosphériques

Les particules atmosphériques sont constituées d'un mélange de composés chimiques organiques ou inorganiques, ainsi que de minéraux en suspension dans l'air, et elles varient en taille. Elles proviennent de multiples sources : elles peuvent être émises directement dans l'air, on les appelle alors particules primaires ou fraction filtrable. Elles peuvent également résulter de réactions chimiques complexes entre des gaz précurseurs dans l'atmosphère, comme l'ammoniac et les oxydes d'azote, et sont alors qualifiées de particules secondaires ou fraction condensable. Dans l'air ambiant, on retrouve à la fois des particules primaires et secondaires.

Les particules sont classées selon leur diamètre aérodynamique :

- Les particules totales en suspension (TSP : Total Suspended Particles), qui regroupent toutes les particules présentes dans l'air, quelle que soit leur taille,
- Les PM₁₀, dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 10 microns,
- Les PM_{2.5}, dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns,
- Les particules ultrafines (PUF), dont le diamètre est inférieur à 0,1 micron.

Les particules dont le diamètre est compris entre 2,5 et 10 microns sont appelées particules grossières. Les PM_{2.5} sont considérées comme des particules fines, et incluent également les particules ultrafines. Ainsi, les PM regroupent l'ensemble des particules grossières, fines et ultrafines [27,28].

I.3.3.2. Classification des particules

I.3.3.2.1. Classification des particules selon leurs tailles

Les particules présentes dans l'air sont classées selon leur diamètre aérodynamique, en raison de la diversité de leurs sources et de leurs effets sur la santé. Leur taille varie de quelques fractions de nanomètre à plus de 100 micromètres, ce qui en fait l'un des constituants les plus complexes de l'atmosphère. On distingue généralement deux grandes catégories : les particules grossières (PM₁₀

- 2,5), dont le diamètre est compris entre 2,5 et 10 μm , et les particules fines ($\text{PM}_{2,5}$), de diamètre inférieur à 2,5 μm .

Parmi les principales fractions granulométriques utilisées en métrologie atmosphérique, on trouve :

- TSP (Total Suspended Particles) : toutes les particules en suspension, généralement de diamètre inférieur à 30 - 40 μm .
- PM_{10} : particules inhalables pouvant pénétrer dans les voies respiratoires supérieures.
- $\text{PM}_{2,5}$: particules respirables capables d'atteindre les alvéoles pulmonaires, associées à des effets sanitaires graves (maladies cardiovasculaires, respiratoires, etc.).
- PM_1 : particules très fines qui échappent souvent aux systèmes de filtration et se déposent de façon irréversible dans les alvéoles pulmonaires.

La mesure des particules peut être réalisée soit par échantillonnage de l'air, soit par observation directe, en supposant que les particules sont sphériques [29,30].

I.3.3.2.2. Classification des particules selon leurs origines

Pour mieux comprendre et maîtriser la pollution de l'air, il est essentiel d'identifier précisément les sources de pollution. Cette connaissance est indispensable pour la mise en œuvre de mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions constituent également une base essentielle pour l'évaluation de la qualité de l'air et l'estimation des impacts de cette pollution sur la santé humaine et les écosystèmes [30].

I.3.3.2.2.1. Les particules d'origine naturelle

Les particules d'origine naturelle (aérosols primaires) se divisent en quatre sources principales :

- **Source terrigène** : les particules sont générées par l'érosion des sols sous l'effet du vent, en particulier dans les zones désertiques.
- **Source marine** : les embruns marins sont formés par les gouttelettes d'eau de mer projetées dans l'atmosphère par l'action des vagues. Les sels marins peuvent représenter plus de 80 % de la masse annuelle moyenne des PM_{10} . Ces aérosols sont composés d'un mélange de sels inorganiques et de matières organiques, dont le principal composant est le chlorure de sodium (NaCl).
- **Source biologique** : les aérosols biogéniques proviennent des émissions directes des plantes telles que les hydrocarbures lourds, le pollen, les spores, les débris végétaux, les fragments d'insectes, les poils cassés, etc... Ces aérosols influencent non seulement la santé publique et la qualité de l'air, mais aussi les propriétés physico-chimiques de l'atmosphère,

et jouent un rôle crucial dans les processus atmosphériques comme la formation de la glace et la condensation des nuages.

- **Source des feux de végétation** : les incendies naturels, notamment les feux de forêt en période estivale dans les zones au climat sec comme l'Algérie, ont un impact significatif sur la concentration de particules dans l'atmosphère. Par exemple, entre 1985 et 2010, 42555 feux ont détruit environ 910640 hectares en Algérie [30].

I.3.3.2.2. Les particules d'origine anthropique

La quasi-totalité des activités humaines constitue une source de pollution atmosphérique, sous forme de gaz ou de particules solides (poussières ou fumées).

- **Les aérosols industriels**

Les émissions industrielles comprennent des polluants atmosphériques régionaux (NH_3 , NO_x , PM_{10} , SO_2 , COVNM), des métaux lourds (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni), des micropolluants organiques (benzène, HAP, dioxines et furanes), ainsi que du monoxyde de carbone (CO). Certaines activités industrielles, telles que l'industrie minérale ou les centrales thermiques, émettent d'importantes quantités de particules et de gaz précurseurs comme le SO_2 et les hydrocarbures. Par exemple, aux États-Unis, les centrales électriques sont responsables de 78 % des émissions de SO_2 [25].

- **Le transport**

La pollution liée au transport considérée comme un problème local affectant les zones urbaines à forte densité de trafic. Aujourd'hui, il est établi que les transports, notamment routiers, représentent une source majeure de pollution. Les moteurs à combustion sont la principale cause d'émission d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures. Les moteurs diesel, bien que moins émetteurs d'hydrocarbures, sont en revanche de grands producteurs de particules et de dioxyde de soufre. Malgré les progrès technologiques récents, la pollution due au transport continue d'augmenter avec la croissance du trafic [25].

- **L'agriculture**

Le secteur agricole contribue également aux émissions de particules primaires et de gaz précurseurs tels que NH_3 , NO_x , COV et SO_x . Les activités agricoles comme la récolte et la gestion des résidus sont identifiées comme sources majeures d'émissions. Selon le centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), l'agriculture était

responsable en 2010 de 48 % des émissions de particules totales en suspension (TSP), 19 % des émissions nationales de PM₁₀, et 10 % de celles de PM_{2.5} en France [25].

- **Les déchets**

Les déchets, qu'ils soient enfouis ou incinérés, représentent l'une des sources majeures de pollution. Leur décomposition produit plusieurs polluants, notamment le méthane, l'acide chlorhydrique, les métaux lourds, les dioxines et les furanes [30].

I.3.3.3. Composition des particules atmosphériques

La composition chimique des particules en suspension dans l'air est l'une de leurs principales caractéristiques, déterminant leur comportement et leurs effets dans l'atmosphère. Cette composition varie en fonction de l'origine des particules, des réactions physico-chimiques qu'elles subissent dans l'air, ainsi que de leur taille.

Les sources des particules peuvent être naturelles (marines, crustales, biogènes) ou anthropiques (transports, activités industrielles, processus de combustion, etc.). Les principaux composants de ces particules incluent : les ions de sulfate, nitrate et ammonium, les éléments minéraux provenant de la croûte terrestre, les composés carbonés organiques et inorganiques, l'eau, ainsi que la fraction biologique. Des espèces à l'état de trace comme les métaux lourds peuvent également être présentes.

La fraction biologique des particules atmosphériques comprend des bactéries, champignons, virus et grains de pollen.

On trouve également :

- ✓ Des sels minéraux et composés inorganiques tels que le carbonate de calcium et le chlorure de sodium, issus de l'érosion naturelle ou de la remise en suspension des poussières (poussières désertiques, embruns marins, activités de chantier, etc.).
- ✓ Des composés inorganiques secondaires, tels que les sulfates et les nitrates, formés dans l'atmosphère à partir de réactions impliquant l'ammoniac et des acides (sulfurique et nitrique), eux-mêmes issus de l'oxydation du soufre et de l'azote.
- ✓ Des métaux provenant d'activités industrielles, de phénomènes d'abrasion (freinage, usure des routes) ou encore de la combustion (chauffage, incinération...).
- ✓ Des composés carbonés, formant l'aérosol carboné, composé d'une fraction organique (OC) – primaire ou secondaire – constituée de centaines de composés organiques, et d'une fraction de carbone noir ou élémentaire (black carbon – BC ou carbone élémentaire EC), généralement d'origine primaire.

En milieu urbain, la fraction organique représente environ 5 à 20 % de la masse totale des particules. Ces milieux sont également plus riches en carbone élémentaire et en nitrates issus de la transformation des oxydes d'azote (NOx) [27].

I.4. L'influence des facteurs météorologiques sur la concentration et la distribution des particules atmosphérique

Les particules atmosphériques, ou **particules en suspension (PM)**, sont des solides ou liquides très fins présents dans l'air, comme les poussières, suies, pollens, ou aérosols. Leur concentration et leur dispersion dans l'atmosphère dépendent fortement des conditions météorologiques [31].

I.4.1. Influence de la vitesse du vent

Dans les villes modernes, la poussière atmosphérique provient principalement de trois types de sources : les sources ponctuelles (comme les cheminées industrielles), les sources linéaires (telles que les axes routiers très fréquentés), et les sources diffuses ou locales (comme les zones industrielles ou de construction). Parmi les différents mécanismes de dispersion des polluants, le vent constitue le vecteur le plus important, jouant un rôle central dans leur propagation à travers l'espace urbain [31].

L'impression courante selon laquelle le vent est toujours porteur de poussière reflète un cas particulier : celui où le vent soulève les particules présentes à la surface du sol. En réalité, cette vision est réductrice. Les aérosols atmosphériques dont la taille et la masse sont extrêmement faibles interagissent étroitement avec les mouvements de l'air. En raison de leur faible inertie, ces particules fines ou gouttelettes s'ajustent rapidement à la dynamique du vent, ce qui facilite leur dispersion sur de longues distances [31].

I.4.2. Influence de la précipitation des pluies

Les précipitations jouent un rôle crucial dans la régulation des concentrations de particules atmosphériques (PM). Lorsqu'il pleut, les particules en suspension dans l'air sont éliminées principalement par un processus appelé lessivage humide. Ce mécanisme implique la capture des particules par les gouttes de pluie, soit par collision en cours de chute, soit par incorporation dans les nuages avant la précipitation [31].

I.4.3. Influence de l'humidité

Il est généralement admis que les poussières atmosphériques sont constituées à la fois de particules solides et liquides en suspension dans l'air. Parmi celles-ci, les particules fines, considérées comme des poussières permanentes, jouent un rôle particulier en tant que noyaux de condensation.

Tant l'humidité relative que l'humidité absolue influencent la concentration des poussières atmosphériques. Toutefois, en l'absence de preuves scientifiques concluantes sur laquelle de ces deux formes d'humidité exerce l'effet le plus déterminant, certaines analyses de mesures suggèrent que l'humidité relative aurait une influence plus significative. Cette hypothèse repose sur le fait qu'une humidité relative élevée favorise l'activation et la croissance des noyaux de condensation, ce qui augmente leur masse volumique et facilite leur précipitation hors de l'atmosphère [32].

I.4.4. Influence de la température

Au cours de la journée, l'augmentation de la température provoque des mouvements convectifs d'origine thermique et une turbulence mécanique accrue, provoquant une instabilité de l'air au sein de la couche limite atmosphérique. L'air instable permet la dispersion verticale des particules, tendant à les diluer dans les couches supérieures. Par conséquent, il est possible de dire que l'augmentation de la température est un autre facteur de diffusion des particules atmosphériques, car leur concentration diminue près de la surface [33].

I.5. Impact des matières particulaires atmosphériques

Accompagnée d'une croissance démographique rapide, l'urbanisation intense et l'industrialisation soutenue ont conduit à une augmentation significative des concentrations de matières particulaires dans l'atmosphère. Les particules fines (PM_{2.5}) et ultrafines (PM_{1.0}) sont particulièrement préoccupantes en raison de leur capacité à pénétrer profondément dans les voies respiratoires, provoquant une variété d'effets indésirables sur la santé humaine. Plusieurs études ont établi une corrélation directe entre l'exposition prolongée aux particules fines et l'incidence accrue de maladies respiratoires chroniques, de troubles cardiovasculaires et de mortalité prématurée. Sur le plan environnemental, les particules atmosphériques contribuent de manière significative à la dégradation de la qualité de l'air et à la réduction de la visibilité, notamment dans les zones urbaines densément peuplées. En plus de leur impact direct, elles interagissent avec les rayonnements solaires, influençant ainsi le bilan énergétique de l'atmosphère et perturbant les cycles climatiques régionaux. Par exemple, le carbone noir, un composant majeur des PM, absorbe la chaleur solaire, ce qui peut entraîner un réchauffement localisé, tandis que les aérosols sulfatés ont plutôt un effet refroidissant en réfléchissant la lumière. Il est également important de noter que la dynamique atmosphérique joue un rôle essentiel dans la dispersion, l'accumulation et la transformation chimique des aérosols. Des facteurs tels que la température, l'humidité relative, la stabilité de l'air et la circulation des vents influencent fortement la concentration de particules dans l'air. Toutefois, cette relation est bidirectionnelle : les particules atmosphériques peuvent, à leur tour, modifier les conditions météorologiques locales, notamment par leur effet sur la formation des nuages et les précipitations. En raison de cette interaction complexe entre les émissions

anthropiques, les conditions météorologiques et les rétroactions climatiques, la pollution par les aérosols représente aujourd'hui un enjeu environnemental majeur, nécessitant une compréhension approfondie de ses mécanismes physiques et chimiques, ainsi qu'une politique de gestion rigoureuse à l'échelle mondiale [34,35,36,37,38,39,40].

I.5.1. Impact positifs

I.5.1.1. Pollinisation par le vent (anémogamie)

La pollinisation représente une étape cruciale dans le cycle de reproduction sexuée des plantes à fleurs, permettant la fécondation et la formation des graines. Elle implique la libération du pollen par les anthères, son transfert jusqu'au stigmate, puis la progression des noyaux spermatiques vers les ovules [41]

I.5.2. Impact négatifs

I.5.2.1. Effets sur la santé humaine

I.5.2.1.1. Effet sur l'appareil respiratoire

Du point de vue de la santé respiratoire, de nombreuses études en particulier celles menées aux États-Unis ont mis en évidence une corrélation entre l'exposition chronique aux particules fines atmosphériques (notamment les PM_{2.5}) et une augmentation du risque de maladies respiratoires, y compris des tumeurs du système respiratoire. Il a été démontré que chaque élévation de 10 µg/m³ de la concentration moyenne de PM_{2.5} dans l'air ambiant est associée à une hausse de 15 à 21 % des cas de cancer du poumon. En outre, cette exposition a également des répercussions à court terme, contribuant à une augmentation de la mortalité d'origine respiratoire [42].

