



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Maintenance en instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : MCIL Génie Industriel

Spécialité : Maintenance de l'Automatisme et de l'Instrumentation (MAI)

Thème

Étude des nouvelles techniques de détection
et suivi des particules fines atmosphériques
(PM10, PM2,5 et PM1)

Présenté et soutenu publiquement par :

Mehenni Ben Halfaia Mohamed Ziad Et Mokhtar BenOunen Omar Sidahmed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HAIMOUR		Université Oran 2	Présidente
JELGHOUM		Université Oran 2	Examinatrice
BENABED Khadidja	MCB	Université Oran 2	Encadrante

Année 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreuse, **Dr BENABED Khadidja**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses orientations, ses remarques pertinentes et son expertise ont été d'une grande valeur pour la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Industriel de **l'Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed**, qui ont contribué à notre formation académique et scientifique tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire par leurs conseils, leur aide ou leurs encouragements.

Enfin, nous adressons nos plus profonds remerciements à nos parents, à nos familles et à nos proches pour leur soutien indéfectible, leur confiance, leurs sacrifices et leurs encouragements permanents. Leur appui moral a été une source essentielle de motivation et de réussite.

À toutes ces personnes, nous exprimons notre sincère reconnaissance et notre profonde gratitude.

Dédicace

Avec l'aide d'**Allah**, le Tout-Puissant, et après un long parcours d'efforts et de persévérance, je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

Aucune parole ne pourra exprimer toute ma gratitude et mon amour envers vous. Merci pour vos sacrifices, votre soutien inconditionnel, vos conseils précieux et vos prières qui m'ont toujours donné la force d'avancer. Que Dieu vous protège et vous accorde santé et bonheur.

À mes très chères sœurs et cousines

Merci pour votre présence, vos encouragements et tous les moments de joie partagés. Que notre lien reste toujours fort et rempli d'amour.

À mon binôme **OMAR** , pour sa collaboration, sa patience et son sérieux durant la réalisation de ce projet. Je lui adresse mes sincères remerciements et toute ma considération.

À toute ma grande famille ,

Qui ont été présents durant cette étape importante de ma vie, merci pour votre soutien, et en particulier ma tante qui m'a aidé dans la correction de ce manuscrit

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec beaucoup d'amour, de respect et de reconnaissance.

Mohamed Ziad

Dédicace

Avec la grâce **d'Allah**, Le Tout-Puissant et Le Très Miséricordieux,

je dédie ce modeste travail à **mes très chers parents**, qui ont toujours été pour moi une source de courage, de sacrifice et d'amour inconditionnel. Grâce à leurs prières, leur soutien et leurs encouragements constants, j'ai pu avancer et surmonter les difficultés tout au long de mon parcours.

À **ma mère**, symbole de tendresse, de patience et de générosité, pour tous les sacrifices qu'elle a consentis afin de me voir réussir.

À **mon père**, pour son soutien, sa confiance, ses conseils précieux et tous les efforts qu'il a fournis pour assurer mon avenir.

Je leur exprime à travers ce travail ma profonde reconnaissance et mon immense amour.

À mes chères frères pour leur présence, leur affection et leur soutien permanent. Vous avez toujours été une source de motivation et de bonheur.

À toute **ma famille (couines et cousins)**, pour son amour, ses encouragements et sa bienveillance.

À **mes amis**, qui ont partagé avec moi les meilleurs moments de cette expérience universitaire et qui ont toujours été présents dans les moments difficiles.

À mon binôme **Mohamed ziad**, pour sa collaboration, sa patience et son sérieux durant la réalisation de ce projet. Je lui adresse mes sincères remerciements et toute ma considération.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma réussite et à l'aboutissement de ce mémoire.

Que ce mémoire soit l'expression de ma gratitude et de mon profond respect envers vous tous.

Omar

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة تقنيات الكشف والمراقبة الخاصة بالجسيمات الدقيقة العالقة في الهواء PM10 و PM2.5 و PM1، والتي تُعد من أهم ملوثات الهواء لما لها من آثار سلبية على صحة الإنسان والبيئة. ويهدف هذا البحث إلى تحليل مختلف الطرق التقليدية والحديثة المستخدمة في قياس ومراقبة هذه الجسيمات، مع تقييم أدائها ومزاياها وحدود استخدامها.

تمت دراسة الطرق التقليدية المتمثلة في القياس الوزني، وأخذ العينات بواسطة المرشحات، ومحطات القياس الثابتة، بالإضافة إلى التقنيات الحديثة المعتمدة على المستشعرات البصرية، والمستشعرات الكهروكيميائية، والمستشعرات منخفضة التكلفة، وأنظمة إنترنت الأشياء (IoT)، وتقنيات الاستشعار عن بعد بواسطة الأقمار الصناعية. كما أُجريت دراسة مقارنة اعتماداً على عدة معايير، منها الدقة، والحساسية، وسرعة الاستجابة، والموثوقية، وقابلية النقل، والتكلفة، وإمكانية المراقبة الآنية.

الكلمات المفتاحية: PM10، PM2.5، PM1، تلوث الهواء، جودة الهواء، المستشعرات، إنترنت الأشياء، الاستشعار عن بعد.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude des techniques de détection et de surveillance des particules fines atmosphériques PM10, PM2,5 et PM1, considérées comme des polluants majeurs en raison de leurs impacts sur la santé humaine et l'environnement. L'objectif principal est d'analyser les méthodes de mesure traditionnelles et modernes utilisées pour le suivi de ces particules, tout en évaluant leurs performances, leurs avantages et leurs limites.

L'étude présente les méthodes classiques, telles que la gravimétrie, l'échantillonnage sur filtre et les stations fixes, ainsi que les technologies récentes basées sur les capteurs optiques, les capteurs électrochimiques, les capteurs low-cost, les systèmes connectés IoT et la télédétection satellitaire. Une analyse comparative a été réalisée selon plusieurs critères, notamment la précision, la sensibilité, le temps de réponse, la fiabilité, la portabilité, le coût et la capacité de surveillance en temps réel.

Mots-clés : PM10 ; PM2,5 ; PM1 ; Pollution atmosphérique ; Qualité de l'air ; Capteurs ; IoT ; Télédétection.

Abstract

This thesis focuses on the study of detection and monitoring techniques for atmospheric particulate matter PM10, PM2.5 and PM1, which are considered major air pollutants due to their harmful effects on human health and the environment. The main objective is to analyze both conventional and modern measurement methods used for particulate matter monitoring and to evaluate their performance, advantages and limitations.

The study examines traditional methods such as gravimetric analysis, filter sampling and fixed monitoring stations, as well as modern technologies based on optical sensors, electrochemical sensors, low-cost sensors, Internet of Things (IoT) systems and satellite remote sensing. A comparative analysis was conducted according to several criteria, including accuracy, sensitivity, response time, reliability, portability, cost and real-time monitoring capability.

Keywords: PM10; PM2.5; PM1; Air Pollution; Air Quality; Sensors; IoT; Remote Sensing.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Principaux effets de la pollution par les particules sur la santé	9
Tableau 1.2 : Valeurs guides de l'OMS pour les particules fines (PM _{2,5} et PM ₁₀)	11
Tableau 1.3 : Comparaison des normes européennes actuelles et futures (2030)	12
Tableau 1.4 : Normes algériennes relatives aux particules fines	12
Tableau 1.5 : Comparaison des normes OMS, Union Européenne et Algérie pour les PM ₁₀ .	13
Tableau 1.6 : Classification des indices de qualité de l'air (IQA/ATMO)	14
Tableau 3.1 : Les critères d'évaluation avec une brève description et leur importance pour l'industrie	36
Tableau 3.2 : Comparaison détaillée des capteurs optiques et IoT/Low-cost	37
Tableau 3.3 : Comparaison détaillée des capteurs optiques et IoT/Low-cost	38
Tableau 3.4 : présentation récapitulative des domaines d'application.....	41
Tableau 3.5 : Industrie pétrochimique.....	41
Tableau 3.6 : Milieu urbain (qualité air)	41
Tableau 3.7 : Laboratoires	42
Tableau 3.8 : smart cities.....	42
Tableau 3.9 : Surveillance mobile.....	42
Tableau 4.1 : Avantages des méthodes hybrides	54

Liste des figures

Figure 1.1 : structure de l'atmosphère et variation de la température et de la pression atmosphérique	5
Figure 1.2 : schéma des sources de particules fines	8
Figure 1.3: Schéma global des impacts	10
Figure 2.4: Schéma de prélèvement par cassette sur filtre.	19
Figure 2.5: Schéma d'un capteur optique à diffusion laser.	21
Figure 2.6 : Schéma d'un système IoT de surveillance de la qualité de l'air	22
Figure 2.7 : capteurs de vibrations sans fil Azima Accel 310™	24
Figure 2.8 : Schéma d'un système IoT de surveillance de la qualité de l'air	28
Figure 2.9 : Image satellite illustrant la pollution atmosphérique.....	29
Figure 3.10: Comparaison des temps de réponse des principales techniques de mesure	39
Figure 3.11 : Configuration recommandée des capteurs dans l'industrie pétrochimique	43
Figure 4.12 : Flux de travail de test des émissions et détermination gravimétrique des particules	49
Figure 4.13 : Le principe de fonctionnement d'un compteur de particules basé sur la diffusion Mie.....	50
Figure 4.14 : Découvrez comment le 4650-PM mesure la lumière diffusée vers l'avant.....	51
Figure 4.15 : Procédure complète, depuis la mesure des particules dans les nœuds de capteurs basées sur les cartes matérielles disponibles dans le commerce	52
Figure 4.16 : Comparaison entre (a) le premier ensemble de capteurs PM et de données horaires GRIMM du 8 février 2018 au 15 février 2018, (b) le deuxième ensemble de capteurs PM et de données horaires Dylos du 8 février 2018 au 28 février 2018 et (c) le troisième e ..	55
Figure 4.17 : Mesures PM _{2,5} enregistrées par le capteur Clarity S Node sur les sites de déploiement.....	57

AQI : Air Quality Index (Indice de Qualité de l'Air)

ASTM : American Society for Testing and Materials

ATEX : Atmosphères Explosibles

BAM : Beta Attenuation Monitor

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CAMS : Copernicus Atmosphere Monitoring Service