I.5.2.1.2. Effets sur la grossesse

A partir de l'analyse de 25 études répondant aux critères d'éligibilité, les résultats synthétisés indiquent une association significative entre l'exposition maternelle aux particules fines (PM_{2.5}) durant la grossesse et des issues périnatales défavorables, telles que les variations du poids à la naissance, le faible poids de naissance, la prématurité et la mortinatalité. Ces conclusions mettent en évidence la nécessité pour les femmes enceintes d'adopter des stratégies efficaces visant à limiter leur exposition aux PM_{2.5} [43].

I.5.2.1.3. Effets sur les animaux

La concentration en particules fines (PM) a été associée à diverses manifestations cliniques de pathologies pulmonaires et cardiovasculaires, ainsi qu'à une morbidité et une mortalité accrues liées aux maladies respiratoires, tant chez l'humain que chez l'animal. La taille et la composition des PM influencent les effets cliniques et toxicologiques observés, comme l'ont démontré plusieurs études in

vivo et in vitro menées sur des modèles animaux. Une fois inhalées sous forme d'aérosols, ces particules peuvent altérer plusieurs fonctions biologiques, notamment la production de cytokines ainsi que les fonctions pulmonaires et cardiaques [44].

I.5.2.1.4. Effets sur les végétaux

La pollution atmosphérique par les particules en suspension (PM) et la contamination des sols par les métaux traces (TM) représentent deux problématiques environnementales étroitement liées, ayant des effets délétères sur les écosystèmes et la santé humaine, notamment au cours de la dernière décennie marquée par une urbanisation et une industrialisation rapide. Étant donné que les PM constituent un vecteur potentiel de TM, une approche intégrée de la relation air-sol s'avère essentielle. Bien que les émissions de PM et de TM soient principalement concentrées dans les zones urbaines et industrielles, leur transport sur de longues distances permet leur dispersion jusqu'à des régions rurales ou montagneuses isolées. Une fois déposées par voie sèche ou humide, ces particules participent aux cycles biogéochimiques des TM dans divers systèmes sol-plante, incluant les arbres urbains, les cultures agricoles, ainsi que les écosystèmes forestiers naturels en milieu montagnard. En plus de l'absorption racinaire bien documentée, la voie foliaire – par dépôt et absorption via les feuilles – joue également un rôle important dans l'accumulation de TM par les plantes, exposant ainsi l'homme à des risques sanitaires liés à des effets phytotoxiques, tels que la nécrose induite par les particules contaminantes [45].

I.5.2.1.5. Effets sur le climat

La pollution atmosphérique par les particules fines (PM_{2.5}) est étroitement liée au changement climatique à plusieurs niveaux. En tant qu'aérosols, ces particules possèdent un effet de refroidissement sur le climat en interagissant avec le rayonnement solaire et en influençant la formation des nuages. Le changement climatique, quant à lui, désigne une modification de l'état du climat, attribuable à la fois à la variabilité naturelle et aux activités anthropiques. Ses principaux indicateurs comprennent les concentrations de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols, les modifications de la couverture terrestre, ainsi que les changements dans le bilan radiatif de la Terre. Selon différents scénarios d'émission, la température moyenne mondiale pourrait augmenter de 1,8 à 4,0 °C entre les périodes de référence 1980–1999 et la fin du XXI^e siècle [46].

I.5.2.1.6. Effets sur la visibilité

De nombreuses études ont été menées à l'échelle mondiale, non seulement pour évaluer les bénéfices sanitaires liés à la réduction de la pollution atmosphérique, mais également pour approfondir la compréhension scientifique et technique des mécanismes par lesquels les polluants atmosphériques altèrent la visibilité. Il est établi que la détérioration de la visibilité peut résulter, de manière directe

ou indirecte, des émissions de particules, en particulier des particules fines (PM), qui en sont les principaux contributeurs. Cette dégradation constitue une forme perceptible de pollution de l'air, identifiable sans recours à des instruments spécialisés. Elle représente aujourd'hui un enjeu majeur dans de nombreuses mégapoles à travers le monde, tant du point de vue environnemental que sanitaire [47].

I.5.2.1.7. Effets sur l'économie

Les particules fines constituent potentiellement le polluant atmosphérique le plus préoccupant dans les environnements urbains. Les pathologies associées à la pollution de l'air engendrent des pertes significatives, tant sur le plan économique que sur celui du bien-être humain. Une amélioration de la qualité de l'air, par la réduction des concentrations de polluants, contribuerait à une amélioration de l'état de santé de la population. Cela se traduirait notamment par une diminution de l'absentéisme au travail lié à des problèmes de santé, ainsi que par une réduction des dépenses liées à l'assurance maladie [48].

I.5.2.1.8. Effets sur le tourisme

L'impact des aérosols atmosphériques sur les secteurs économiques, en particulier ceux influencés par les comportements et les activités humaines, demeure relativement peu exploré. Le secteur du tourisme, pourtant essentiel, illustre clairement cette lacune. Il apparaît que les particules fines atmosphériques sont perçues par les touristes comme un risque potentiel pour la santé ou comme un facteur réduisant l'agrément de leur expérience, ce qui peut les amener à modifier leurs projets de voyage. Les données issues de la littérature suggèrent que, face à des niveaux élevés de pollution particulaire, tant les touristes que les résidents sont susceptibles d'ajuster leurs itinéraires, de modifier leurs horaires, voire de renoncer à sortir. Ce type de réponse comportementale a des répercussions sur les activités de consommation et peut entraîner des pertes économiques notables dans les zones concernées [49].

I.6. Normes, législation et réglementation sur la qualité de l'air

En raison de la dangerosité des polluants atmosphériques et de leur impact direct sur la santé humaine, la surveillance de la qualité de l'air est devenue une priorité mondiale. Cette surveillance peut être réalisée selon deux approches complémentaires : des méthodes expérimentales, fondées sur des capteurs et des stations de mesure, et des approches numériques, incluant des modèles prédictifs utilisant l'intelligence artificielle.

En France, par exemple, la coordination est assurée par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA), composé notamment de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), en charge de l'expertise scientifique et technique [50].

I.6.1. Les réglementations algériennes

Dans le but de protéger la santé publique et de préserver l'environnement face à l'augmentation des émissions polluantes, l'Algérie a mis en place un cadre réglementaire visant à encadrer la surveillance de la qualité de l'air. Ce cadre est notamment défini par le décret exécutif n°06-02 du 7 janvier 2006, qui établit les valeurs limites, les seuils d'alerte, les seuils d'information, ainsi que les objectifs de qualité applicables en cas de pollution atmosphérique.

a. Substances surveillées

Selon l'article 3 de ce décret, la surveillance porte spécifiquement sur les polluants atmosphériques suivants :

- Le dioxyde d'azote (NO₂)
- Le dioxyde de soufre (SO₂)
- L'ozone (O₃)
- Les particules fines en suspension

b. Objectifs de qualité de l'air et valeurs limites

Les objectifs de qualité correspondent aux concentrations à atteindre pour garantir une bonne qualité de l'air, tandis que les valeurs limites fixent les concentrations maximales admissibles, sur une base de moyenne annuelle :

Tableau I.1 : les objectifs de qualité et les valeurs limites pour chaque polluant.

Polluant	Objectif de qualité (µg/Nm ³)	Valeurs limites (µg/Nm ³)
Dioxyde d'azote (NO ₂)	135	200 (centile 98)
Dioxyde de soufre (SO ₂)	150	350 (centile 99,9)
Ozone (O ₃)	110	200
Particules en suspension	50	80

I.6.2. Les réglementations Européenne (UE)

Les lignes directrices de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sur la qualité de l'air constituent une référence scientifique internationale visant à protéger la santé humaine contre les effets néfastes de la pollution atmosphérique. Mise à jour en 2021, cette réglementation recommande des seuils beaucoup plus stricts pour les principaux polluants, tels que les particules fines (PM_{2.5}), le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone troposphérique (O₃). Bien que non

contraignantes, ces recommandations influencent de nombreuses politiques nationales et internationales, notamment dans le cadre des Objectifs de développement durable (ODD). Elles soulignent également l'urgence d'agir, notamment dans les pays à revenu faible ou intermédiaire, où la pollution de l'air constitue un enjeu majeur de santé publique [51].

La mésosphère, c'est une couche qui s'étend de 55 à 80 km, est caractérisée par des températures décroissantes avec une altitude croissante, atteignant environ 180 K à 80 km. Par rapport aux régions inférieures, les concentrations d'ozone et de vapeur d'eau dans la mésosphère sont négligeables, d'où les températures plus basses. Sa composition chimique est assez uniforme. Les pressions sont très faibles.

Tableau I.2 : Lignes directrices de l'OMS 2021 sur la qualité de l'air.

Polluant	Valeur guide annuelle OMS (2021)	Effets sur la santé
PM _{2.5}	5 µg/m ³	Maladies respiratoires, cardiovasculaires, AVC
PM ₁₀	15 µg/m ³	Infections pulmonaires, allergies
Dioxyde d'azote (NO ₂)	10 µg/m ³	Irritation des voies respiratoires
Ozone troposphérique (O ₃)	60 µg/m ³ (moyenne sur 8h)	Problèmes respiratoires, asthme
Dioxyde de soufre (SO ₂)	40 µg/m ³ (moyenne sur 24h)	Problèmes respiratoires, inflammation
Monoxyde de carbone (CO)	4 mg/m ³ (moyenne sur 24h)	Réduction de l'apport en oxygène, troubles cardiaques

I.6.3. Les réglementations Mondial (OMS)

En 2025, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) continue de jouer un rôle central dans l'élaboration et la mise à jour des lignes directrices internationales relatives à la qualité de l'air, fondées sur des données scientifiques robustes. Les recommandations publiées en 2021 restent la référence mondiale pour la gestion des polluants atmosphériques, notamment les particules fines (PM_{2.5} et PM₁₀), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone troposphérique (O₃), le dioxyde de soufre (SO₂) et le monoxyde de carbone (CO). Avec des seuils plus stricts, comme une concentration annuelle maximale de 5 µg/m³ pour les PM_{2.5}, l'OMS vise à limiter les effets nocifs de la pollution sur la santé publique, notamment les maladies respiratoires, cardiovasculaires et les accidents vasculaires cérébraux. En 2025, la mise en œuvre de ces recommandations reste un enjeu majeur, en particulier

dans les pays à faibles ressources, où des difficultés subsistent en termes de surveillance, d'infrastructures et d'appui politique. Ces normes s'inscrivent également dans une perspective plus large, contribuant aux objectifs de développement durable (ODD) relatifs à la santé et à la qualité de vie urbaine [51].

CHAPITRE II : PROCESSUS METHODOLOGIQUES ET RESULTATS NUMERIQUE DES CONCENTRATIONS DES PMi

Ce chapitre détaille les méthodes employées pour mesurer et prédire les concentrations des PMi en milieu urbain ainsi que les résultats expérimentale et numérique obtenu via le modèle mathématique élaboré.

II.1. Suivi des concentrations des particules fines au niveau du Centre Hospitalo Universitaire Mustapha Pacha (CHUMP)

Cette partie représente les étapes concernant la partie pratique (collecte de la base des données à travers l'appareil FIDAS® 200) effectuée au niveau du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à Bouzaréah, Alger.

II.1.1. Zone et période de mesure

Le site de mesure de la station d'analyse de la qualité de l'air (NESMA-CDER) est situé au sein du Centre Hospitalo-Universitaire Mustapha Pacha (CHUMP), dans la commune de Sidi M'Hamed, au centre d'Alger (latitude : 36,762130 N ; longitude : 3,053034 E). La capitale (Alger), est la ville la plus peuplée d'Algérie, comptait environ 6,8 millions d'habitants en 2018, selon les données de Geoba (2025). La ville bénéficie d'un climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds, lourds, secs et dégagés, et des hivers longs, frais, venteux et partiellement nuageux. Les températures annuelles oscillent généralement entre 6 °C et 30 °C, avec des extrêmes rarement inférieurs à 2 °C ou supérieurs à 34 °C. Le site de mesure, situé à environ 600 mètres de la mer, bénéficie d'une exposition ouverte sur la mer, ce qui favorise une bonne ventilation naturelle.

Ce site se trouve à proximité de plusieurs sources fixes et mobiles de pollution, notamment les usines situées dans la zone portuaire d'Alger, à environ 2 km, le trafic routier dense à 800 mètres, la gare ferroviaire d'Alger à 1,5 km, ainsi que l'aéroport d'Alger, localisé à environ 10 km du point de mesure.

Les données horaires des fractions conventionnelles de particules (PM₁₀, PM₄, PM_{2.5}, PM₁ et PM-Tot), ainsi que les paramètres météorologiques tels que la température, la pression atmosphérique et l'humidité relative, ont été enregistrés simultanément à l'aide de l'analyseur FIDAS® 200. En revanche, les données relatives à la vitesse du vent et à la précipitation cumulée ont été fournies par l'Office National de la Météorologie (ONM) de Dar El-Beida, Alger (ONM, 2025). La campagne de prélèvement s'est déroulée sur une période de six mois, du 1er février au 28 juillet 2019. Un total de 835 mesures a été collecté pour chaque paramètre étudié.

II.1.2. Suivi en continu des concentrations des particules fines (PMi) dans un milieu urbain

Les données recueillies à l'aide du capteur de particules fines **FIDAS® 200** ont mis en évidence d'importantes fluctuations temporelles des concentrations des différentes fractions de **PMi**. Ces variations sont principalement liées aux conditions météorologiques, qui influencent la dispersion des particules sur le site de mesure. L'analyse des résultats a également montré que les profils d'évolution des différentes fractions présentent des tendances similaires sur l'ensemble de la période étudiée.

L'évolution de la pollution de l'air par les particules (PMi ; i = 1 ; 2,5 ; 4 ; 10 ; Tot) à Alger-centre a été effectuée durant une période allant du 1 Février au 28 Juillet 2019, avec un prélèvement journalier, ce qui a donné 167 mesures pour chaque classe de particules pendant 6 mois. Chaque prélèvement journalier nous a permis d'obtenir 5 classes granulométriques de particules, soit un total de 835 données. Les figures de II.2 à II.7 illustrent l'évolution quotidienne des teneurs atmosphériques en PMi (i= 10 ; 4 ; 2,5 et 1 μ m) ainsi que les PM-totaux (l'ensemble des particules en suspension dans l'air) mesurées pendant les mois de Février, Mars, Avril, Mai, Juin et Juillet 2019.

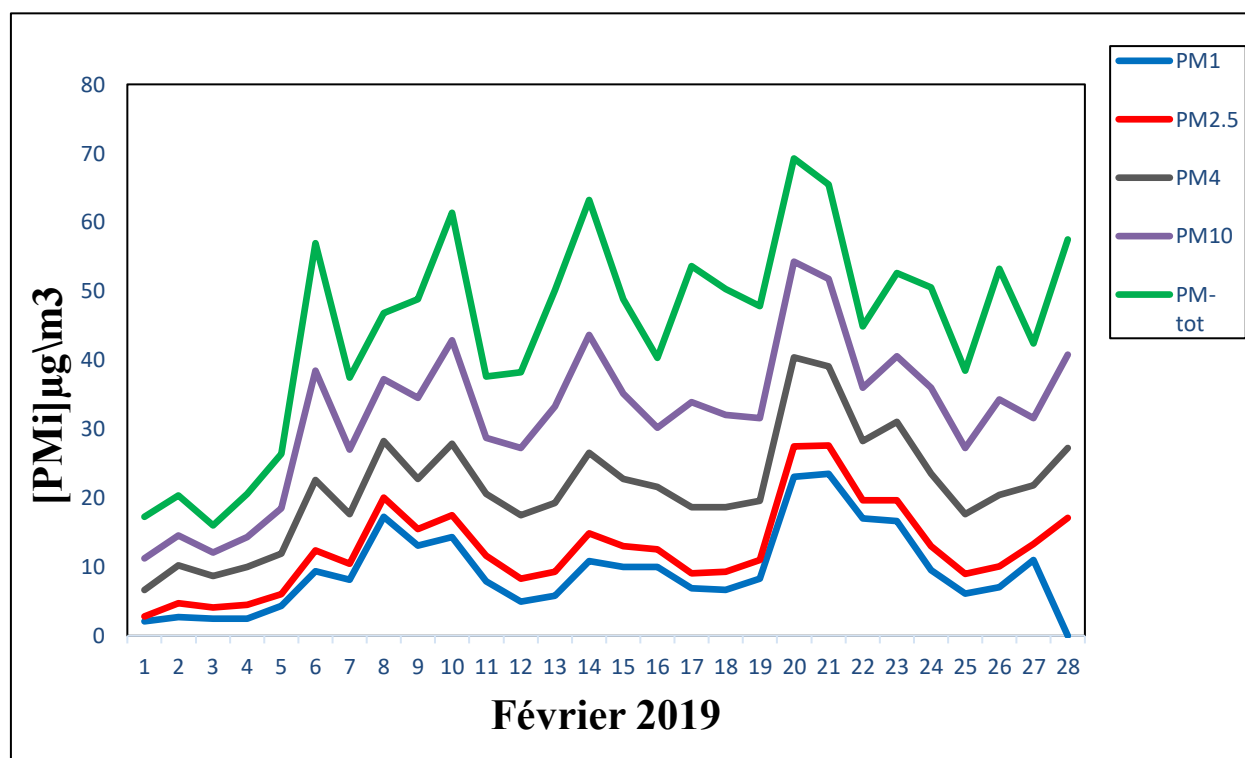


Figure II.2 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de février 2019.

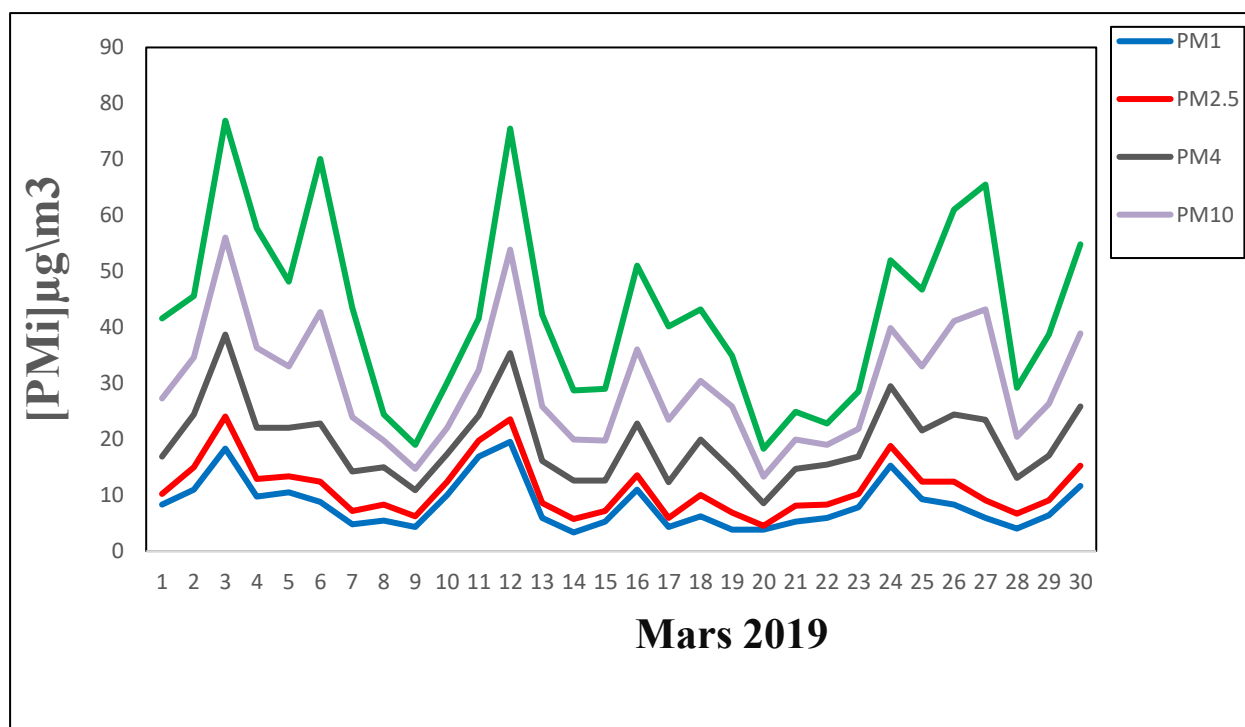
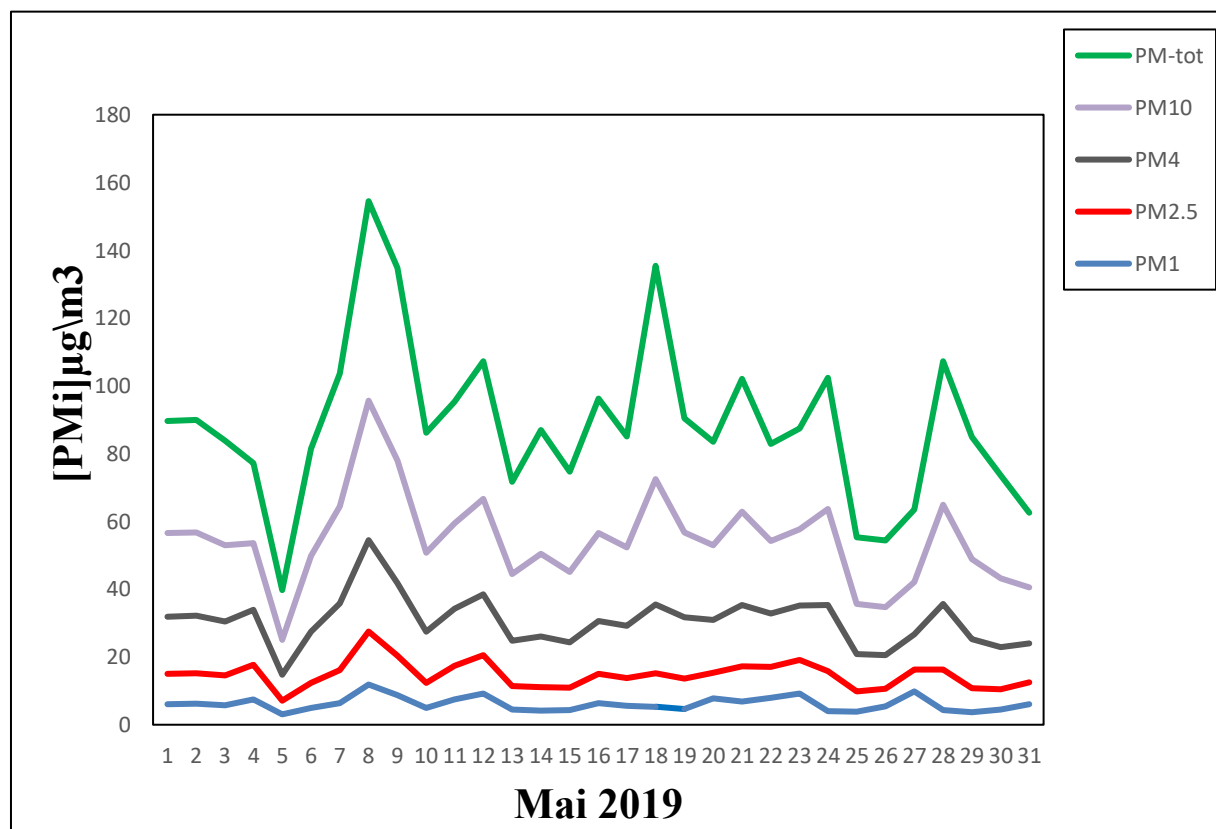
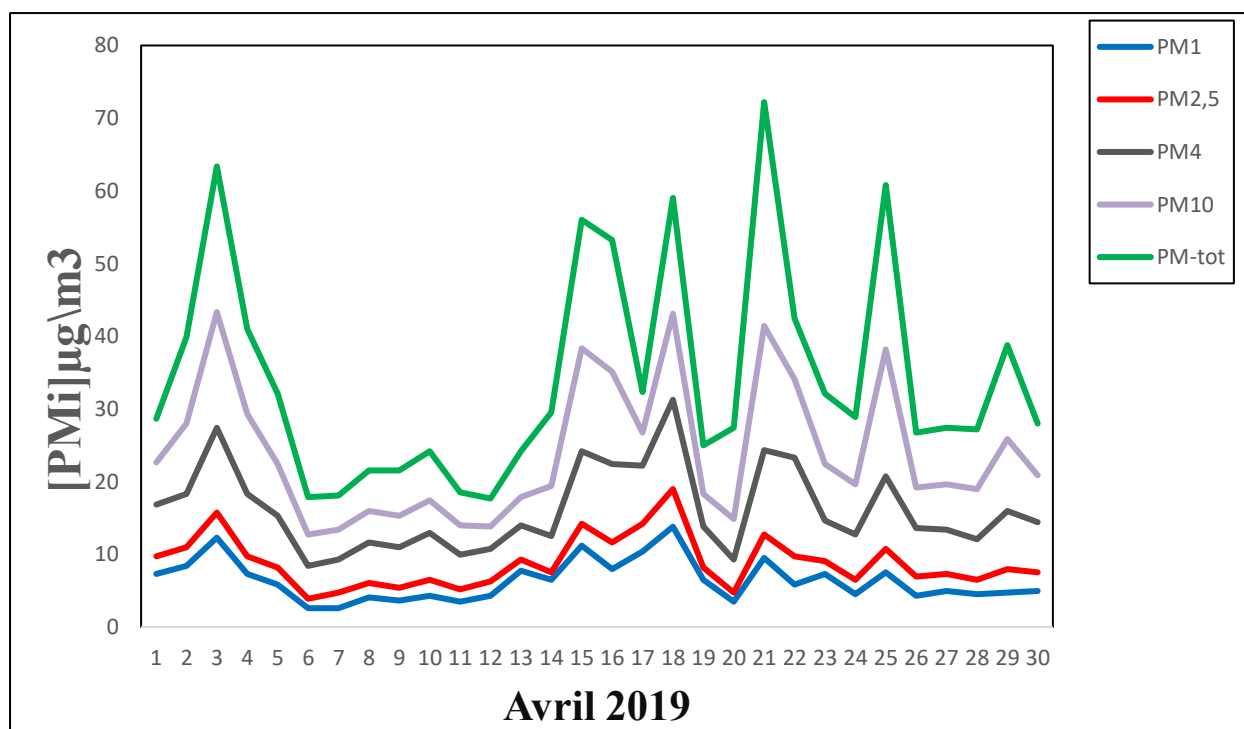


Figure II.3 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de mars 2019.



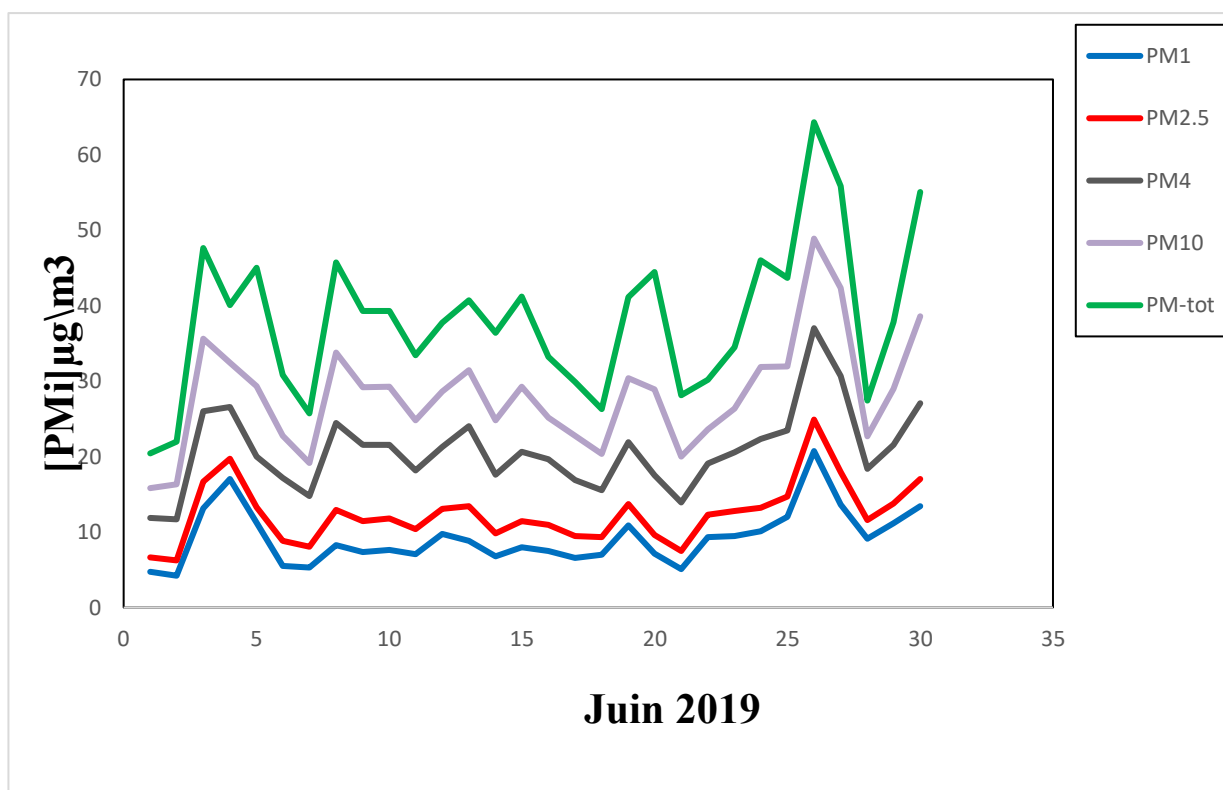


Figure II.6 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de juin 2019.