CO : Monoxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

CPC : Condensation Particle Counter

EEA : European Environment Agency (Agence Européenne pour l'Environnement)

EPA : Environmental Protection Agency

FDMS : Filter Dynamic Measurement System

GAW : Global Atmosphere Watch

GC/MS : Gas Chromatography / Mass Spectrometry (Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse)

IQA : Indice de Qualité de l'Air

IoT : Internet of Things (Internet des Objets)

IR : Infrarouge

ISO : International Organization for Standardization

LOD : Limit Of Detection (Limite de Détection)

MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems

MTBF : Mean Time Between Failures (Temps Moyen Entre Pannes)

NO : Monoxyde d'azote

NO₂ : Dioxyde d'azote

NO_x : Oxydes d'azote

O₃ : Ozone

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OPC : Optical Particle Counter (Compteur Optique de Particules)

PM : Particulate Matter (Particules en Suspension)

PM_{1.0} : Particules de diamètre inférieur ou égal à 1 µm

PM_{2.5} : Particules de diamètre inférieur ou égal à 2,5 µm

PM₁₀ : Particules de diamètre inférieur ou égal à 10 µm

PMT : Photomultiplier Tube (Tube Photomultiplicateur)

PUF : Particules Ultrafines

SO₂ : Dioxyde de soufre

TCO : Total Cost of Ownership (Coût Total de Possession)

TEOM : Tapered Element Oscillating Microbalance

UV : Ultraviolet

µg/m³ : Microgramme par mètre cube

µm : Micromètre

nm : Nanomètre

MIE : Maintenance industrielle électronique

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Résumé.....	V
Liste des tableaux	VI
Liste des figures	VII
Liste des abréviations	VIII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur la pollution atmosphérique et les particules fines	3
1.1 Introduction	4
1.2 Définition de la pollution de l'air	4
1.3 Description de l'atmosphère	4
1.4 Définition des particules fines (PM).....	6
1.5 Classification des particules fines.....	6
1.5.1 PM10.....	6
1.5.2 PM 2,5.....	6
1.5.3 PM 1,0.....	7
1.6 Sources des particules fines.....	7
1.6.1 Sources naturelles	7
1.6.2 Sources anthropiques	7
1.7 Impacts des particules fines sur la santé humaine	8
1.7.1 Principaux effets de la pollution par les particules sur la santé.....	9
1.8 Impacts des particules fines sur l'environnement.....	9
1.9 Intérêt du génie industriel dans la réduction des émissions de particules.....	10
1.9 Normes et réglementations relatives à la qualité de l'air	11
1.9.1 Recommandations de l'OMS	11
1.9.2 Normes européennes	11
1.9.3 Normes européennes actuelles et nouvelles (2030-2050) :	11
1.9.4 Réglementation algérienne	12
1.9.5 Comparaison des normes pour PM ₁₀ :.....	12
1.10 Indicateurs de qualité de l'air (IQA).....	13
1.10.1 Définition de l'indice de qualité de l'air :	13
1.10.2 Méthodes de calcul.....	13
1.10.2.1 Méthode dessous-indice (Québec).....	13
1.10.2.2 Méthode européenne (indice ATMO) Pour chaque station de mesure, on relève :	13

1.10.3 Interprétation des niveaux de pollution.....	14
1.11 Surveillance mondiale de la qualité de l'air.....	14
1.12 Conclusion.....	16
Chapitre 2 : Techniques de détection des particules fines	17
2.1 Introduction	18
2.2 Méthodes classiques	18
2.2.1 Méthode gravimétrique	18
2.2.2 Echantillonnage sur filtre	19
2.2.3 Stations fixes.....	19
2.3 Techniques modernes.....	20
2.3.1 Capteurs optiques : laser scattering.....	20
2.3.2 Capteurs électrochimiques	21
2.3.3 Capteurs low-cost	22
2.3.4 Capteurs à condensation (CPC – Condensation Particle Counter).....	22
2.3.4.2 Avantages et limites du CPC	23
2.3.5 Capteurs basés sur l'effet piézoélectrique.....	24
2.3.6 Analyseurs TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)	25
2.3.7 Analyseurs BAM (Beta Attenuation Monitor)	26
2.4 Nouvelles approches	27
2.4.1 IoT.....	27
2.4.2 Télédétection par satellites	28
2.4.3 Comparaison des performances des différentes techniques	29
2.5 Conclusion.....	30
Chapitre 3 : Evaluation et sélection des techniques de mesure.....	32
3.1 Introduction	33
3.2 Critères d'évaluation des techniques	33
3.3 Analyse comparative des méthodes classiques et modernes.....	35
3.3.1 Méthodologie de comparaison.....	39
3.4 Analyse des critiques des performances	39
3.4.1 Les atouts des méthodes performantes.....	39
3.4.2 Limites des méthodes limitées.....	40
3.4.3 Conséquences pratiques et recommandations	40
3.5 Choix des techniques selon l'application.....	40
3.6 Synthèse comparative et discussion.....	43
3.6.1 Récapitulatif synthétique	43
3.6.2 Meilleure solution selon le contexte	44
3.6.3 Limitations de l'étude et recommandations	44
3.7 Conclusion.....	44

Chapitre 4 : Discussions et perspectives futures	46
4.1 Introduction	47
4.2 Critères de comparaison des techniques	47
4.2. 1 Sensibilité et limite de détection	47
4.2.2 Précision et fiabilité	47
4.2.3 Temps de réponse.....	47
4.2.4 Coût d'installation et de maintenance	48
4.2.5 Facilité d'utilisation	48
4.2.6 Couverture spatiale et temporelle	48
4.2.7 Formulation académique prête à insérer	48
4.3 Méthodes gravimétriques.....	48
4.4 Capteur de particule	49
4.5 Méthodes optiques traditionnelles	50
4.6 Comparaison des nouvelles techniques de détection.....	51
4. 6. 1 Capteurs à bas coût	51
4.6.2 Internet des objets	52
4. 6. 3 Télédétection par satellite.....	52
4.6.4 Réseaux de capteurs intelligents.....	53
4.6.5 Intelligence artificielle et apprentissage automatique	53
4.6.6 Utilisation du Machine Learning pour corriger les erreurs de mesure	53
4.7 Méthodes hybrides de surveillance.....	53
4.7.1 Combinaison de multiples sources :	53
4.7.2 Avantages des méthodes hybrides.....	54
4.8 Discussion des résultats	54
4.8.1 Techniques les plus performantes	54
4.8.2 Techniques les plus économiques	55
4.8.3 Solutions adaptées aux pays en développement	56
4.8.4 Perspectives futures	56
4.9 Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	59
Bibliographie.....	62

Introduction générale

Actuellement, l'environnement et la santé humaine sont fortement impactés par détérioration de la qualité de l'air. Cette situation résulte principalement de l'urbanisation accélérée, du développement industriel croissant et de l'augmentation du trafic routier. Ces facteurs ont entraîné une élévation significative des niveaux de pollution atmosphérique, notamment dans les zones urbaines. Parmi les différents polluants présents dans l'air, les particules fines occupent une place centrale en raison de leur impact direct sur la santé humaine et de leur capacité à pénétrer profondément dans l'organisme.

Les particules fines (PM_{1.0}, PM_{2.5} et PM₁₀) correspondent à des polluants atmosphériques constitués de particules solides ou liquides de très petite taille, en suspension dans l'air et classées selon leur diamètre. Elles se distinguent par leur aptitude à pénétrer dans l'appareil respiratoire ; en effet, plus leur taille est réduite, plus elles sont capables d'atteindre les régions profondes des poumons, entraînant ainsi des effets potentiellement nocifs sur la santé humaine.

Les PM₁₀ peuvent atteindre les voies respiratoires supérieures, tandis que les PM_{2.5} et les PM_{1.0} peuvent parvenir jusqu'aux alvéoles pulmonaires, voire pénétrer dans la circulation sanguine. Ces particules proviennent aussi bien de sources naturelles, comme les éruptions volcaniques et les incendies de forêt, que de sources humaines, en particulier les émissions issues des gaz d'échappement des véhicules.

Face aux risques liés aux particules fines, leur surveillance et leur détection sont devenues une priorité pour les organismes de santé et de protection de l'environnement. Les méthodes classiques de mesure, bien que fiables, présentent certaines limites en termes de coût, de complexité et de résolution spatio-temporelle. Ainsi, le développement de nouvelles techniques de détection et de suivi apparaît nécessaire afin d'améliorer la précision des mesures, de permettre un suivi en temps réel et de mieux comprendre la dispersion des polluants.

Par ailleurs, ces dernières années ont été marquées par l'émergence de nombreuses innovations technologiques, notamment les capteurs miniaturisés, les systèmes basés sur l'Internet des objets (IoT),

la télédétection satellitaire ainsi que les méthodes d'analyse fondées sur l'intelligence artificielle. Ces avancées offrent de nouvelles perspectives pour une surveillance plus performante, continue et intégrée de la qualité de l'air, tout en facilitant les processus d'aide à la décision et la mise en œuvre de stratégies de réduction de la pollution.

Dans ce contexte, le présent travail s'inscrit dans une approche visant à étudier les nouvelles techniques de détection et de surveillance des polluants atmosphériques, en particulier les particules fines PM1.0, PM2.5 et PM10. L'objectif principal est d'examiner le fonctionnement de ces techniques, d'évaluer leurs performances ainsi que leurs limites, et d'analyser leur contribution potentielle à l'amélioration de la qualité de l'air et à la préservation de la santé publique.

Pour aboutir à notre objectif, notre mémoire comporte quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général sur la pollution atmosphérique et les particules fines.
- Les différentes techniques de détection des particules sont données au deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse comparative des techniques.
- Dans le quatrième chapitre sont exposés les limites de ces techniques ainsi que les perspectives futures.

Chapitre 1 : Généralités sur la pollution atmosphérique et les particules fines

1.1 Introduction

La pollution de l'air constitue un enjeu crucial pour la santé publique et l'environnement, avec les particules fines (PM) servant d'indicateur principal de la qualité de l'air. Ces particules en suspension sont classées selon leur taille : PM₁₀ (< 10 µm), PM_{2,5} (< 2,5 µm) et PM_{1,0} (< 1 µm), chacune présentant des sources, des compositions et des effets variés sur la santé.