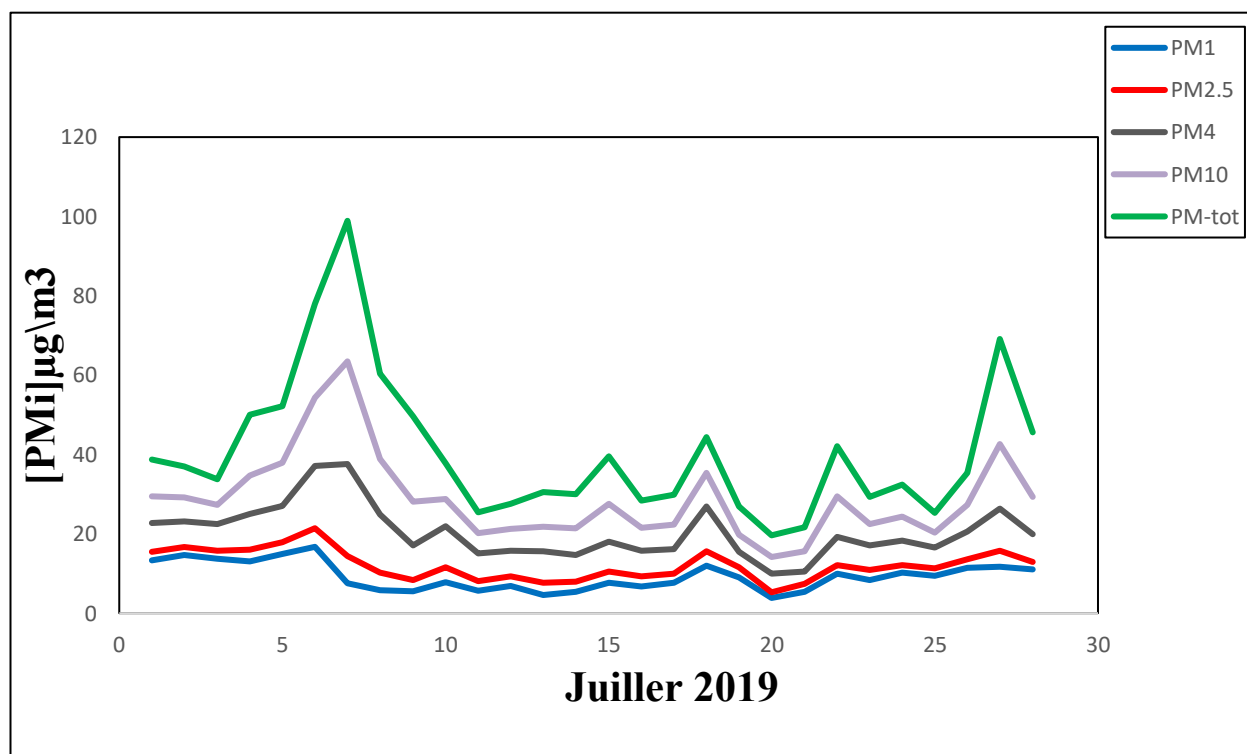


Figure II.7 : Évolution quotidienne moyenne des niveaux de PMi atmosphériques mesurés au mois de juillet 2019.

II.2. Approche de modélisation numérique pour la prédiction des concentrations de PMi en fonction des variables météorologiques au CHUMP

Les méthodes d'intelligence artificielle (IA) sont devenues des outils puissants et fiables dans le domaine du calcul scientifique, avec des applications croissantes dans de nombreuses disciplines scientifiques et d'ingénierie. Elles ont transformé ces dernières années les secteurs industriels, le quotidien des individus ainsi que divers champs de recherche [52]. Dans cette étude, nous proposons un modèle mathématique par les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) afin d'identifier le modèle le plus performant pour estimer les concentrations de particules fines (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_4 , PM_{10} et $PM-Tot$) à partir des variables météorologiques. L'objectif est de sélectionner le modèle offrant une erreur de prédiction minimale et un coefficient de détermination R^2 s'approchant de 1.

II.2.1. Collection de la base de données

Afin d'améliorer la modélisation des particules fines (PM_i), nous avons eu recours à des méthodes d'intelligence artificielle pour élaborer des modèles corrélatifs et prédictifs capables de traiter des relations non linéaires complexes. Ces modèles ont été développés pour estimer les concentrations des différentes fractions de particules fines (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_4 , PM_{10} et $PM-Tot$) en fonction des variations des conditions météorologiques (CM). La température (T), l'humidité relative (Hr), la vitesse du vent (V_v), les précipitations cumulées (Pc), ainsi qu'un facteur de choix du type de particule (Fc) ont été utilisées comme variables d'entrée dans le modèle de prédiction. Les concentrations des cinq fractions de particules fines (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_4 , PM_{10} et $PM-Tot$) ont été utilisées comme variables de sortie du modèle de prédiction. Nous avons construit l'architecture de la base de données, qui constitue l'épine dorsale de la modélisation développée dans cette étude. Cette base de données, utilisée pour l'apprentissage et la validation des RNA précédemment mentionnées, repose sur un ensemble de 835 valeurs expérimentales collectées entre le 1er février et le 28 juillet 2019 citées dans le cadre de la première phase expérimentale. La base des données est réalisée par une matrice rectangulaire de dimension (835 ; 5) pour la gamme des entrées et (835 ; 1) pour la gamme de sortie, répartie de la façon suivante : 75% pour la phase d'apprentissage et 25% pour la phase de test et de validation.

II. 2.1.1. Analyse de sensibilité

Afin d'évaluer l'impact des différentes variables d'entrée sur le modèle, une analyse de sensibilité a été réalisée. La figure II.8 suivante présente les valeurs relatives de chaque variable sur la sortie désirée.

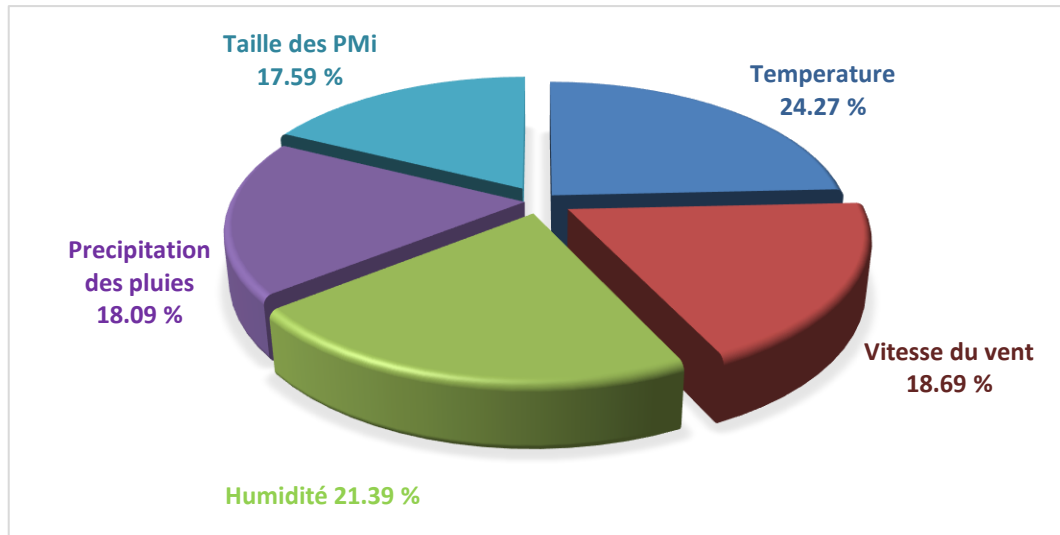


Figure II.8 : Répartition des impacts relatifs des variables d'entrée sur le modèle neuronal.

II.2.1.2. Normalisation des données

Les données sont réparties en six colonnes, correspondant respectivement aux :

{Température, Vitesse de vent, Humidité relative, Précipitation cumulée, Facteur de choix, [PMi]}.

Les valeurs numériques ont été normalisées afin d'améliorer l'optimisation. La normalisation se fait par ligne, chaque paramètre des entrées et de sorties (x_i) est normalisé ($x_{i \text{ normalisée}}$) par l'équation (II.1) suivante :

$$x_{i \text{ normalisée}} = 2 \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} - 1 \quad (\text{II.1})$$

II.2.1.3. Dé-normalisation des données

Les valeurs numériques seront toutes dé-normalisées afin de représenter ces valeurs à son état réel, chaque paramètre des entrées et de sorties ($x_{i \text{ normalisée}}$) est transformé en (x_i) par l'équation (II.2) :

$$x_i = \frac{1}{2} * (x_{i \text{ normalisée}} + 1) * (\max(x_i) - \min(x_i)) + \min(x_i) \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.4. Etude statistiques des paramètres influençant des concentrations des PMi

Les statistiques descriptives permettent de résumer et de caractériser quantitativement les données, facilitant ainsi leur interprétation. Les valeurs extrêmes (minimum et maximum) ainsi que les variations statistiques des concentrations des PMi sont présentées dans le tableau II.1. La moyenne, indicateur central de tendance, représente la valeur autour de laquelle les données sont généralement distribuées. Les valeurs minimale et maximale illustrent l'étendue de la série temporelle.

La variance, définie par l'équation II.3, correspond à la moyenne des carrés des écarts entre chaque valeur et la moyenne. Son calcul consiste à déterminer l'écart de chaque donnée par rapport à la

moyenne, puis à diviser leur somme par N-1. L'écart type (ou *standard deviation*, STD), exprimé par l'équation II.4, est obtenu en prenant la racine carrée de la variance. Il constitue une mesure de la dispersion des données autour de la moyenne. Un écart type élevé indique une forte variabilité des données, tandis qu'un écart type faible suggère que les valeurs sont relativement proches de la moyenne [53].

$$Variance = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad (II.3)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (II.4)$$

Ou x_i est les valeurs expérimentales, $\bar{x}$ est la moyenne des données expérimentales et N représente la taille des données expérimentale.

Tableau II.1 : Description statistique de l'ensemble des données.

Catégori e des variables	Variables		Unité	Plages des variables (min - max)	Moyenn e	STD	Variance s
Les entrées	Température		(°C)	13,06 - 29	19.03	3.54	12.57
	Humidite relative		%	42 - 91	71	0.10	0.01
	Vitesse du vent		(m / s)	2.08 - 14.49	8.39	2.64	7.01
	Precipitation		(mm)	0.08 - 21.37	0.08	3.13	9.84
	Choix de PMi		(µm)	0 - 10	2.5	3.55	12.60
La sortie	PMi	PM-1	(µg/m³)	2.14 - 23.39	8.17	4.07	16.57
		PM-2.5	(µg/m³)	4 - 27.5	10.95	4.52	20.49
		PM-4	(µg/m³)	7.55 - 40.35	19.07	6.42	41.31
		PM-10	(µg/m³)	10.23 - 63.91	28.02	9.62	92.67
		PM-Tot	(µg/m³)	13.93 - 99.69	39.62	14.59	213.07

II.2.2. Modélisation par les Réseaux de Neurone Artificiel (RNA)

La connaissance expérimentale des concentrations de particules fines atmosphériques (PMi) révèle qu'elles sont fortement influencées par des variables environnementales mesurables telles que la température, la vitesse du vent, les précipitations cumulées et le taux d'humidité. Bien que les réseaux

de neurones artificiels (RNA) soient classés parmi les modèles de type « boîte noire », établissant des relations empiriques entre des jeux de données en entrée et en sortie [55], le choix judicieux des variables d'entrée et de sortie demeure essentiel. En effet, une sélection appropriée permet au modèle neuronal de mieux approcher le comportement de modèle déterministe, améliorant ainsi sa capacité prédictive et sa robustesse.

II.2.2.1. Méthodologie de calcul

Le schéma de la figure II.10 représente le principe de calcul des concentrations des PM_i (PM₁, PM_{2.5}, PM₄, PM₁₀ et PM_{Tot}) en utilisant les RNA.

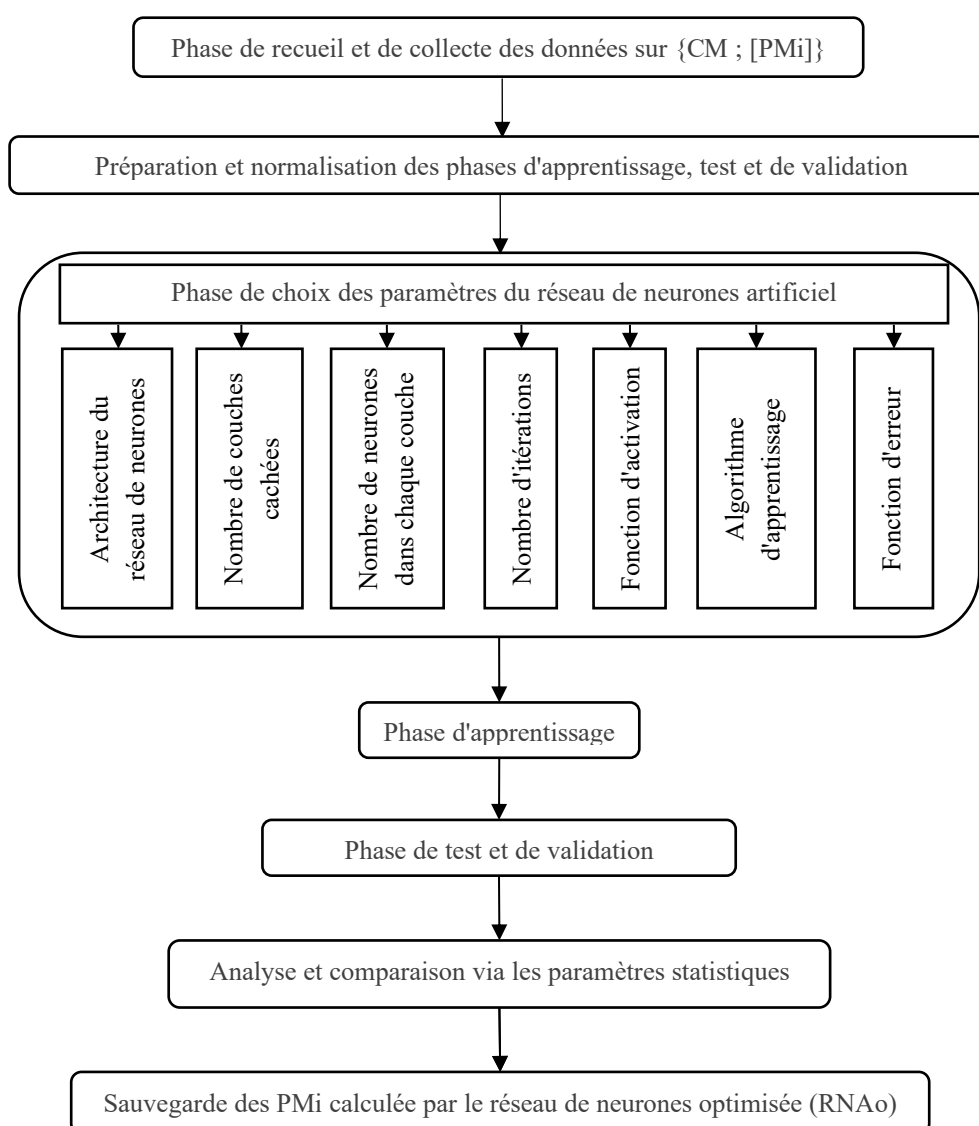


Figure II.10 : Schéma de Principe de calcul des PM_i par réseaux de neurones artificiels optimisé.