Ce chapitre aborde les notions fondamentales liées à la pollution atmosphérique et aux particules fines, en détaillant leurs définitions, leurs origines naturelles et humaines, leurs propriétés physico-chimiques ainsi que leurs impacts sur la santé et l'environnement. Ces éléments constituent les bases nécessaires à la compréhension des nouvelles méthodes de détection et de suivi développées dans cette étude.

1.2 Définition de la pollution de l'air

La pollution de l'air fait référence à toute altération de la composition naturelle de l'air due à l'ajout de substances (gazeuses, solides ou liquides) susceptibles d'être préjudiciables à la santé humaine, aux écosystèmes et aux matériaux. Elle découle à la fois de processus naturels (tels que les éruptions volcaniques, les poussières du désert, les incendies de forêt...) et d'actions humaines (comme le transport, l'industrie, le chauffage, l'agriculture, etc.) [1].

Au niveau urbain et industriel, la pollution atmosphérique est fréquemment liée à l'émission de gaz nuisibles (CO, NO, NO₂, SO₂, Composés Organiques Volatils (COV)) et de particules en suspension qui altèrent la qualité de l'air ambiant au-delà des limites préconisées par les organismes internationaux (OMS, directives européennes, réglementations nationales) [2].

1.3 Description de l'atmosphère

Avant d'aborder la composition chimique de l'atmosphère, il est important de décrire d'abord sa structure. L'environnement terrestre se divise en plusieurs couches, chacune constituant un réservoir de matières entre lesquels se produisent des échanges. Les limites de ces couches sont définies par des discontinuités dans les variations de la température, de la pression, de la densité, ainsi que par la présence de différents gaz selon l'altitude. [3].

• La troposphère

La température baisse avec l'altitude (huit à quinze kilomètres), elle est plus élevée à sa base qu'à son sommet car le sol terrestre émet des IR et réchauffe l'air à son contact. L'épaisseur de cette couche varie entre treize et seize kilomètres à l'équateur et entre sept et huit kilomètres

aux pôles. La pression et la densité sont maximales car la troposphère contient entre 80 et 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est la couche où se produisent les phénomènes météorologiques (pluie, nuages) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (les vents, convections thermiques). C'est dans cette zone que sont émis les polluants. [3].

- **La stratosphère**

La température augmente avec l'altitude jusqu'à 0°C. Le plus remarquable dans cette couche, c'est qu'il y a la présence à 25 km d'altitude d'une couche d'ozone de plusieurs kilomètres, et dont l'épaisseur est variable sur toute sa surface. C'est une couche stable où les polluants peuvent séjourner ou être détruits principalement grâce au rayonnement UV.

- **La mésosphère**

La température baisse avec l'altitude jusqu'à -80°C.

- **La thermosphère**

La température augmente avec l'altitude et la densité est très faible tout comme la pression qui est de l'ordre de 10⁻⁶ mmHg. On peut considérer que les conditions sont similaires à celles du vide[3].

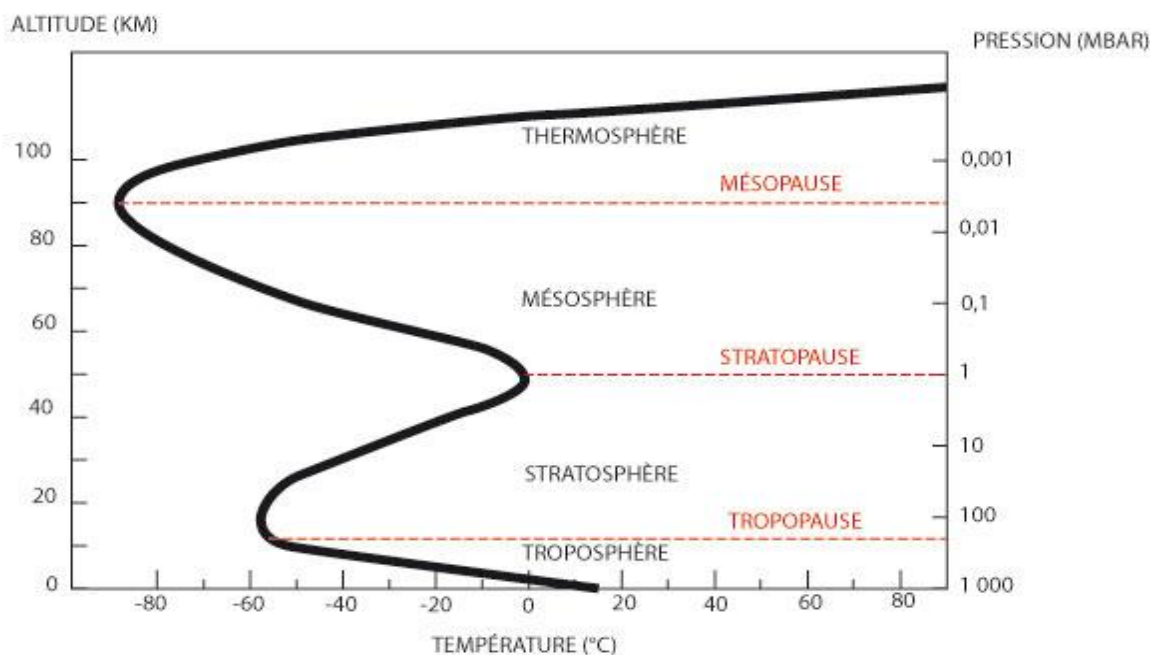


Figure 1.1 : structure de l'atmosphère et variation de la température et de la pression atmosphérique

1.4 Définition des particules fines (PM)

Les particules en suspension, également connues sous l'acronyme PM (Particulate Matter), désignent des particules solides ou liquides de très petite dimension, véhiculées par l'air et communément dénommées aérosols. On distingue différentes classes de particules selon leur diamètre aérodynamique : PM₁₀, PM_{2,5} et PM_{1,0}, ces trois catégories étant particulièrement importantes pour les études de qualité de l'air et de santé publique [3].

Les particules fines ont pour origine, d'une part, des sources naturelles (comme l'érosion causée par le vent, les embruns marins, les poussières de désert et les incendies naturels), et d'autre part, des sources humaines liées aux activités industrielles, au transport routier, au chauffage et à la combustion de combustibles fossiles. Leur danger dépend non seulement de leur taille, mais aussi de leur composition chimique (métaux lourds, composés organiques, sulfates, nitrates, etc.) [4].

1.5 Classification des particules fines

1.5.1 Particule fine (PM₁₀)

Les PM₁₀ se réfèrent aux particules en suspension ayant un diamètre aérodynamique de 10 micromètres (µm) ou moins. On les désigne fréquemment comme des « particules grossières » et elles ont la capacité de pénétrer dans les voies respiratoires supérieures (nez, gorge, bronches supérieures), entraînant des irritations et des problèmes respiratoires [5]. Les PM₁₀ proviennent principalement de la circulation routière (usure des pneus et freins), de la poussière soulevée par le vent, des chantiers de construction, de certains procédés industriels (comme la production de ciment, le bâtiment et travaux publics, etc.) et des particules naturelles transportées par le vent [6].

1.5.2 Particules fine (PM_{2,5})

Les PM_{2,5} font référence aux particules dont le diamètre ne dépasse pas 2,5 µm. On les considère comme des particules extrêmement fines qui s'infiltrant profondément dans les bronches et les alvéoles pulmonaires, ce qui intensifie leur impact sur la santé respiratoire et cardiovasculaire [7].

Les sources principales de PM_{2,5} comprennent les activités de combustion (comme les moteurs diesel, le chauffage résidentiel au bois ou au charbon, et les centrales thermiques), la production secondaire de nitrates et sulfates dérivant du NO_x et SO₂, ainsi que divers procédés industriels (tels que la métallurgie, les fonderies et les traitements thermiques). À la différence des PM₁₀,

les PM_{2,5} ont tendance à se rassembler dans l'air environnant et peuvent être déplacées sur de vastes étendues [8].

1.5.3 Particule fine PM 1,0

Les PM_{1,0} (aussi appelées particules ultrafines) se définissent comme des particules ayant un diamètre inférieur à 1 µm. Du fait de leur taille réduite, ils peuvent traverser la barrière alvéolo-capillaire, ce qui accroît le risque de propagation dans le sang et les organes internes, notamment le système cardiovasculaire et potentiellement le système nerveux [9]. Ces particules sont essentiellement issues de combustions à haute température (comme les moteurs, chaudières, incinérateurs) et de divers procédés industriels (tels que le soudage, le moulage, la pulvérisation, etc). Leur effet sur la santé est particulièrement alarmant pour ceux qui souffrent déjà de maladies respiratoires ou cardiovasculaires [10].

1.6 Sources des particules fines

1.6.1 Sources naturelles

- Les poussières désertiques et érosion éolienne transportées par le vent sur de grandes distances.
- Les embruns marins, qui génèrent des aérosols de sel en suspension dans l'air.
- Les incendies de forêts naturels, les éruptions volcaniques et les feux de biomasse non contrôlés.

Ces sources jouent un rôle majeur dans l'augmentation des niveaux de PM₁₀ et PM_{2,5}, notamment dans certaines zones (à proximité de déserts, régions côtières, zones volcaniques) [5].

1.6.2 Sources anthropiques

Les sources anthropiques sont les principales responsables de la pollution atmosphérique dans les zones urbaines et industrielles. On distingue :

- Le transport par route : émissions de gaz nocifs, particules de suie, usure des pneus et des freins, poussière soulevée par la circulation.
- Les secteurs industriels (sidérurgie, cimenterie, raffineries, métallurgie, traitement de matériaux) qui émettent des particules directement associées aux procédés thermiques, mécaniques et chimiques.
- L'utilisation de combustibles domestiques tels que le bois, le charbon ou les déchets, ainsi que les tâches agronomiques (labourage, intégration de fumiers, pulvérisation)

sont incluses Dans le cadre du génie industriel, une grande partie des efforts porte sur la réduction des émissions à la source (optimisation des procédés, filtration, traitement des fumées) et sur la maîtrise des émissions diffuses (poussières lors du transport et du stockage) [11].

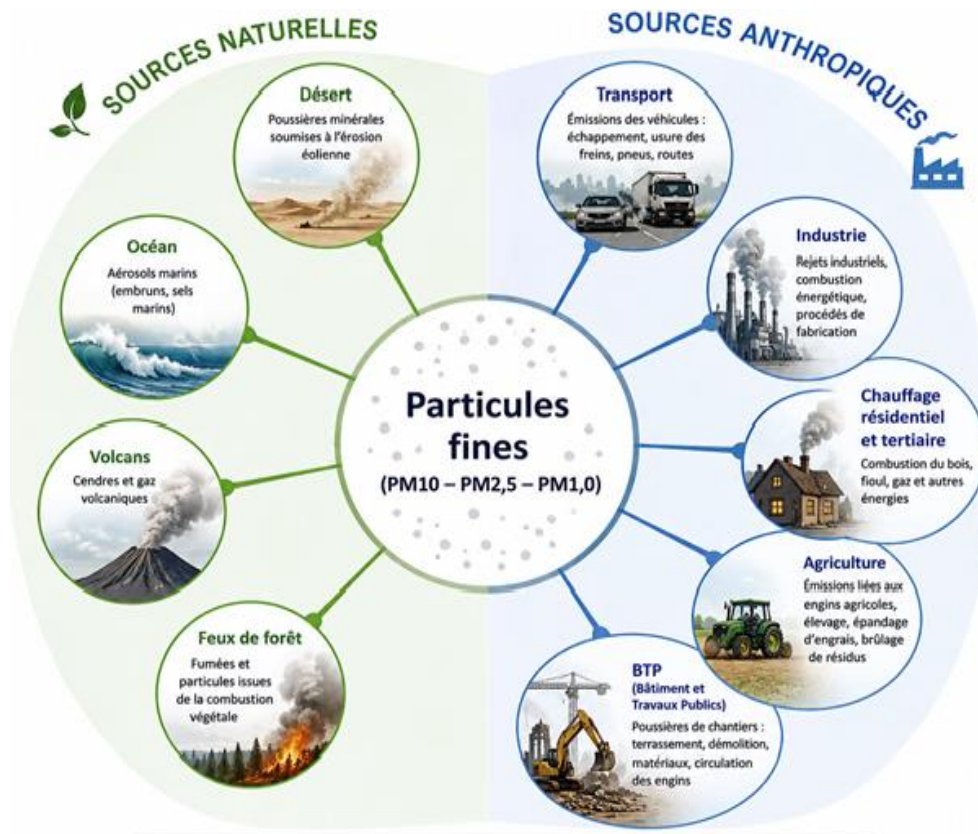


Figure 2 : schéma des sources de particules fines

Ce schéma illustre visuellement la diversité des origines et la prédominance des sources liées aux activités humaines dans les zones urbaines et industrielles.

1.7 Impacts des particules fines sur la santé humaine

Il existe une association significative entre l'exposition aux particules fines, notamment PM_{2,5} et PM_{1,0}, et l'aggravation des pathologies respiratoires et cardiovasculaires. Sur le court terme, une hausse des niveaux de PM₁₀ et PM_{2,5} pourrait entraîner un accroissement des admissions à l'hôpital, des visites liées à l'asthme, la bronchite et les épisodes d'insuffisance respiratoire.

Sur le long terme, une exposition régulière aux particules fines accroît le danger de contracter des affections pulmonaires durables, des troubles cardiovasculaires (crise cardiaque, AVC) et

potentiellement des cancers du poumon. Les groupes les plus exposés sont les enfants, les seniors, les fumeurs et les personnes souffrant de pathologies respiratoires ou cardiovasculaires préexistantes [12].

1.7.1 Principaux effets de la pollution par les particules sur la santé

Les particules atmosphériques ont des effets néfastes sur la santé, notamment sur les systèmes respiratoire et cardiovasculaire. Les personnes âgées, les enfants et les individus souffrant de maladies chroniques sont les plus vulnérables

Tableau 1.1 : Principaux effets de la pollution par les particules sur la santé

Catégorie	Effets principaux sur la santé	Populations particulièrement vulnérables
PM10	Irritations des voies respiratoires, toux, bronchite, aggravation de l'asthme aude.	Personnes âgées, fumeurs, enfants, asthmatiques
PM2,5	Maladies respiratoires chroniques, maladies cardiovasculaires, risque de cancers pulmonaires.	Personnes souffrant de maladies respiratoires ou cardiovasculaires
PM1,0	Pénétration profonde dans les alvéoles, effets potentiels sur le système cardiovasculaire et neurologique	Personnes avec pathologies chroniques et travailleurs exposés dans l'industrie

1.8 Impacts des particules fines sur l'environnement

Les particules fines n'affectent pas uniquement la santé des humains ; elles ont aussi un impact notable sur l'environnement. Les dépôts de particules sur le sol et l'eau peuvent entraîner l'acidification, la modification de la fertilité du sol et la perturbation des écosystèmes aquatiques.

Les particules se déposent aussi sur les plantes, ce qui peut diminuer la photosynthèse et entraîner des baisses de productivité agricole ou des dégradations forestières. Sur les édifices et les monuments, l'accumulation de poussière et de suie provoque un assombrissement des façades, une formation de croûtes et une corrosion accélérée des matériaux [5].

De plus, certaines particules entrent en interaction avec la lumière du soleil et les nuages, ce qui affecte l'équilibre radiatif et joue un rôle complexe dans le changement climatique (qui peut entraîner un refroidissement ou un réchauffement selon leur composition) [10].

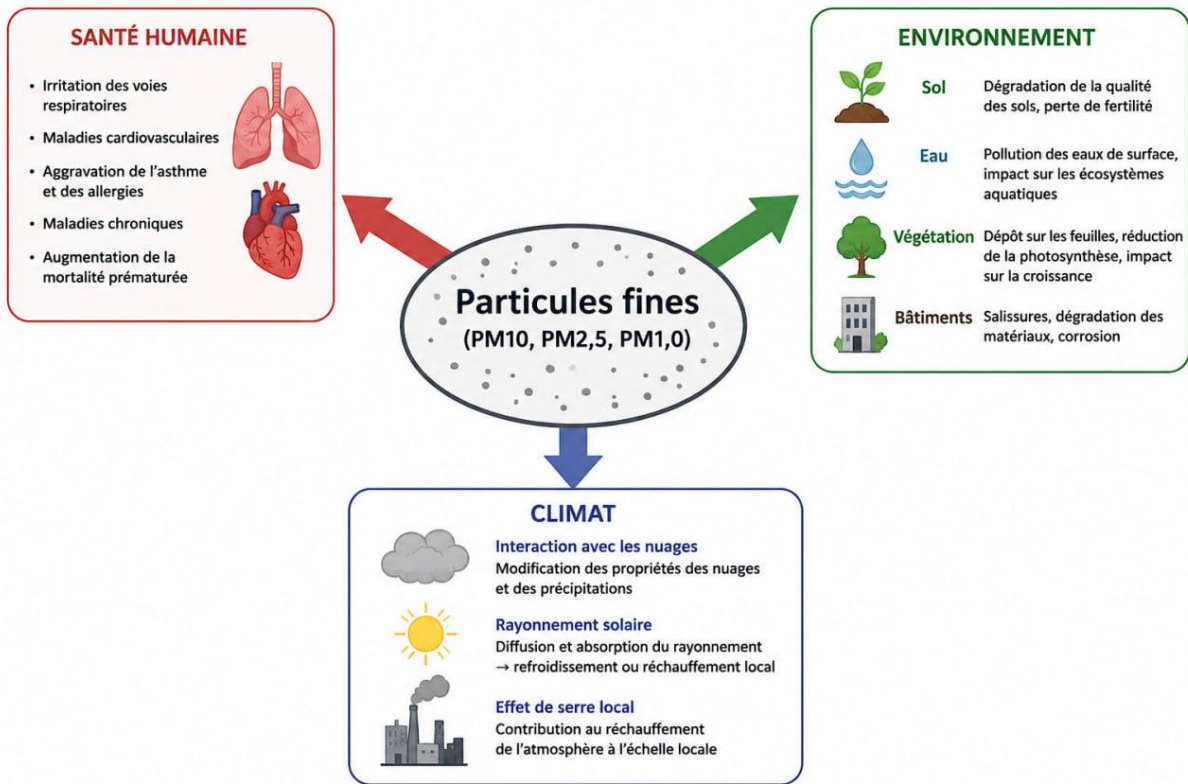


Figure 1.3: Schéma global des impacts

Ce schéma permet de montrer, en une seule vue, la multi dimensionnalité du problème et justifie l'intérêt d'une approche ingénierie pour maîtriser ces émissions

1.9 Intérêt du génie industriel dans la réduction des émissions de particules

Dans le domaine du génie industriel, le contrôle de la pollution de l'air implique l'identification, la mesure et la réduction des émissions de particules à leur origine. Cela implique l'amélioration des procédés (température, pression, ventilation), la sélection de matériaux moins polluants, l'implémentation de systèmes de purification (filtres à manches, électrofiltres, nettoyage des gaz) et l'établissement d'indicateurs de performance écologique [13].

1.9 Normes et réglementations relatives à la qualité de l'air

1.9.1 Recommandations de l'OMS

En septembre 2021, l'Organisation Mondiale de la Santé a publié ses nouvelles Lignes directrices mondiale pour la qualité de l'air, avec une troisième mise à jour des valeurs guides. Ces recommandations sont basées sur l'état des connaissances scientifiques concernant l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé

Valeurs guides OMS pour les particules fines (2021) :

Pour les PM_{2,5}, la valeur annuelle a été sévèrement réduite, passant de 10 µg/m³ (2005) à 5 µg/m³ (2021). Pour l'OMS, une exposition chronique ne doit pas dépasser 10 µg/m³ en moyenne annuelle pour les PM_{2,5} et 20 µg/m³ pour les PM₁₀ selon l'ancienne directive [13].