II.2.2.2. Choix des paramètres de RNA :

Nous avons configuré le RNA avec une architecture à une puis à deux couches cachées. Après comparaison des erreurs obtenues, nous avons opté pour le modèle à deux couches cachées et la fonction **newff**, qui correspond au RN de type FFNN, sont choisies avec l'algorithme d'apprentissage de Levenberg- Marquardt (la fonction **trainlm** de MATLAB®). La procédure commence par la fonction de transfert sigmoïde logarithmique (fonction **logsig** de MATLAB®), ensuite la fonction sigmoïde tangente hyperbolique (fonction **tansig** de MATLAB®) pour les deux couches cachées, et la fonction linéaire (fonction **purelin** de MATLAB®) pour la couche de sortie.

II.2.2.3. Conception de réseau de neurone artificiel

L'apprentissage supervisé est retenu dans cette étude, il consiste à fournir au réseau des jeux de données d'entrées (T, Vv, Hr, Pc et Fc) pour lesquels on connaît les réponses souhaitées ([PMi]).

On construit alors un critère d'erreur en comparant la réponse de {[PMi]} prédite par le modèle de RNAo à celle attendue {[PMi]} expérimentale}.

Un algorithme de correction des poids synaptiques va permettre de diminuer cette erreur et d'améliorer ainsi la réponse du RN. La mise en œuvre de cette technique impose la constitution d'une base d'apprentissage formée de l'ensemble de jeux de données et des sorties associées.

Il n'existe pas de règle pour la fixation du nombre de couches cachées, ainsi que du nombre de neurones dans chaque couche cachée dans un réseau de neurones de type MLP pour un problème donné. Par conséquent, la stratégie d'essai et d'erreur est la plus raisonnable. Pour obtenir la meilleure structure neuronale, le nombre de neurones dans chaque couche cachée est varié par le modélisateur à partir d'un programme MATLAB® pour optimiser la structure à travers des tests basées sur des formules d'erreur statistique. Dans cette étude, le nombre de neurone dans chaque couche cachée a été testé pour une et pour deux couches cachées avec différentes fonctions de transfert. Tandis que le nombre de neurones a été optimisé d'une manière systématique dans les deux choix précédents dans l'algorithme du RNA. Le nombre de neurones dans le cas d'une seule couche cachée a été varié entre 1 et 25, et pour les deux couches cachées : entre 1 et 25 neurones pour la première couche cachée et entre 1 et 25 neurones pour la deuxième couche cachée ce qui donne 625 structures. Cependant, chaque architecture a été répétée 5000 fois afin d'éviter la convergence vers un minimum local. Le nombre optimal des neurones cachés est défini comme le nombre pour lequel la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est minimale.

Dans un tel RNA de type feedforward un neurone, dans une couche cachée ou une couche de sortie, a deux tâches : Il additionne le biais aux entrées pondérées de plusieurs connexions et applique ensuite

une fonction d'activation (dite aussi fonction de transfert) à cette somme comme donnée par l'équation (II.5) (pour le neurone "j" de la première couche cachée.

$$z_j = f \left[\sum_{i=1}^n w_{j,i} \cdot u_i + b_j \right], j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{II.5})$$

Ensuite, il propage la valeur résultante par les connexions partantes aux neurones de la couche suivante où elle subit le même processus de calcul donné par l'équation (II.6) :

$$v_k = f \left[\sum_{j=1}^m w_{j,k} \cdot z_j + b_k \right], k = 1, 2, \dots, l \quad (\text{II.6})$$

En combinant des équations II.5 et II.6 on obtient la relation (équation II.7) entre la sortie v_k et les entrées du RN :

$$v_k = f \left[\sum_{j=1}^m w_{j,k} \cdot f \left[\sum_{i=1}^n w_{i,j} \cdot u_i + b_j \right] + b_k \right] \quad (\text{II.7})$$

Enfin, il propage la valeur résultante par les connexions partantes aux neurones de la couche suivante où elle subit le même processus de calcul donné par l'équation II.8 :

$$u_p = f \left[\sum_{k=1}^l w_{k,p} \cdot v_k + b_p \right], p = 1, 2, \dots, h \quad (\text{II.8})$$

En combinant des équations II.7 et II.8 on obtient la relation entre la sortie u_p et les entrées du RN (Eq.II.9) :

$$u_p = f \left[\sum_{k=1}^l w_{k,p} \cdot f \left[\sum_{j=1}^m w_{j,k} \cdot f \left[\sum_{i=1}^n w_{i,j} \cdot u_i + b_j \right] + b_k \right] + b_p \right] \quad (\text{II.9})$$

A la fin les meilleurs résultats en termes d'erreur sont sauvegardés.

Le tableau (annexe AII.1) représente les erreurs pour chaque structure dans cette modélisation.

La figure II.11 représente la différence en termes d'erreur pour les nombres de neurones dans chaque couche cachée.

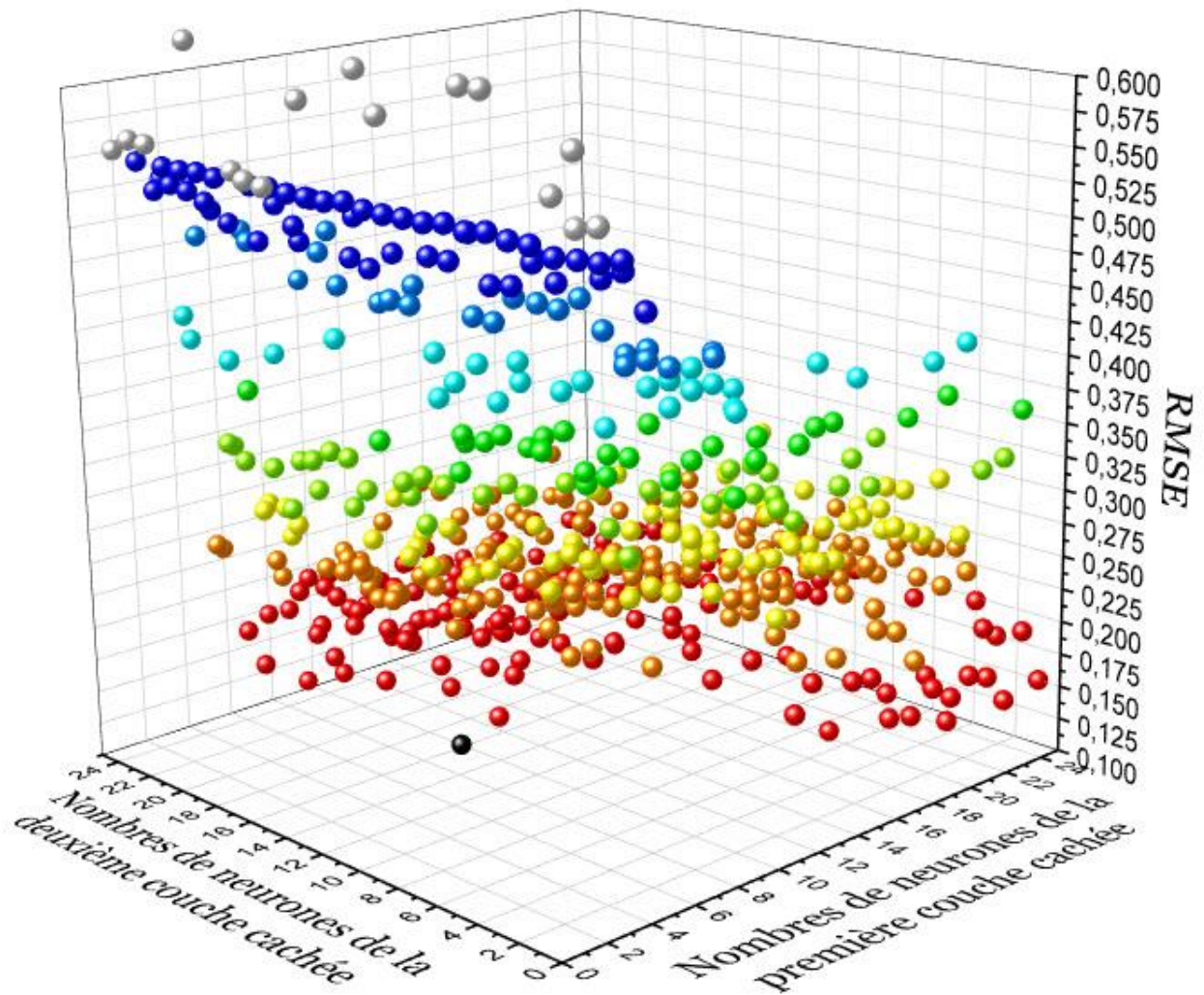


Figure II.11: la différence en termes d'erreur pour les nombres de neurones dans chaque couche cachée.

Le schéma du RNA de type "MLP" à rétro-propagation utilisé pour modéliser les concentrations des PMi est représentée sur la Figure II.12.

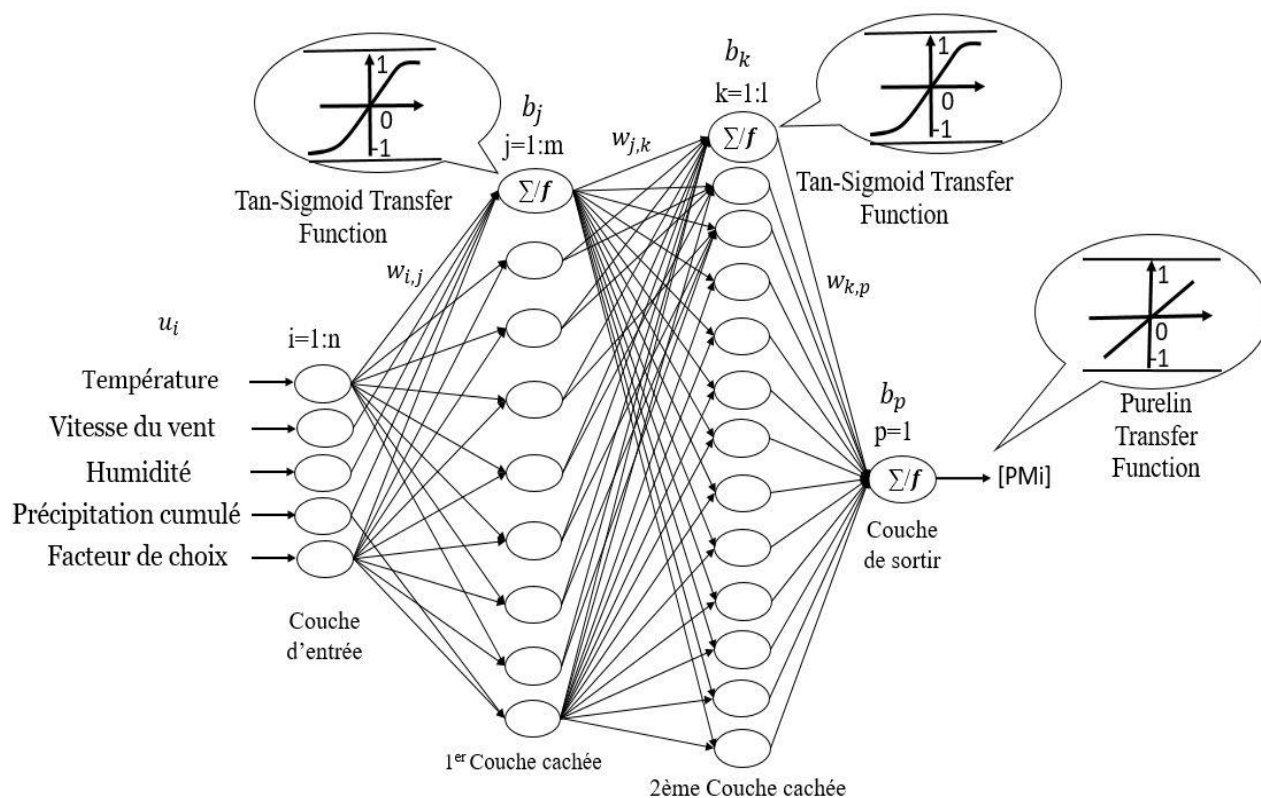


Figure II.12 : Schéma du Réseau de neurones artificiels optimisé.

Les tableaux de II.3 à II.5 récapitulent les poids et les biais des deux couches cachées et de la couche de sortie du réseau de neurones optimisée.

Tableau II.3 : Modèle de réseau de neurones établi {(Couche d'entrée – couche cachée1)}

Connexion [couche entrée – 1 ^{ère} couche cachée]					
Matrice des poids					Vecteur des biais
$W_{i,1}$	$W_{i,2}$	$W_{i,3}$	$W_{i,4}$	$W_{i,5}$	b_a
1.8182	0.1458	-2.6590	-2.0278	0.0214	1.2754
-4.5207	-0.5962	4.0442	1.3886	-0.0112	0.1380
-0.9389	4.2725	-0.7766	-0.1186	-0.0031	-0.7793
-1.7461	-1.3352	-0.1569	2.0820	0.0169	1.8572
0.2141	-0.1817	0.1101	0.2231	-1.2433	-1.2148
2.6051	-1.7348	-0.9562	-1.5369	0.0022	-1.6921
1.0012	4.0242	-2.1826	-0.0616	0.0100	1.3918
-0.2553	3.5361	4.3683	2.2110	-0.0160	-0.0986
-0.1730	0.0784	-0.0808	-0.1722	4.1751	4.5167

Tableau II.4 : Modèle de réseau de neurones établi {(Couche cachée 1 – couche cachée 2)}

Connexion [couche entrée – 1 ^{ère} couche cachée]									
Matrice des poids									Vecteur des biais
$W_{i,1}$	$W_{i,2}$	$W_{i,3}$	$W_{i,4}$	$W_{i,5}$	$W_{i,6}$	$W_{i,7}$	$W_{i,8}$	$W_{i,9}$	b_b
1.8721	1.0933	1.8477	-2.0125	-0.1023	0.1338	-1.3456	0.9111	-0.2293	-0.4338
-2.0128	-3.3903	2.3181	0.8179	-0.7231	1.8633	2.7383	2.3345	-1.3845	0.9230
0.8906	-1.0480	-4.7419	-1.2146	-0.8671	1.7224	-1.2485	-0.1543	-1.6194	-1.3050
-1.8799	0.5949	0.1858	0.2412	1.3052	2.3442	0.0910	1.8946	2.7750	1.3266
-0.1174	2.2881	0.7133	-2.7010	-1.6130	-0.2855	-0.5188	-3.8174	-3.0081	-2.8619
1.4873	-0.6750	-0.7405	2.4168	-0.3148	-0.8222	-2.3280	1.3967	-0.5914	-1.3402
0.0706	-1.1879	-3.0114	-0.4195	0.1005	-1.0046	-1.4871	1.2013	0.2398	1.0710
0.8412	0.9436	1.5479	1.2670	-0.8145	3.8321	-2.4140	0.9907	-1.6197	2.0878
-2.3036	0.6176	-2.6417	-0.6714	-0.3937	1.4238	1.2777	-1.4245	-0.7593	0.0955
0.9036	-1.0093	-1.1795	1.3438	0.2443	-0.1920	0.5150	1.9132	0.6819	0.0943
2.1668	1.4601	1.5889	0.9112	-0.7431	4.9539	-2.3515	2.1097	-1.4209	1.3223
-1.5228	-2.9782	1.5478	0.5924	0.1483	1.7569	2.1310	2.4985	0.3514	-0.2148
-1.5956	-0.4904	-1.1328	-0.5677	-0.2015	0.3966	1.9672	0.8795	-0.3498	-1.0639
0.3719	0.2598	0.6387	0.0438	-0.0891	0.9540	-0.4962	-1.7589	-0.4428	2.0777
-0.4503	0.1860	0.3448	-0.1563	0.5308	-1.0484	0.4068	0.8184	1.0055	-1.4967

Tableau II.5 : Modèle de réseau de neurones établi {[Couche cachée 2 – couche sortie]}.