Tableau 1.2 : Valeurs guides de l'OMS pour les particules fines (PM_{2,5} et PM₁₀)

Polluant	Valeur annuelle	Valeur 24 heures
PM _{2,5}	5 µg/m ³	15 µg/m ³
PM ₁₀	15 µg/m ³	45 µg/m ³

1.9.2 Normes européennes

Le droit européen fixe des valeurs limites en concentration pour les polluants atmosphériques, en tenant compte des valeurs guides de l'OMS. L'Union européenne a récemment adopté une nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air ambiant (2024) avec un renforcement significatif des normes[14]

1.9.3 Normes européennes actuelles et nouvelles (2030-2050) :

La directive européenne divise par deux les valeurs limites annuelles à atteindre d'ici le 1er janvier 2030 pour plusieurs polluants. Le seuil de pollution à ne pas dépasser est désormais fixé à 10 µg/m³ par an pour les PM_{2,5} et 20 µg/m³ pour les PM₁₀. Les nouvelles normes s'alignent progressivement sur les recommandations de l'OMS d'ici 2050[14]

Tableau 1.3 : Comparaison des normes européennes actuelles et futures (2030)

Polluant	Valeur actuelle	Nouvelle valeur (2030)
PM _{2,5}	20 µg/m ³ (annuel)	10 µg/m ³
PM ₁₀	40 µg/m ³ (annuel)	20 µg/m ³
NO ₂	40 µg/m ³ (annuel)	20 µg/m ³

1.9.4 Réglementation algérienne

L'Algérie dispose de sa propre réglementation définie principalement par le Décret exécutif n° 06-02 du 7 janvier 2006 qui fixe les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique[15].

Normes algériennes pour les particules :

Tableau 1.4 : Normes algériennes relatives aux particules fines

Polluant	Norme algérienne
PM ₁₀	80 µg/m ³
PM _{2,5}	Non spécifié dans le décret

Les niveaux de particules fines recommandés par l'OMS sont de 10 µg/m³ (ancien standard), contre 25 µg/m³ pour l'Union Européenne et 80 µg/m³ selon la réglementation algérienne

L'Algérie agit réglementairement en se focalisant essentiellement sur la réduction des émissions par l'approche réglementaire. La réglementation algérienne sur la protection de l'environnement inclut également la loi 83-03 et la loi 03-10 qui établit des normes pour les installations. Un autre décret pertinent est le Décret exécutif n° 06-138 du 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs et particules [15].

1.9.5 Comparaison des normes pour PM₁₀:

Les normes algériennes sont donc 5 à 8 fois plus élevées que les recommandations de l'OMS, ce qui représente un enjeu important pour la surveillance et le contrôle de la qualité de l'air, particulièrement dans les zones urbaines comme Oran et Bir el Djir [13].

Tableau 1.5 : Comparaison des normes OMS, Union Européenne et Algérie pour les PM₁₀

Niveau	Valeur	Rapport avec OMS
OMS (2021)	15 µg/m ³	Référence
UE (actuelle)	40 µg/m ³	2,7× OMS
UE (2030)	20 µg/m ³	1,3× OMS
Algérie	80 µg/m ³	5,3× OMS

1.10 Indicateurs de qualité de l'air (IQA)

1.10.1 Définition de l'indice de qualité de l'air :

L'indice de qualité de l'air (IQA) est une mesure synthétique qui résume différentes données sur la pollution atmosphérique en une seule valeur. Cet indice, aussi appelé AQI (Air Quality Index), permet d'évaluer globalement la qualité de l'air en combinant les concentrations de plusieurs polluants (exprimées en µg/m³) en fonction de leur impact sur la santé. [16].

1.10.2 Méthodes de calcul

Plusieurs méthodes sont utilisées pour calculer l'IQA :

1.10.2.1 Méthode sous-indice (Québec)

Pour chaque polluant mesuré (ozone, particules fines, SO₂, NO₂, CO), on calcule un sous-indice selon la formule :

$$\text{Sous-indice} = \frac{\text{Concentration mesurée}}{\text{Valeur de référence}} \times 50$$

L'IQA final correspond au sous-indice le plus élevé parmi tous les polluants.

1.10.2.2 Méthode européenne (indice ATMO) Pour chaque station de mesure, on relève :

- ✓ La concentration horaire maximale de NO₂
- ✓ La concentration horaire maximale d'O₃

- ✓ La concentration journalière de PM_{10}

On calcule ensuite la moyenne des concentrations maximales de toutes les stations. Ces valeurs sont classées sur une échelle à dix niveaux définis par les normes françaises et européennes.

1) Formule :

$$AQI = f\left(\frac{C}{C_{ref}}\right)$$

où C est la concentration mesurée et C_{ref} la concentration de référence [17].

1.10.3 Interprétation des niveaux de pollution

L'indice ATMO français varie de 1 à 10, accompagné d'un code couleur indiquant le niveau de pollution et les risques sanitaires associés :

Seuils d'alerte :

Tableau 1.6 : Classification des indices de qualité de l'air (IQA/ATMO)

Indice	Couleur	Niveau de pollution	Risques sanitaires
1-2	Vert	Très bon	Aucun
3-4	Jaune	Bon	Aucun pour la population générale
5-6	Orange	Dégradable	Risque pour les personnes sensibles
7-8	Rouge	Mauvais	Risque pour toute la population
9-10	Pourpre	Très mauvais	Risque grave, nécessitant des mesures d'urgence

- **Seuil d'information/recommandation** : au-delà de ce niveau, une exposition courte peut présenter un risque pour la santé, surtout pour les personnes sensibles

1.11 Surveillance mondiale de la qualité de l'air

1.11.1 Réseaux internationaux de surveillance

1. Programme de surveillance de l'OMS

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) coordonne un réseau mondial qui collecte

des données dans plus de 6 000 villes réparties dans plus de 100 pays, facilitant ainsi les comparaisons internationales de la qualité de l'air.

2. Réseau européen de qualité de l'air

- EEA (Agence européenne pour l'environnement) : plus de 3 000 stations dans 38 pays européens.
- CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) : surveillance par satellites et modélisation atmosphérique.

3. US EPA AirNow

Les États-Unis disposent de plus de 4 000 stations de mesure gérées par l'Agence de protection de l'environnement (EPA), diffusant quotidiennement les indices de qualité de l'air (AQI).

4. Global Atmosphere Watch (GAW)

Programme de l'OMS ciblant les polluants transportés sur de longues distances, avec plus de 100 stations de référence à travers le monde. [18].

Exemples de stations de mesure

- Stations américaines
 - *Los Angeles-North Main Street* : station de référence pour les particules fines ($PM_{2,5}$)
 - *New York-Queens* : surveillance approfondie du dioxyde d'azote (NO_2) et de l'ozone (O_3)
- Stations européennes
 - *Paris-Opéra (France)* : station urbaine dense mesurant PM_{10} et NO_2
 - *London-Marylebone (Royaume-Uni)* : surveillance liée au trafic routier
 - *Berlin-Neukölln (Allemagne)* : station de référence pour les $PM_{2,5}$
- Stations asiatiques
 - *Beijing-Dongcheng (Chine)* : surveillance intensive depuis 2013
 - *Tokyo-Shinjuku (Japon)* : réseau de plus de 40 stations
- Stations en Algérie
 - *Alger-Centre* : première station algérienne (depuis 2008)
 - *Oran* : station urbaine de surveillance
 - *Constantine* : station de référence pour le nord-est du pays

Équipements de mesure utilisés

Les stations sont équipées d'appareils automatisés effectuant des mesures en continu de :

- Particules fines (PM_{10} , $PM_{2,5}$) via bêta-gauge ou méthodes optiques
- NO_2 et SO_2 par spectrométrie UV
- O_3 par spectrométrie UV
- CO par détection infrarouge[19].

1.12 Conclusion

La pollution atmosphérique représente aujourd'hui un défi majeur pour la santé publique et la protection de l'environnement. Parmi les polluants, les particules fines (PM_{10} , $PM_{2,5}$ et $PM_{1,0}$) se distinguent par leur capacité à pénétrer profondément dans le système respiratoire, provoquant des effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes.

Ce chapitre a présenté les concepts fondamentaux liés à la pollution de l'air, la composition de l'atmosphère, les caractéristiques des particules fines, ainsi que leurs principales sources naturelles et humaines.

Les impacts sanitaires et environnementaux des particules fines ont été soulignés, mettant en lumière l'urgence de déployer des stratégies efficaces pour leur surveillance et leur réduction. L'analyse des normes internationales et nationales, des indices de qualité de l'air et des réseaux de surveillance a également montré l'importance d'un suivi continu pour améliorer la qualité de l'air.

Ces connaissances constituent une base essentielle pour comprendre les techniques de détection et de contrôle des particules fines. Le chapitre suivant sera dédié aux méthodes et technologies employées pour la mesure, le contrôle et le suivi des particules fines dans l'air ambiant.

Chapitre 2 : Techniques de détection des particules fines

2.1 Introduction

La surveillance de la qualité de l'air et le suivi des particules fines (PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₁₀) requièrent des techniques de détection fiables, précises et adaptées aux diverses échelles de mesure. En raison des impacts sanitaires et environnementaux importants de ces polluants, le développement et l'amélioration des méthodes de détection représentent un enjeu scientifique et technologique majeur.

Les techniques de détection ont beaucoup évolué, passant des méthodes traditionnelles de pesée gravimétrique à des technologies modernes basées sur des principes optiques, électriques et chimiques. Chaque méthode offre des avantages et des limites propres selon le type de particules ciblé, la sensibilité nécessaire, et le contexte d'utilisation (surveillance continue, mesures ponctuelles, recherche scientifique).

Ce chapitre propose un état de l'art des différentes techniques de détection des particules fines, en analysant leurs principes, leurs performances, ainsi que leurs applications pratiques dans la surveillance de la qualité de l'air.

2.2 Méthodes classiques

Plusieurs méthodes de mesure sont utilisées pour détecter les particules fines, et les techniques traditionnelles continuent de jouer un rôle significatif dans les recherches environnementales et industrielles. On apprécie ces techniques pour leur simplicité, leur fiabilité et leur statut courant comme méthodes de référence dans l'évaluation des concentrations de particules [14].

2.2.1 Méthode gravimétrique

L'une des méthodes les plus couramment employées pour mesurer la masse des particules fines présentes dans un échantillon est la technique gravimétrique. Cette méthode implique de forcer un volume d'air déterminé à travers un filtre qui a été pesé au préalable, dans le but de capturer les particules en suspension. Une fois le prélèvement effectué, le filtre est ensuite repesé pour déterminer la masse collectée. Cette disparité de masse, en relation avec le volume d'air aspiré, permet de déterminer la concentration des particules fines dans l'air sur une base massique [15]. On considère cette approche comme la norme, car elle s'appuie directement sur la quantification de la masse plutôt que sur une estimation indirecte. Elle est spécifiquement conçue pour le suivi des particules PM₁₀, PM_{2.5} et d'autres fractions particulaires dans les environnements industriels et atmosphériques. Cependant, elle présente certaines limites, notamment un temps

d'analyse plus long et une sensibilité aux conditions de température et d'humidité, qui peuvent influencer la pesée du filtre [16].