Poids	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Vecteur des biais (b _c)
W_{m,1}	2.0084	2.3746	-1.6681	-0.6531	2.1239	0.8224	-1.6590	2.0681	2.5978	2.0920	-1.9867	-3.1247	2.1538	-1.9557	-2.9374	2.9959

II.3. Résultats et discussion

Dans notre travail on exploite la technique de RNA, en utilisant le logiciel MATLAB.18 afin de prédire les concentrations des PMi.

L'optimisation de l'architecture du RNA consiste à la détermination :

- Du nombre des neurones dans la chaque couche cachée.
- De la fonction d'activation des couches caches et la couche de sortie.
- De l'algorithme d'apprentissage, par comparaison des performances des RN sur la base d'apprentissage, test et validation en termes d'erreur quadratique moyenne MSE (Eq.II.10).

Avec :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (y_i^{\text{exp}} - y_i^{\text{cal}})^2 \quad (\text{II.10})$$

N : Le nombre des tests réalisés afin de trouver les concentrations des PMi

II.3.1. Interprétation des résultats :

Les résultats de performances du modèle neuronal établie dans ce travail pour la phase globale, Apprentissage et test pour le calcul des concentrations des PMi sont présentées sur les figures de II.13 à II.15 montre bien que tous les points sont situés sur la première bissectrice figure II.13 avec un coefficient de régression approchant l'idéal [α (pente), β (ordonnée à l'origine), R^2 (coefficient de détermination)] = [0.99, 0.28, 0.9798] pour la phase globale. La figure II.14 montre la courbe de régression linéaire pour le calcul des concentrations des PMi par les RNA, ce qui montre que tous les points sont situés sur la première bissectrice avec un coefficient de régression parfait [0.99, 0.14, 0.9961] pour la phase d'apprentissage. La figure II.15 montre la régression linéaire pour le calcul des concentrations des PMi par les RNA, avec un vecteur de régression linéaire égal à [0.96, 1, 0.9184] pour la phase de test. Ce qui confirme la robustesse du modèle mathématique élaborer.

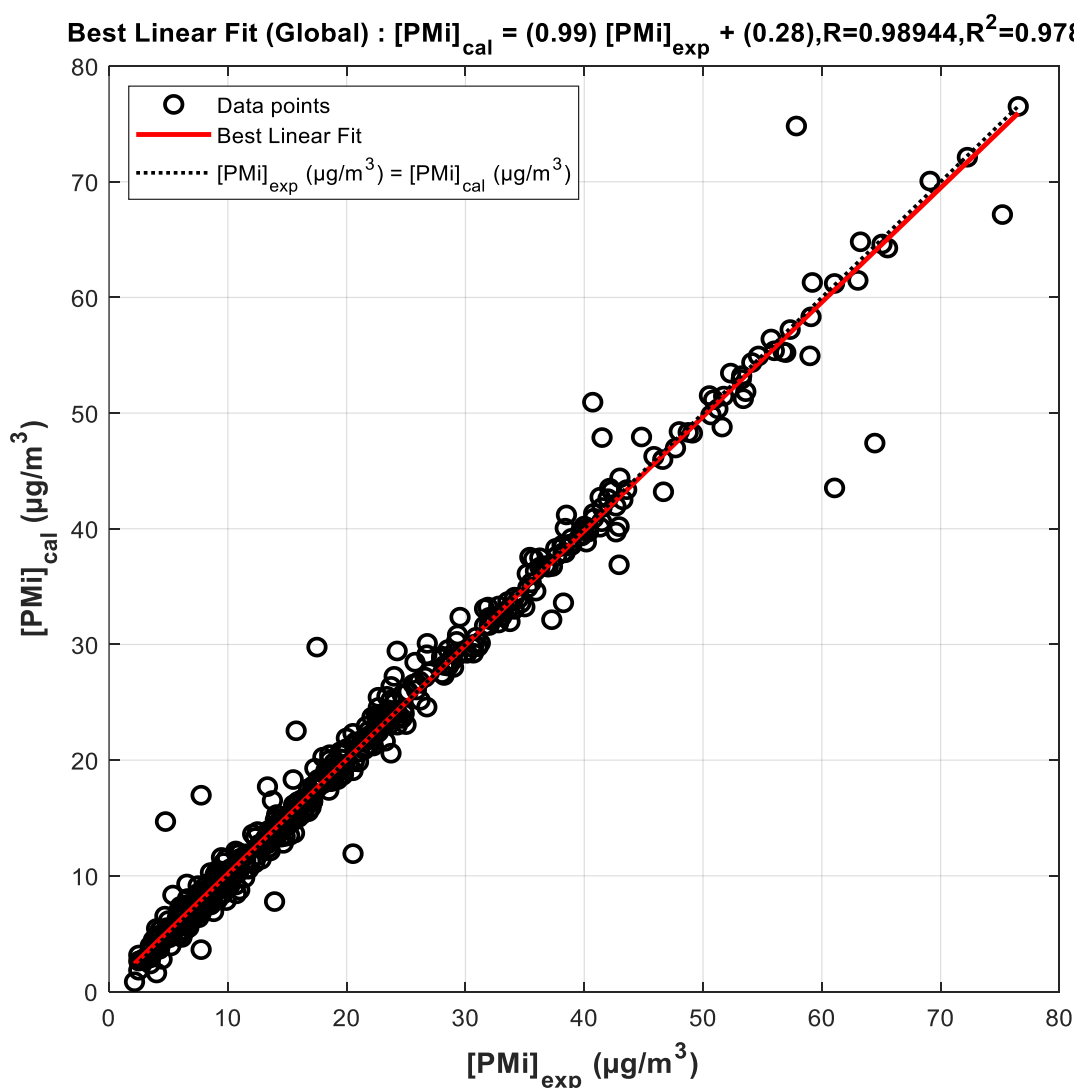


Figure II.13 : Courbe de régression linéaire de la concentration des PMi calculée par les RNA optimisé avec la concentration des PMi expérimentale pour la phase globale.

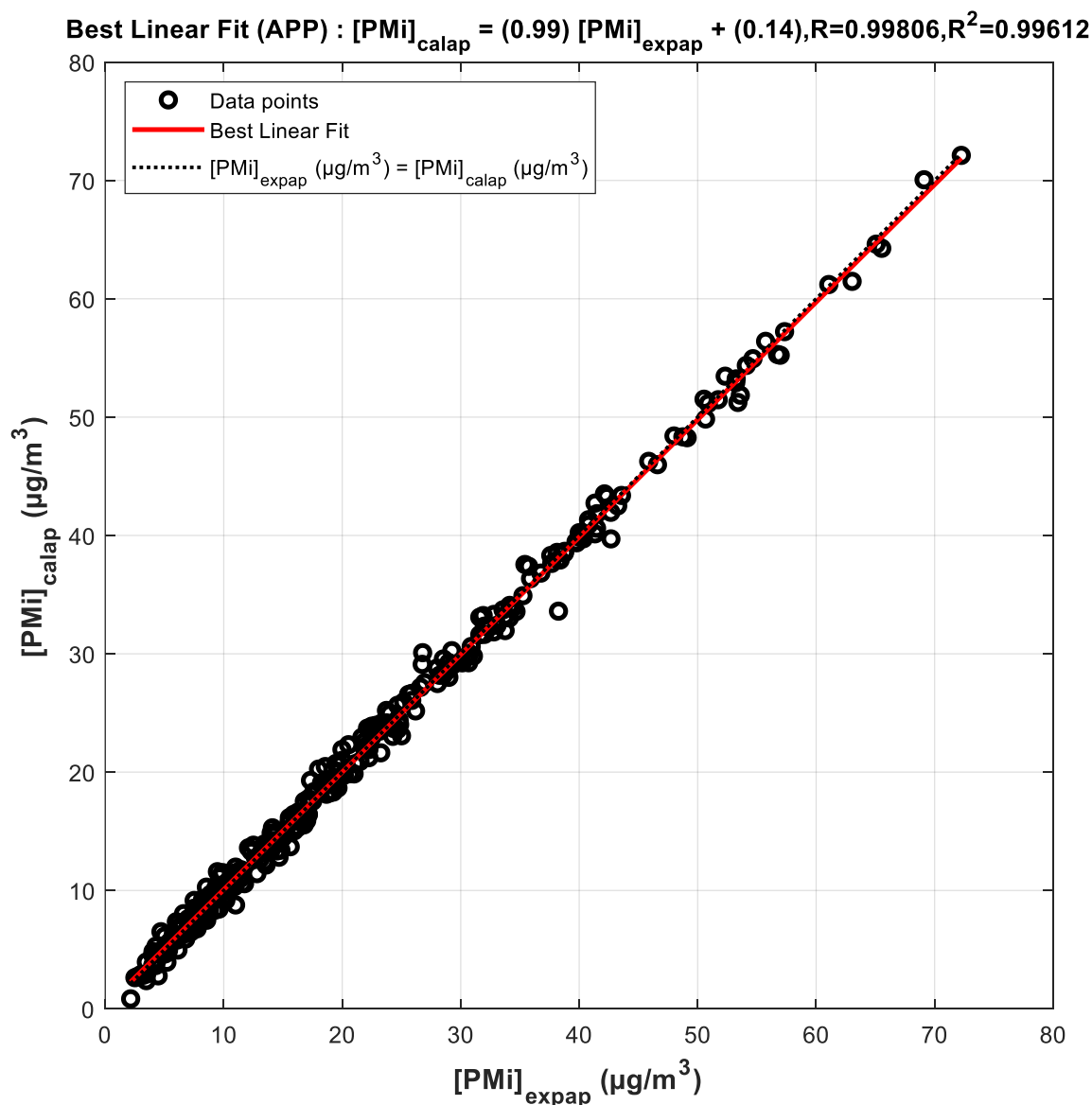


Figure II.14 : Courbe de régression linéaire de la concentration des PMi calculée par les RNA optimisé avec la concentration des PMi expérimentale pour la phase d'apprentissage.

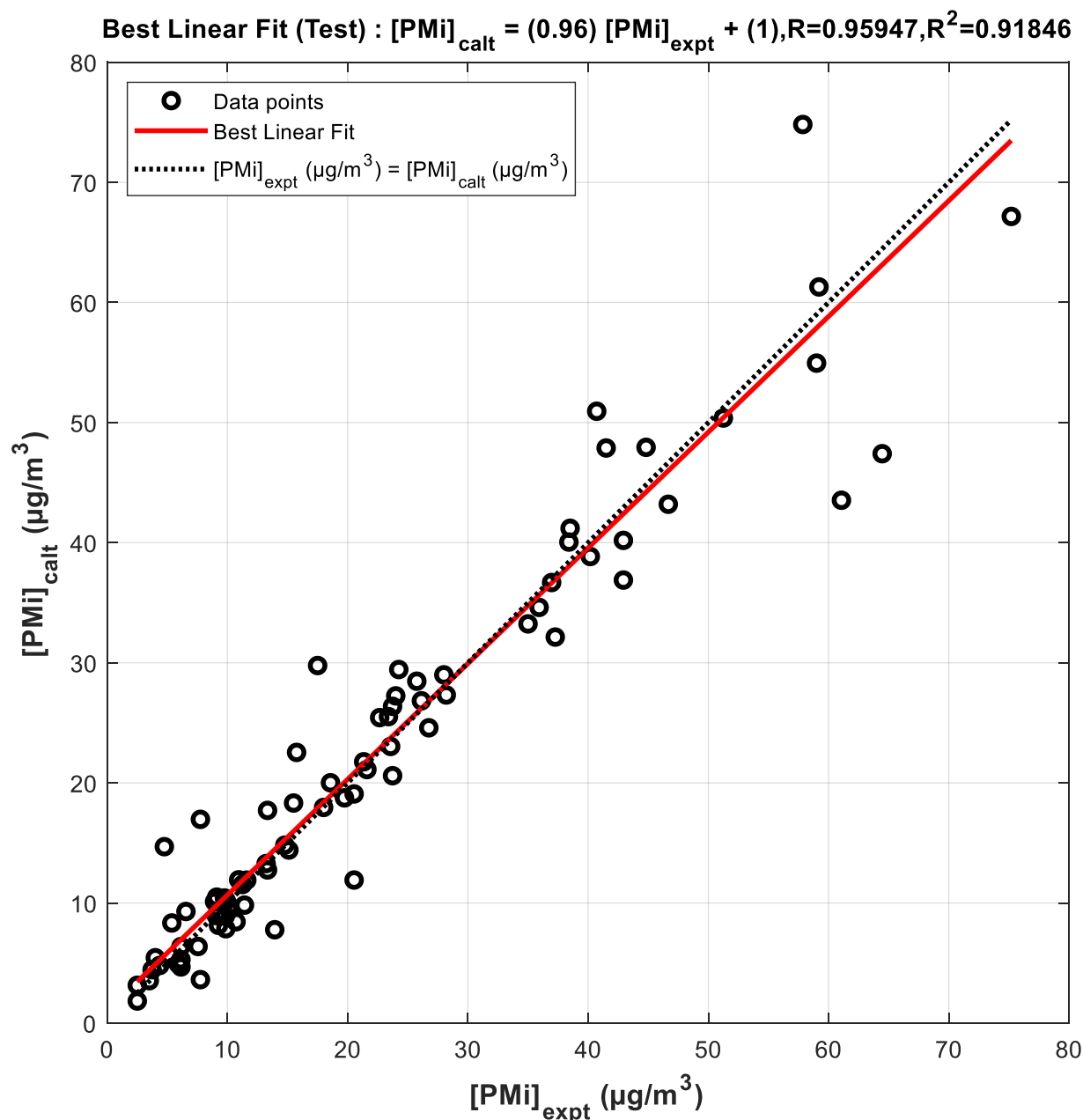


Figure II.15 : Courbe de régression linéaire de la concentration des PMi calculée par les RNA optimisé avec la concentration des PMi expérimentale pour la phase de test.

II.3.2. Critères de performances statistiques (Analyse et évaluation d'un modèle) :

Pour analyser plus précisément les performances du modèle RNA, l'ensemble des erreurs sont calculées pour les valeurs prédites des concentrations des PMi. Les indices d'évaluation couramment utilisés comprennent l'erreur quadratique moyenne (MSE), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE), l'erreur moyenne absolue (MAE), l'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), l'erreur relative absolue (ERA), le coefficient de corrélation (R) et le coefficient de détermination (R^2), sont donnés par les équations (II.12) à (II.19) :

$$MSE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Y - Y_{cal})^2 \quad (II.12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Y_{cal} - Y)^2} \quad (II.13)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (Y - Y_{cal})^2}{(\sum_{i=1}^n Y)^2}} \quad (II.14)$$

$$MAE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |Y_{cal} - Y| \quad (II.15)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - Y_{cal}|}{Y} \right) * 100 \quad (II.16)$$

$$ERA = \left| \sum_{i=1}^n \frac{Y - Y_{cal}}{|Y|} \right| \quad (II.17)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y - \bar{Y}) * (Y_{cal} - \bar{Y}_{cal}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2 * \sum_{i=1}^n (Y_{cal} - \bar{Y}_{cal})^2}} \quad (II.18)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n ((Y - Y_{cal})^2)}{\sum_{i=1}^n ((Y - \bar{Y})^2)} \right) \quad (II.19)$$

Où Y sont les données observées, $\bar{Y}$ est la moyenne arithmétique des données observées donnés par l'équation (II.20), Y_{cal} sont les valeurs calculées, $\bar{Y}_{cal}$ est la moyenne arithmétique des données prédites donnés par l'équation (II.21) et "n" est le nombre des données.

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y \quad (II.20)$$

$$\bar{Y}_{cal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{cal} \quad (II.21)$$

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau II.6. Le modèle neuronal montre d'une part la prédiction des concentrations des PMi et d'autre part la robustesse du modèle neuronal.

Tableau II.6 : Résultats des paramètres statistiques du modèle RNAo développé dans ce travail.

Type d'erreur	Phase (App)	Phase (Test)	Phase (Val)	Phase (All)
MSE	0.0068	3.6249	0.0556	0.6507
RMSE	0.0822	1.9039	0.2358	0.8067
NRMSE	0.0039	0.0847	0.0109	0.0378
MAE	0.7067	3.1407	0.7706	1.1237
MAPE (%)	5.3142	19.2717	5.9879	7.7563
ERA	0.3826	3.0476	0.6449	2.7854
α	0.99	0.96	1	0.99
β	0.14	1	-0.076	0.28
R	0.9980	0.9594	0.9978	0.9894
R²	0.9961	0.9184	0.9956	0.9789

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats issus de la modélisation pour la prédiction des aérosols, les données ont été collectées entre février et juillet 2019. Les paramètres mesurés incluent les concentrations de PM-10, PM-4, PM-2.5, PM-1, PM-Tot, ainsi que la température et l'humidité relative. Les mesures ont été réalisées à l'aide de l'appareil FIDAS® 200 sur un site urbain situé en plein centre-ville d'Alger. Le modèle mathématique a été élaboré par l'algorithme des réseaux de neurone artificiel.

Le coefficient de détermination (R^2) ainsi que la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) indiquent des résultats prometteurs. Ce modèle mathématique de prévision, intégré à une interface graphique, constitue ainsi un outil pertinent pour assister les autorités publiques. En l'absence de stations de mesure en continu, il permet d'anticiper les épisodes critiques de mauvaise qualité de l'air, réduisant ainsi les risques d'impacts économiques et sanitaires négatifs.

Référence Bibliographiques :

- [1] D. Pope, "Health effects of fine particulate air pollution lines that Connect," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 2006.
- [2] et al Brook, R.D., "Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease Circulation," 2010.
- [3] S. et al Gulia, "Urban air quality management - A review," *Atmos. Pollut. Res.*, 2015.
- [4] CDER, "(Centre de Développement des Énergies Renouvelables), Algérie," Publications internes du CDER.
- [5] H. et al. Hooyberghs, "A neural network forecasting model for PM10 and PM2.5 concentrations," *Atmos. Environ.*, 2015.
- [6] R. Daniel *et al.*, "Analysis of environmental dispersion of particulate matter (PM 2 . 5 and PM10) worldwide over the last 10 years : A review of the scientific literature Análisis de la dispersión ambiental de material particulado (PM 2 . 5 and PM10) a nivel mundial en ," pp. 1–11.
- [7] Y. IKkene and K. Tarek, "Identification des risques atmosphériques au sein de la cimenterie la FARGE OGGAZ," Université'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2024.
- [8] R. ZAIMI, "Evaluation de la qualité de l'air par les particules fines PM2.5 et PM10 et des métaux lourds associés au niveau du centre urbain CPMC-CHU Mustapha," Université Saad Dahleb Blida 1, 2019.
- [9] OMS 2025, "World Health Organization."
- [10] D. Bebbba and N. Ben Derouiche, "Détection de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures a l'aide d'un bioindicateur lichénique (*Xanthoria parietina*) et quelques végétaux supérieurs comme bio-accumulateur (*Casuarina equisetifolia* et *Phoenix dactylifera*) dans la région de Hassi Mes," UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA, 2007.
- [11] K. ZIOUCHI, "ETUDE DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES TSP, LES PM ET ET LES METAUX LOURDS DU CENTRE D'ALGER," UNIVERSITÉ d'ADRAR, 2014.
- [12] A. TERROUCHE, "Caractérisation de la pollution de l' air par les particules et les éléments métalliques dans la ville de Constantine," UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI-CONSTANTINE 1, 2016.
- [13] B. H. Baek, V. P. Aneja, and Q. Tong, "Chemical coupling between ammonia , acid gases , and fine particles," vol. 129, no. 3, pp. 89–98, 2004, doi: 10.1016/j.envpol.2003.09.022.
- [14] I. HARRACHE, "Caractérisation physico-chimique physico chimique des particules fines dans l'atmosphère," UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE -BO UIRA, 2020.
- [15] R. K. Pathak, W. S. Wu, and T. Wang, "Summertime PM 2 . 5 ionic species in four major cities of China : nitrate formation in an ammonia-deficient atmosphere," pp. 1711–1722, 2009.
- [16] I. . RAPHAEL, M. C. JARS-GUINCESTRE, P. GAJDOS L, and PLAN, "INTOXICATION AIGUE PAR LE MONOXYDE DE CARBONE".

- [17] C. Elichegaray, S. Bouallala, A. Maitre, and M. Ba, “État et évolution de la pollution atmosphérique,” pp. 191–206, 2009, doi: 10.1016/S0761-8425(09)71596-7.
- [18] Q. Ramé, “Étude historique de la qualité d’air en Région wallonne au travers de l’indice BelAQI et de l’indice européen,” Liège université, 2021.
- [19] N. Sedira, “Etude de l’adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes Par,” Université Mohamed Chérif Massaadia Souk-Ahras.
- [20] O. BOUGHIOUT and A. SAIDANI, “Etude comparative de l’adsorption des métaux lourds (Cd et Pb) Sur des adsorbants différents,” UNIVERSITE M’HAMED BOUGARRA-BOUMERDES, 2020.
- [21] L. DOUMBIA, “ETUDE CINETIQUE ET THERMODYNAMIQUE DE L’ADSORPTION DE Cu^{2+} EN MILIEU AQUEUX PAR DES CHARBONS ACTIFS ISSUS DES BIOMASSES VEGETALES : ETUDE COMPARATIVE,” Université JEAN LOROUGNON GUEDE, 2021.
- [22] S. Bouranene, “Extraction des métaux lourds par membranes liquides émulsionnées / application: cobalt et plomb,” Université de Badji- Mokhtar. Annaba., 2000.
- [23] A. Cicolella, “Les composés organiques volatils (COV) : définition , classification et propriétés,” *Rev. Mal. Respir.*, vol. 25, no. 2, pp. 155–163, 2008, doi: 10.1016/S0761-8425(08)71513-4.
- [24] A. Tarantini, “Modulation de la génotoxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en mélanges,” 2010.
- [25] J.-M. COSTES and V. DRUELLE, “LES HYDROCARBURES LA RÉHABILITATION DANS L’ENVIRONNEMENT : AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DES ANCIENS SITES INDUSTRIELS,” vol. 52, no. 1, pp. 425–440, 1997.
- [26] E. Topp and E. Pattey, “Soils as sources and sinks for atmospheric methane,” pp. 167–178, 1997.
- [27] O. BENAMARA and C. TAHRAOUI, “ETUDE ET MODELISATION DE LA DISPERSION DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES DANS UN MILIEU URBAIN,” UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA, 2023.
- [28] G. BONGRAND, N. ALLEMAND, and V. MAZIN, “Particules,” pp. 237–266, 2020.
- [29] F. BOUAOUD and M. YAHIA TENE, “SUIVI CONTINU DES NIVEAUX DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE PAR LES PARTICULES (PM-i) DANS,” Ecole Nationale Polytechnique, 2019.
- [30] S. Boussalem and W. Zeriba, “UTLISATION DU REGROUPEMENT DES RETRO-TRAJECTOIRES POUR IDENTIFIER LES SOURCES DE LA POLLUTION PARTICULAIRES DANS UN SITE URBAIN,” UNIVERSITE «Abbés LAGHROUR» KHENCHELA, 2018.
- [31] S. . SEINFELD, J. H., & PANDIS, “Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (3rd ed.). Wiley.,” p. 2016, 2016.
- [32] Z. Xu, *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms*. Beijing, China: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

- [33] N. Michelot, “L’influence des topoclimats sur la pollution de l’air aux particules dans le sud-ouest des Alpes-Maritimes,” Université de Nice Sophia-Antipolis, 2014.
- [34] Z. W. Gao, M., G. R. Carmichael, Y. Wang, P. E. Saide, M. Yu, J. Xin, Z. Liu, “Modeling Study of the 2010 Regional Haze Event in the North China Plain,” vol. 16, no. 3, 2016.
- [35] W. xing W. Cheng, Shu hui, Ling xiao Yang, Xue hua Zhou, Li kun Xue, Xiao mei Gao, Yang Zhou, “Size-Fractionated Water-Soluble Ions, Situ PH and Water Content in Aerosol on Hazy Days and the Influences on Visibility Impairment in Jinan, China.,” vol. 45, no. 27, p. 4640, 2011.
- [36] et al Zheng, G. J., F. K. Duan, H. Su, Y. L. Ma, Y. Cheng, B. Zheng, Q. Zhang, “Exploring the Severe Winter Haze in Beijing: The Impact of Synoptic Weather, Regional Transport and Heterogeneous Reactions,” vol. 5, no. 6, p. 2969, 2015.
- [37] and J. J. B. Kok, Theo M.C.M. de, Hermen A.L. Driee, Janneke G.F. Hogervorst, “Toxicological Assessment of Ambient and Traffic-Related Particulate Matter: A Review of Recent Studies,” vol. 613, p. 2006, 2006.
- [38] and J. C. C. Mauderly, Joe L., “Health Effects of Organic Aerosols. Inhalation Toxicology,” vol. 20, no. 3, p. 2008, 2008.
- [39] et al Liu, X. G., J. Li, Y. Qu, T. Han, L. Hou, J. Gu, C. Chen, “Formation and Evolution Mechanism of Regional Haze: A Case Study in the Megacity Beijing, China,” vol. 13, no. 9, p. 4501, 2013.
- [40] and X. W. Zhang, Hanyu, Shuiyuan Cheng, Jianbing Li, Sen Yao, “Investigating the Aerosol Mass and Chemical Components Characteristics and Feedback Effects on the Meteorological Factors in the Beijing-Tianjin- Hebei Region, China,” p. 2019, 2019.
- [41] A. Fougeroux *et al.*, “Effet de l’activité des insectes pollinisateurs sur la pollinisation et le rendement du tournesol de consommation,” *OCL - Oilseeds fats, Crop. Lipids*, vol. 24, no. 6, 2017.
- [42] R. Guaita, M. Pichiule, T. Mate, C. Linares, and J. Diaz, “Short-term impact of particulate matter (PM_{2.5}) on respiratory mortality in Madrid,” *Int. J. Environ. Health Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 260–274, 2011.
- [43] and J. C. Zhu, Xiaoxia, Ying Liu, Yanyan Chen, Cijiang Yao, Zhen Che, “Maternal Exposure to Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) and Pregnancy Outcomes: A Meta-Analysis,” vol. 151, no. 5, pp. 10–17, 2015.
- [44] C. Losacco and A. Perillo, “Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 34, pp. 33901–33910, 2018.
- [45] X. Luo, H. Bing, Z. Luo, Y. Wang, and L. Jin, “Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system: A review,” *Environ. Pollut.*, vol. 255, p. 113138, 2019.
- [46] M. Tainio, K. Juda-Rezler, M. Reizer, A. Warchałowski, W. Trapp, and K. Skotak, “Future climate and adverse health effects caused by fine particulate matter air pollution: Case study for Poland,” *Reg. Environ. Chang.*, vol. 13, no. 3, pp. 705–715, 2013.
- [47] Y. J. Kim, K. W. Kim, S. D. Kim, B. K. Lee, and J. S. Han, “Fine particulate matter

- characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon,” *Atmos. Environ.*, vol. 40, no. SUPPL. 2, pp. 593–605, 2006.
- [48] M. El-Fadel and M. Massoud, “Particulate matter in urban areas: Health-based economic assessment,” *Sci. Total Environ.*, vol. 257, no. 2–3, pp. 133–146, 2000.
- [49] H. Yoon, “Effects of particulate matter (PM₁₀) on tourism sales revenue: A generalized additive modeling approach,” *Tour. Manag.*, vol. 74, no. September 2018, pp. 358–369, 2019.
- [50] Barakeh, “Surveillance de la qualité de l’air et évaluation des impacts sanitaires . Thèse de doctorat, Université Paris-Est,” Université Paris-Est, 2012.
- [51] OMS2021, “WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide . Geneva: World Health Organization,” 2021.
- [52] Shen, Chaopeng. 2018. “A Transdisciplinary Review of Deep Learning Research and Its Relevance for Water Resources Scientists.” *Water Resources Research* 54 (11): 8558–8593.
- [53] Wang, Ping, Hong Zhang, Zuodong Qin, and Guisheng Zhang. 2017. “A Novel Hybrid-Garch Model Based on ARIMA and SVM for PM_{2.5} Concentrations Forecasting.” *Atmospheric Pollution Research*.
- [54] Liu, Tian, Mei Ping Wu, Kai Dong Zhang, Ying Liu, and Jie Zhong. 2014. “Correlation Analysis and Control Scheme Research on PM_{2.5}.” *Applied Mechanics and Materials* 590: 888–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.590.888>.
- [55] Kanungo, D. P., M. K. Arora, S. Sarkar, and R. P. Gupta. 2006. “A Comparative Study of Conventional, ANN Black Box, Fuzzy and Combined Neural and Fuzzy Weighting Procedures for Landslide Susceptibility Zonation in Darjeeling Himalayas.” *Engineering Geology* 85 (3–4): 347–366.