2.2.2 Echantillonnage sur filtre

Le procédé de filtrage par échantillonnage consiste à aspirer un courant d'air à travers un filtre conçu pour capturer les particules fines. Par la suite, le filtre peut être soumis à une analyse en laboratoire pour effectuer une pesée, ainsi que des examens chimiques ou morphologiques en fonction des objectifs de l'étude. Cette méthode permet non seulement de mesurer la masse des particules, mais également d'identifier leur composition, ce qui est bénéfique pour l'étude des sources de pollution industrielle [17].

Cette technique revêt une grande importance pour la surveillance de la qualité de l'air dans les ateliers, les zones de production ou encore les environnements soumis aux particules. Elle offre une évaluation intégrée sur une période spécifique, fournissant ainsi une représentation fidèle de l'exposition moyenne. Cependant, son efficacité est conditionnée par le débit d'aspiration, le genre de filtre employé et les conditions dans lesquelles l'échantillon est conservé après sa collecte [18].

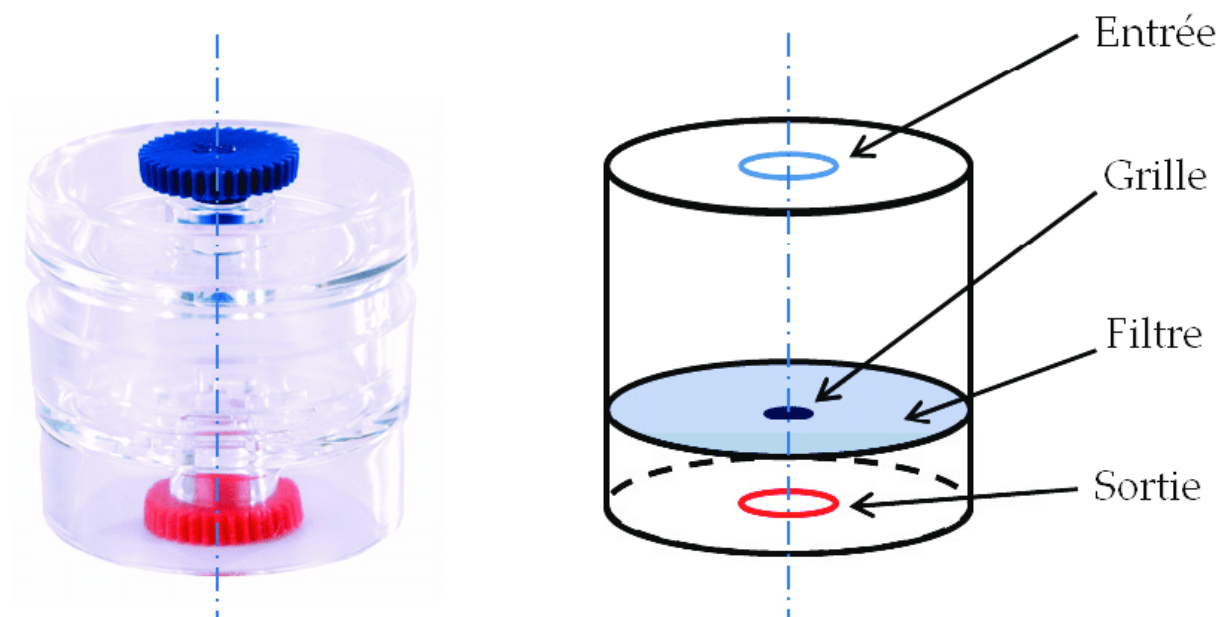


Figure 2.4: Schéma de prélèvement par cassette sur filtre.

2.2.3 Stations fixes

Les dispositifs de mesure fixes sont des équipements installés de façon permanente dans un emplacement spécifique pour surveiller en continu ou à des intervalles prédéfinis la concentration de particules fines dans l'atmosphère. Ces dernières sont employées dans les systèmes de contrôle de la qualité de l'air, ainsi que dans divers contextes industriels où une surveillance continue est requise. Ces stations peuvent être équipées de systèmes

d'échantillonnage par filtre, de capteurs automatiques ou d'analyseurs gravimétriques en continu [19].

Le principal avantage des stations fixes est qu'elles offrent des données constantes qui facilitent l'identification de changements quotidiens, saisonniers ou associés à un processus industriel. Elles favorisent aussi l'évaluation de l'effet des activités de production sur la qualité de l'air et aident à l'élaboration d'actions correctives. Cependant, l'installation et l'entretien de ces systèmes requièrent des ressources techniques et financières plus importantes que les méthodes occasionnelles [20].

Ainsi, les méthodes classiques de détection des particules fines constituent une base essentielle pour la surveillance environnementale et le contrôle industriel, avant d'aborder dans les sections suivantes les techniques modernes de mesure.

2.3 Techniques modernes

Les méthodes actuelles de détection des particules fines cherchent à dépasser les contraintes des techniques gravimétriques traditionnelles, en particulier l'absence de suivi en temps réel et la densité spatiale limitée des mesures. Elles s'appuient sur des capteurs réduits, des systèmes d'électronique intégrée et des techniques de traitement du signal à même d'évaluer en continu la concentration de particules. Dans les contextes industriels, ces méthodes sont particulièrement bénéfiques pour le suivi local des zones de production, des émissions dispersées et de la qualité de l'air intérieur [21].

2.3.1 Capteurs optiques : laser scattering

Actuellement, la majorité des appareils modernes de détection de particules fines reposent sur des capteurs optiques. Leur fonctionnement se base sur la dispersion de la lumière par les particules en suspension : quand un rayon laser traverse l'air, les particules dispersent une portion de la lumière, et le signal optique enregistré permet d'évaluer leur présence, leur quantité et parfois leur dimension. Ce concept est associé à la diffusion de type Mie, qui explique l'interaction entre la lumière et les particules en fonction de leur diamètre et de la longueur d'onde employée.

Les OPC, ou Compteurs de Particules Optiques, exploitent ce phénomène afin de dénombrer les particules et d'évaluer leur distribution en termes de taille. Ces dispositifs ont acquis une grande importance dans le domaine de l'hygiène industrielle, car ils offrent une mesure presque en temps réel, contrairement à la gravimétrie qui nécessite habituellement un échantillonnage sur 24 heures. Cependant, leur exactitude est largement tributaire de l'étalonnage, de la densité

des particules, de leur composition et de leur morphologie. Cela implique qu'un même détecteur peut générer des résultats divergents en fonction du contexte de mesure [22].

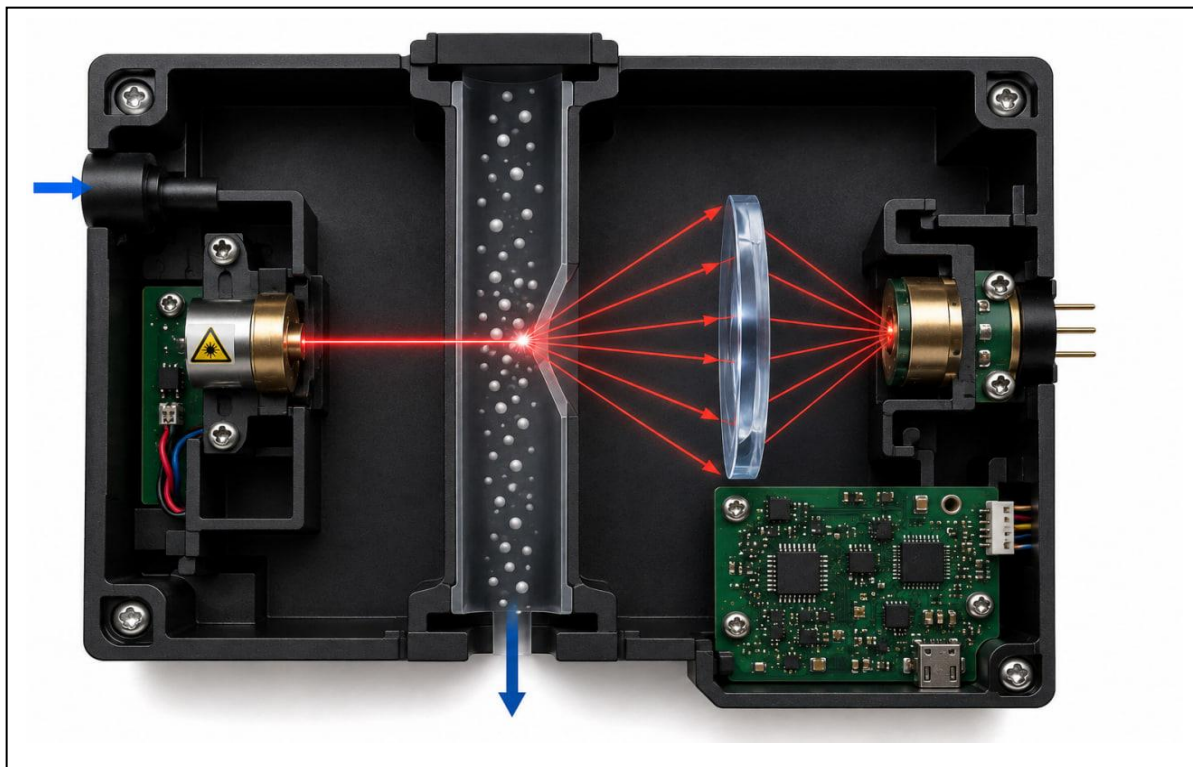


Figure 2.5: Schéma d'un capteur optique à diffusion laser.

2.3.2 Capteurs électrochimiques

Les capteurs électrochimiques sont surtout utilisés pour mesurer des gaz polluants, mais ils complètent souvent les systèmes de détection des particules fines dans les réseaux de surveillance de la qualité de l'air. Dans les structures environnementales et industrielles, ils sont incorporés aux stations multi-capteurs afin de surveiller en même temps les particules fines et d'autres contaminants tels que le CO, le NO₂ ou l'ozone. Cette complémentarité s'avère bénéfique, car la pollution par les particules est fréquemment associée à des processus de combustion et chimiques dans les ateliers ainsi que dans les secteurs industriels.