Tableau AII .1 : L'ensemble des erreurs de chaque nombre de neurone pour deux couches cachées

i	j	Erreur	1	25	1.15497	2	25	0.550401
1	1	1.132168	2	1	0.610266	3	1	0.560135
1	2	1.175909	2	2	0.579678	3	2	0.556369
1	3	1.175922	2	3	0.546233	3	3	0.535028
1	4	0.643131	2	4	0.546178	3	4	0.528882
1	5	0.643	2	5	0.548716	3	5	0.510703
1	6	1.167934	2	6	0.54606	3	6	0.507913
1	7	1.167945	2	7	0.548509	3	7	0.539314
1	8	1.175907	2	8	0.546041	3	8	0.517796
1	9	0.615425	2	9	0.546009	3	9	0.517796
1	10	0.642944	2	10	0.545673	3	10	0.482229
1	11	1.068002	2	11	0.54601	3	11	0.482466
1	12	1.173438	2	12	0.548773	3	12	0.500482
1	13	0.616178	2	13	0.545973	3	13	0.50487
1	14	1.171812	2	14	0.545965	3	14	0.445696
1	15	0.553318	2	15	0.545978	3	15	0.539244
1	16	0.555082	2	16	0.547284	3	16	0.5178
1	17	1.129183	2	17	0.545981	3	17	0.529971
1	18	1.116917	2	18	0.553491	3	18	0.501201
1	19	0.643219	2	19	0.545972	3	19	0.391138
1	20	1.165056	2	20	0.547289	3	20	0.409325
1	21	1.138112	2	21	0.545955	3	21	0.520649
1	22	1.154238	2	22	0.545957	3	22	0.525825
1	23	1.082617	2	23	0.559418	3	23	0.527573
1	24	0.67482	2	24	0.560082	3	24	0.52058

3	25	0.539253
4	1	0.535884
4	2	0.531171
4	3	0.53019
4	4	0.512484
4	5	0.525658
4	6	0.496641
4	7	0.477055
4	8	0.477578
4	9	0.429555
4	10	0.446363
4	11	0.488712
4	12	0.507583
4	13	0.37377
4	14	0.526782
4	15	0.476102
4	16	0.496374
4	17	0.500774
4	18	0.303475
4	19	0.32995
4	20	0.491962
4	21	0.50231
4	22	0.508911
4	23	0.487211
4	24	0.425061

4	25	0.523538
5	1	0.500229
5	2	0.522641
5	3	0.514851
5	4	0.499048
5	5	0.488504
5	6	0.489426
5	7	0.446983
5	8	0.415848
5	9	0.438255
5	10	0.359334
5	11	0.407555
5	12	0.348263
5	13	0.340028
5	14	0.463706
5	15	0.325594
5	16	0.34522
5	17	0.345779
5	18	0.335384
5	19	0.282421
5	20	0.406628
5	21	0.285034
5	22	0.318625
5	23	0.328177
5	24	0.245249

5	25	0.400149
6	1	0.460635
6	2	0.46198
6	3	0.45472
6	4	0.474459
6	5	0.43706
6	6	0.426661
6	7	0.381777
6	8	0.425718
6	9	0.385218
6	10	0.338776
6	11	0.37743
6	12	0.337337
6	13	0.304842
6	14	0.276815
6	15	0.239728
6	16	0.280509
6	17	0.300288
6	18	0.499034
6	19	0.304721
6	20	0.322588
6	21	0.282649
6	22	0.281627
6	23	0.485222
6	24	0.318094

6	25	0.233079
7	1	0.442007
7	2	0.444992
7	3	0.436482
7	4	0.454709
7	5	0.401627
7	6	0.36724
7	7	0.391501
7	8	0.383502
7	9	0.338122
7	10	0.292526
7	11	0.368361
7	12	0.363857
7	13	0.29722
7	14	0.264426
7	15	0.312516
7	16	0.235846
7	17	0.226239
7	18	0.246412
7	19	0.23759
7	20	0.23595
7	21	0.450873
7	22	0.251627
7	23	0.22797
7	24	0.139466

7	25	0.161697
8	1	0.459685
8	2	0.449137
8	3	0.418929
8	4	0.454441
8	5	0.307493
8	6	0.359782
8	7	0.350016
8	8	0.34695
8	9	0.237556
8	10	0.329992
8	11	0.333702
8	12	0.266175
8	13	0.256893
8	14	0.212389
8	15	0.240054
8	16	0.264804
8	17	0.225102
8	18	0.152155
8	19	0.232
8	20	0.23823
8	21	0.155441
8	22	0.16877
8	23	0.198142
8	24	0.205506

8	25	0.170218
9	1	0.41943
9	2	0.45557
9	3	0.427664
9	4	0.438636
9	5	0.396005
9	6	0.268888
9	7	0.366933
9	8	0.286781
9	9	0.211487
9	10	0.25518
9	11	0.35586
9	12	0.182394
9	13	0.235898
9	14	0.227539
9	15	0.11237
9	16	0.169033
9	17	0.233758
9	18	0.178743
9	19	0.182905
9	20	0.21091
9	21	0.175703
9	22	0.193755
9	23	0.166113
9	24	0.115397

9	25	0.169052
10	1	0.39837
10	2	0.352952
10	3	0.42701
10	4	0.370496
10	5	0.352386
10	6	0.341279
10	7	0.360237
10	8	0.305302
10	9	0.211859
10	10	0.277637
10	11	0.239584
10	12	0.249727
10	13	0.269503
10	14	0.134114
10	15	0.240061
10	16	0.208588
10	17	0.236291
10	18	0.257064
10	19	0.175719
10	20	0.166728
10	21	0.210181
10	22	0.177174
10	23	0.121693
10	24	0.187254

10	25	0.190002
11	1	0.34567
11	2	0.374718
11	3	0.406194
11	4	0.376059
11	5	0.42663
11	6	0.349051
11	7	0.203504
11	8	0.276298
11	9	0.273379
11	10	0.194197
11	11	0.23884
11	12	0.257434
11	13	0.216624
11	14	0.248223
11	15	0.19855
11	16	0.180512
11	17	0.182972
11	18	0.190839
11	19	0.210854
11	20	0.156872
11	21	0.196487
11	22	0.195817
11	23	0.208825
11	24	0.211933

11	25	0.188046
12	1	0.384928
12	2	0.258734
12	3	0.293279
12	4	0.412023
12	5	0.262547
12	6	0.297353
12	7	0.253458
12	8	0.252999
12	9	0.29008
12	10	0.228292
12	11	0.251653
12	12	0.267756
12	13	0.215694
12	14	0.271723
12	15	0.162414
12	16	0.180232
12	17	0.227348
12	18	0.208005
12	19	0.120024
12	20	0.17107
12	21	0.18784
12	22	0.259041
12	23	0.186797
12	24	0.162266

12	25	0.155237
13	1	0.297815
13	2	0.22231
13	3	0.236404
13	4	0.333993
13	5	0.282588
13	6	0.317963
13	7	0.274522
13	8	0.288394
13	9	0.239049
13	10	0.246796
13	11	0.19151
13	12	0.225611
13	13	0.208945
13	14	0.220864
13	15	0.174976
13	16	0.179711
13	17	0.169021
13	18	0.228592
13	19	0.177559
13	20	0.190793
13	21	1.218034
13	22	0.154512
13	23	0.170111
13	24	0.226307

13	25	0.166477
14	1	0.347554
14	2	0.429346
14	3	0.172596
14	4	0.328002
14	5	0.346159
14	6	0.243422
14	7	0.177822
14	8	0.275273
14	9	0.305424
14	10	0.22993
14	11	0.248664
14	12	0.17968
14	13	0.20887
14	14	0.220146
14	15	0.190908
14	16	0.21381
14	17	0.195682
14	18	0.173911
14	19	0.125552
14	20	0.203191
14	21	0.166273
14	22	1.218034
14	23	0.145569
14	24	0.186874

14	25	0.159489
15	1	1.125371
15	2	0.214307
15	3	0.376898
15	4	0.305316
15	5	0.273085
15	6	0.192278
15	7	0.310798
15	8	0.290257
15	9	0.244491
15	10	0.232451
15	11	0.238554
15	12	0.216183
15	13	0.241537
15	14	0.230621
15	15	0.23379
15	16	0.155125
15	17	0.192379
15	18	0.244636
15	19	0.208087
15	20	0.214963
15	21	1.218034
15	22	0.183531
15	23	0.252504
15	24	0.249735

15	25	0.178569
16	1	0.235119
16	2	0.411497
16	3	0.276555
16	4	0.180183
16	5	0.277646
16	6	0.247602
16	7	0.227998
16	8	0.321882
16	9	0.255814
16	10	0.174072
16	11	0.196419
16	12	0.239248
16	13	0.221228
16	14	0.199952
16	15	0.276086
16	16	0.203405
16	17	0.212385
16	18	1.218034
16	19	1.218034
16	20	0.181051
16	21	0.139863
16	22	0.15641
16	23	0.204934
16	24	0.237776

16	25	0.185124
17	1	0.228394
17	2	0.240617
17	3	0.181186
17	4	0.368283
17	5	0.260983
17	6	0.213252
17	7	0.228439
17	8	0.209597
17	9	0.200198
17	10	0.255411
17	11	0.255269
17	12	0.175675
17	13	0.262202
17	14	0.225298
17	15	0.188723
17	16	0.205158
17	17	0.214942
17	18	1.218034
17	19	0.21849
17	20	0.228031
17	21	0.189953
17	22	0.238724
17	23	0.171793
17	24	0.212472

17	25	0.168354
18	1	0.201778
18	2	0.295923
18	3	0.178284
18	4	0.337515
18	5	0.127147
18	6	0.264672
18	7	0.26351
18	8	0.310914
18	9	0.216841
18	10	0.278538
18	11	0.245047
18	12	0.219161
18	13	0.212546
18	14	0.199051
18	15	0.164097
18	16	0.202662
18	17	0.193109
18	18	0.228641
18	19	0.247692
18	20	1.218034
18	21	0.158543
18	22	0.186811
18	23	0.207674
18	24	1.218034

18	25	0.168383
19	1	0.175672
19	2	0.149238
19	3	0.142035
19	4	0.312645
19	5	0.282449
19	6	0.247204
19	7	0.236532
19	8	0.164742
19	9	0.269766
19	10	0.218639
19	11	0.215665
19	12	0.186069
19	13	0.20989
19	14	0.250255
19	15	0.198713
19	16	1.218034
19	17	1.218034
19	18	0.180494
19	19	1.217689
19	20	0.16998
19	21	1.218034
19	22	0.156641
19	23	0.211596
19	24	0.182906

19	25	0.206817
20	1	0.1634
20	2	0.407321
20	3	0.278212
20	4	0.150708
20	5	0.24455
20	6	0.242913
20	7	0.232239
20	8	0.238134
20	9	0.201819
20	10	0.228415
20	11	0.247025
20	12	0.208797
20	13	0.193619
20	14	0.146944
20	15	0.227964
20	16	0.188361
20	17	0.194831
20	18	0.18669
20	19	0.189032
20	20	1.218034
20	21	0.226203
20	22	0.159069
20	23	0.193894
20	24	1.218034

20	25	0.174438
21	1	0.174506
21	2	0.134401
21	3	0.164222
21	4	0.355321
21	5	0.299293
21	6	0.232471
21	7	0.207887
21	8	0.25599
21	9	0.279956
21	10	0.203237
21	11	0.224594
21	12	0.228014
21	13	0.239648
21	14	1.217983
21	15	0.182044
21	16	1.218034
21	17	0.240511
21	18	1.218034
21	19	0.250784
21	20	0.176147
21	21	0.139635
21	22	0.153819
21	23	1.218034
21	24	0.190739

21	25	1.218034
22	1	0.167969
22	2	0.243949
22	3	0.371537
22	4	0.26151
22	5	0.292577
22	6	0.257771
22	7	0.262652
22	8	0.238771
22	9	0.243229
22	10	0.1915
22	11	0.198546
22	12	0.252705
22	13	1.218034
22	14	0.266834
22	15	1.218034
22	16	0.190834
22	17	0.164705
22	18	0.160677
22	19	1.218034
22	20	1.218034
22	21	1.218034
22	22	0.204716
22	23	1.218034
22	24	0.207431

22	25	0.150513
23	1	0.144881
23	2	0.195299
23	3	0.406885
23	4	0.218596
23	5	0.245157
23	6	1.217598
23	7	0.265043
23	8	0.23144
23	9	0.201563
23	10	0.195581
23	11	1.217815
23	12	0.238129
23	13	0.231486
23	14	1.217788
23	15	0.261503
23	16	1.21791
23	17	1.218034
23	18	0.203812
23	19	0.196328
23	20	0.161104
23	21	0.203044
23	22	0.172709
23	23	1.218034
23	24	0.182287

23	25	0.23498
24	1	0.19293
24	2	0.320656
24	3	0.307322
24	4	0.253005
24	5	0.292103
24	6	0.211098
24	7	0.234691
24	8	0.204191
24	9	0.254437
24	10	0.214251
24	11	0.17242
24	12	0.224141
24	13	0.209864
24	14	0.29254
24	15	0.20424
24	16	0.180664
24	17	0.182662
24	18	0.237425
24	19	0.198042
24	20	1.218034
24	21	1.218034
24	22	1.218034
24	23	0.201973
24	24	0.170221

24	25	0.173437
25	1	0.149858
25	2	0.352654
25	3	0.17432
25	4	0.197207
25	5	0.234393
25	6	0.229448
25	7	0.185031
25	8	0.212225
25	9	0.303941
25	10	0.193408
25	11	0.239583
25	12	1.218034
25	13	0.207371
25	14	1.218034
25	15	1.218034
25	16	1.218034
25	17	0.221757
25	18	0.162371
25	19	0.212571
25	20	0.203506
25	21	0.175856
25	22	0.172224
25	23	0.113937
25	24	0.207066
25	25	1.218034