Leur atout majeur réside dans leur faible utilisation d'énergie et leur adéquation avec les systèmes interconnectés. Leur contrainte est leur susceptibilité aux fluctuations de température, d'humidité et aux interférences croisées, nécessitant des phases de rectification et d'étalonnage pour assurer des relevés utilisables. Dans un mémoire en ingénierie industrielle, il est pertinent de démontrer que ces capteurs sont principalement employés comme moyens de contrôle opérationnel, et non comme instruments normatifs [23].

2.3.3 Capteurs low-cost

L'émergence de capteurs à bas coût constitue une avancée révolutionnaire dans la surveillance des particules fines. Ces derniers autorisent l'installation d'une multitude de points de mesure à un coût réduit, ce qui renforce considérablement la résolution spatiale des informations dans les ateliers, les usines et les zones urbaines. Selon les études, ces capteurs ont la capacité de détecter efficacement les changements de PM lorsqu'ils sont calibrés pour le milieu d'utilisation. Ils peuvent offrir une performance optimale dans certaines situations, mais leurs performances peuvent être considérablement réduites sans étalonnage approprié.

Ils ont un double objectif : contrôler les expositions des opérateurs et observer les performances des procédés produisant des poussières ou des aérosols. Ils présentent une vulnérabilité majeure en termes de stabilité métrologique, car leur performance dépend de la nature des particules, du taux d'humidité et de l'obsolescence des éléments constitutifs. Par conséquent, ils sont particulièrement utiles pour la surveillance continue, cependant, il est nécessaire de les associer à une stratégie de validation en comparaison à une méthode de référence [24].



Figure 2.6 : Schéma d'un système IoT de surveillance de la qualité de l'air

2.3.4 Capteurs à condensation (CPC – Condensation Particle Counter)

2.3.4.1 Principe de fonctionnement

Le Compteur de Particules par Condensation (CPC) repose sur la croissance des particules par condensation d'un liquide, suivie d'un comptage optique. L'aérosol, composé de particules en

suspension dans l'air ambiant, traverse un saturateur où il est chargé en vapeur. Puis, le flux d'air est refroidi dans un condenseur, ce qui réduit la capacité de l'air à retenir le liquide. Le liquide excédentaire se condense alors autour des particules, formant une fine coque qui facilite leur détection optique. Un faisceau de lumière blanche éclaire ensuite le flux, permettant de détecter et de compter les particules au moyen de la lumière qu'elles diffusent.

Détection des particules ultrafines ($< 1 \mu\text{m}$)

Le CPC est spécifiquement conçu pour mesurer les particules dont la taille varie entre 10 nanomètres et 1 micromètre (10 nm - 1 μm). Cette plage est cruciale car elle inclut les particules ultrafines (PUF), reconnues pour leur dangerosité, notamment en raison de leur capacité à pénétrer profondément dans le système respiratoire. [25].

2.3.4.2 Avantages et limites du CPC

Avantages :

1. Grande précision pour le comptage des particules ultrafines
2. Détection des particules les plus petites grâce à la condensation
3. Mesure en temps réel de la concentration numérique

Limites :

1. Ne fournit pas la mesure de la masse des particules, seulement leur nombre
2. Consommation de liquide de travail (fluide de condensation)
3. Entretien régulier nécessaire du saturateur et du condenseur

Applications Industrielles :

1. Contrôle de la qualité de l'air lors des épilations au laser
2. Validation des performances des systèmes de ventilation
3. Surveillance des processus de fabrication de nanoparticules

Environnementales :

1. Surveillance de la qualité de l'air en milieu urbain
2. Études de la pollution atmosphérique
3. Recherche scientifique sur les particules ultrafines

2.3.5 Capteurs basés sur l'effet piézoélectrique

Principe des cristaux piézoélectriques

Un capteur piézoélectrique exploite l'effet piézoélectrique pour mesurer des grandeurs telles que la vibration, la pression, l'accélération ou la température. Les cristaux piézoélectriques génèrent un signal électrique détectable en réponse à des déformations, même très faibles, ce qui les rend particulièrement adaptés à la surveillance de petites variations.

Variation de fréquence en présence de particules

Lorsque des particules se déposent sur un cristal piézoélectrique, elles augmentent la masse du système, provoquant une variation de la fréquence d'oscillation du cristal. Cette variation de fréquence est proportionnelle à la masse des particules accumulées et peut être mesurée avec précision.



Figure 2.7 : capteurs de vibrations sans fil Azima Accel 310™

Sensibilité et domaines d'utilisation

- **Sensibilité :**
 - Capables de produire un signal électrique mesurable pour de très faibles déformations

- Permettent une mesure précise de très petites masses de particules

- **Domaines d'utilisation :**

- Surveillance de la santé des structures
- Détection du niveau des liquides via ondes ultrasoniques
- Applications nécessitant une forte résistance aux conditions ambiantes sévères
- Contrôle des vibrations et de la pression[26]

2.3.6 Analyseurs TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)

Fonctionnement

Le TEOM FDMS repose sur le principe d'une microbalance. Les particules sont collectées sur un filtre fixé à un élément effilé oscillant. L'accumulation des particules entraîne une diminution progressive de la fréquence d'oscillation, qui est convertie en masse. En mode standard, le filtre est chauffé à 50°C lors de la collecte de l'aérosol.

Mesure continue de la masse des particules

Le TEOM permet une mesure en temps réel et continue de la masse des particules, à la différence des méthodes traditionnelles basées sur des prélèvements ponctuels. La variation de fréquence est directement traduite en masse de particules collectées, offrant ainsi une surveillance constante de la concentration massique des PM.

Comparaison avec la méthode gravimétrique

TEOM :

- Mesure continue et automatique, sans manipulation manuelle
- Peut entraîner la perte de composés volatils (nitrate d'ammonium, composés organiques) à 50°C

Méthode gravimétrique (référence) :

- Mesure ponctuelle avec pré- et post-traitement manuel des filtres
- Plus précise pour les mesures réglementaires
- Ne perd pas les composés volatils

Applications réglementaires

Le TEOM est utilisé pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air, notamment pour le suivi des PM₁₀ et PM_{2.5} dans les stations de mesure. Cependant, sa calibration doit être effectuée par rapport à la méthode gravimétrique afin d'assurer la conformité aux normes.[27]

2.3.7 Analyseurs BAM (Beta Attenuation Monitor)

Principe d'atténuation des rayons bêta

Le Beta Attenuation Monitoring (BAM) est une technique de surveillance de la qualité de l'air qui utilise l'absorption du rayonnement bêta par les particules solides prélevées dans le flux d'air. Basée sur la loi de Bouguer-Lambert-Beer, cette méthode repose sur le fait que l'atténuation du flux de rayons bêta (électrons) par une matière solide dépend exponentiellement de sa masse, indépendamment de sa densité, composition chimique ou propriétés optiques et électriques.

Lorsque les rayons bêta traversent une substance, ils interagissent avec les atomes par collision, provoquant ionisation et excitation, ce qui réduit l'intensité des rayons. Cette atténuation est proportionnelle à la masse (épaisseur) de la substance traversée.

Mesure automatique des PM_{2.5} et PM₁₀

Cette technique permet la détection des PM₁₀ et PM_{2.5}, fréquemment surveillées par les agences environnementales. Les rayons bêta traversant le filtre chargé de particules atteignent un scintillateur qui émet de la lumière détectée par un photomultiplicateur (PMT). La masse des particules sur le filtre est calculée à partir du rapport entre l'intensité après atténuation (I) et l'intensité initiale (I_0).

Avantages et limites

Avantages :

- Mesure automatique et en temps réel
- Indépendante de la densité, composition chimique ou propriétés optiques/électriques des particules
- Coefficient d'absorption de masse (μ_m) quasi-constant, garantissant un calcul précis de la masse
- Surveillance continue sans intervention manuelle

Limites :

- Utilisation d'une source radioactive (rayons bêta) nécessitant des précautions de sécurité
- Sensibilité réduite pour les particules ultrafines ($< 1 \mu\text{m}$)
- Nécessité de calibrations et d'entretiens réguliers du détecteur
- Coût initial élevé de l'équipement [28]

2.4 Nouvelles approches

Les méthodes innovantes de détection des particules fines cherchent à relier les détecteurs, à centraliser les informations et à étendre la surveillance à une large échelle. Elles associent l'Internet des objets et la télédétection afin de créer des systèmes plus sensibles, plus accessibles et offrant une meilleure couverture spatiale. Ces méthodes sont spécialement cruciales dans les contextes industriels où l'on s'efforce de connecter les données du terrain, l'analyse instantanée et l'assistance décisionnelle [29].

2.4.1 Internet des objets (IoT)

Grâce à l'Internet des objets, on peut connecter les capteurs de particules fines aux plateformes dédiées au stockage, au traitement et à la visualisation des données. Des études récentes indiquent que la plupart des systèmes IoT de surveillance de la qualité de l'air intègrent des microcontrôleurs, une communication sans fil, un hébergement en nuage et des interfaces web pour le suivi en direct. Cette structure permet un suivi décentralisé des installations industrielles et l'envoi d'alertes lorsque des seuils sont dépassés.

L'IoT appuie la maintenance préventive, le contrôle des processus et la gestion de la sécurité des employés. Il offre aussi la possibilité de combiner la mesure des particules avec d'autres paramètres essentiels, tels que la température, l'humidité ou la ventilation, pour mieux cerner la provenance des émissions. Les contraintes actuelles portent principalement sur l'ajustement, la consommation d'énergie et la fiabilité à long terme des capteurs mis en réseau [30].

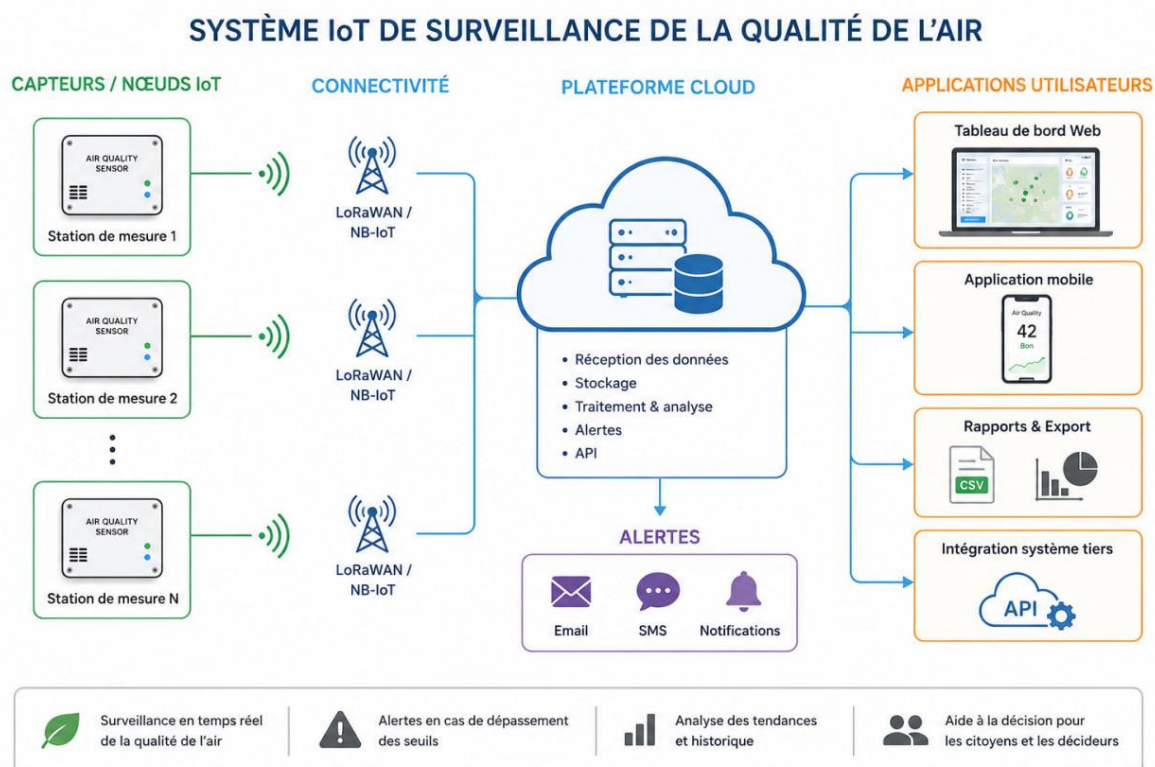


Figure 2.8 : Schéma d'un système IoT de surveillance de la qualité de l'air

2.4.2 Télédétection par satellites

La télédétection fournit une perspective à large échelle sur la pollution par les particules, ce qui en fait un outil précieux pour compléter les mesures effectuées au sol. En particulier, les satellites évaluent l'épaisseur optique des aérosols, qui peut servir d'indicateur indirect de la densité des particules fines présentes dans l'atmosphère. Les recherches indiquent que le lien entre les données satellitaires et les relevés de PM_{2.5} au sol peut être significatif dans certaines situations atmosphériques, cependant il est influencé par l'humidité, la nébulosité et l'épaisseur de la couche de mélange [31].

Cette méthode est pertinente quand on étudie l'effet des opérations industrielles sur la qualité de l'air à l'échelle régionale. Elle offre la possibilité de repérer les zones à risque, d'observer la progression spatiale des nuages de pollution et de compléter les relevés locaux provenant des capteurs fixes. Cependant, la télédétection ne peut substituer les mesures directes effectuées sur le terrain, car elle offre principalement une évaluation indirecte qui demande une validation locale.

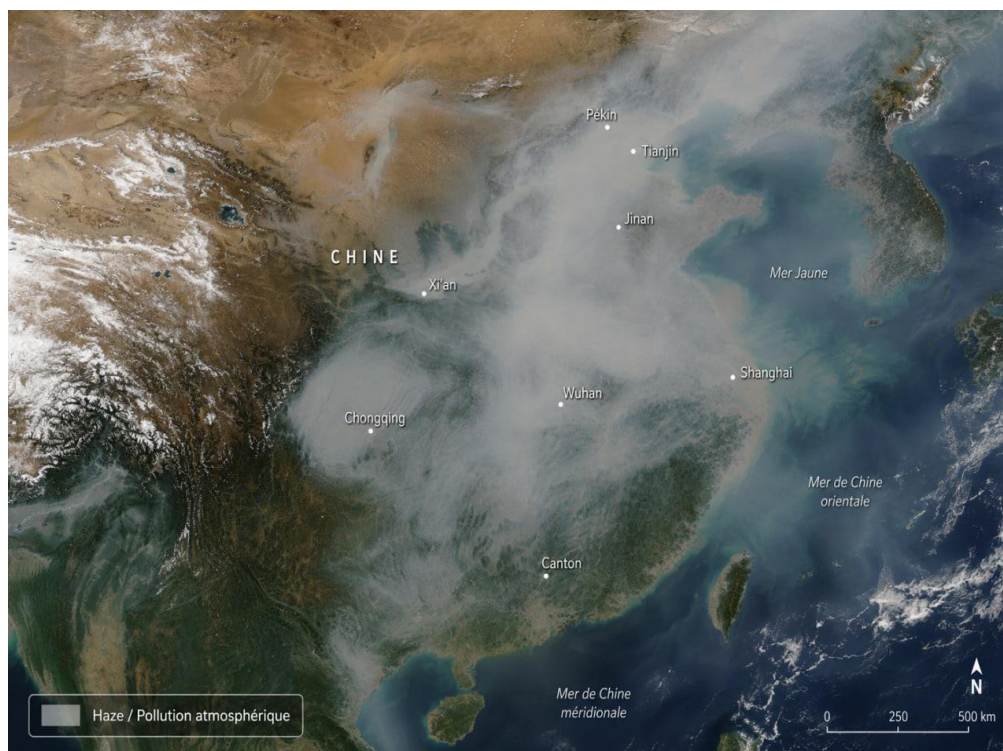


Figure 2.9 : Image satellite illustrant la pollution atmosphérique.

Ainsi, la détection des particules fines s'appuie aujourd'hui sur un continuum de méthodes allant des techniques classiques de référence aux capteurs connectés et à la télédétection, ce qui permet d'améliorer à la fois la précision locale, la couverture spatiale et la réactivité de la surveillance environnementale.

2.4.3 Comparaison des performances des différentes techniques

Le choix d'une technique de détection des particules fines dépend de plusieurs critères : la précision requise, le temps de réponse, le coût d'investissement et de maintenance, ainsi que le contexte d'application (réglementaire, industriel, recherche scientifique ou surveillance citoyenne).

La méthode gravimétrique demeure la référence pour les mesures réglementaires de PM₁₀ et PM_{2.5}, avec une précision très élevée et une maintenance faible, mais elle ne permet pas de mesures en temps réel et nécessite un traitement manuel des filtres. Son temps de réponse long (généralement 24 heures) limite son utilisation pour la surveillance continue de la qualité de l'air, malgré sa précision irréprochable pour les mesures conformité.

Les capteurs optiques laser offrent un compromis intéressant entre précision (élevée), coût (moyen) et capacité de mesure en temps réel, ce qui les rend particulièrement adaptés à la surveillance continue de la qualité de l'air en milieu urbain et industriel. Leur temps de réponse

rapide (quelques secondes à quelques minutes) permet de détecter les variations rapides de concentration des particules, mais leur précision est inférieure à celle des méthodes de référence comme la gravimétrie ou le TEOM.

Les capteurs low-cost représentent une solution émergente pour la surveillance citoyenne et le déploiement massif de réseaux de mesure à grande échelle. Avec un coût faible et une capacité de mesure en temps réel, ils permettent une couverture géographique étendue, mais leur précision moyenne nécessite une calibration régulière par référence à des méthodes de référence. Leur maintenance moyenne et leur sensibilité aux conditions environnementales limitent leur utilisation pour des mesures réglementaires, mais ils sont précieux pour identifier les tendances et les zones de pollution.

Les analyseurs TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) et BAM (Beta Attenuation Monitor) offrent des performances exceptionnelles avec une précision très élevée et une mesure en temps réel, ce qui les rend idéaux pour la surveillance réglementaire continue. Cependant, leur coût élevé et leur maintenance intensive (nécessité de remplacer régulièrement les filtres, calibration fréquente, entretien des systèmes oscillants ou des sources radioactives) limitent leur déploiement à des stations de mesure fixes et professionnelles. Le TEOM peut perdre des composés volatils à 50°C (nitrate d'ammonium, composés organiques), tandis que le BAM utilise une source radioactive de rayons bêta nécessitant des précautions de sécurité spécifiques.

Le CPC (Condensation Particle Counter) est particulièrement performant pour la détection des particules ultrafines ($< 1 \mu\text{m}$), avec une précision très élevée et une mesure en temps réel, mais son coût élevé et sa maintenance intensive (consommation de fluide de condensation, entretien du saturateur) limitent son utilisation à des applications de recherche scientifique et de surveillance spécialisée des nanoparticules.

Les capteurs piézoélectriques offrent un bon compromis avec une précision élevée, un coût moyen et une mesure en temps réel, grâce à leur capacité de mesurer de très petites masses de particules par variation de fréquence. Leur robustesse et leur résistance aux conditions ambiantes sévères les rendent adaptés à des applications industrielles, mais leur sensibilité aux vibrations et à la température nécessite une calibration précise. [32]

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales techniques de détection des particules fines, allant des méthodes gravimétriques classiques aux technologies optiques et électriques modernes utilisés

Chapitre 2 : Techniques de détection des particules fines

pour la surveillance continue de la qualité de l'air. Il a été souligné que chaque méthode (gravimétrique, optique, électrique, chimio métrique) possède des spécificités en termes de sensibilité, précision et temps de réponse, adaptées à différents contextes de mesure.

Les méthodes gravimétriques demeurent la référence pour les mesures réglementaires de PM10 et PM2.5, tandis que les techniques optiques et électriques permettent une surveillance en temps réel des particules ultrafines PM1.0 et PM2.5. Toutefois, aucune méthode unique ne répond parfaitement à tous les besoins, justifiant ainsi le développement de solutions hybrides et de nouveaux dispositifs plus sensibles et fiables.

Cette analyse des techniques actuelles prépare la présentation des nouvelles méthodes de détection et de suivi développées dans les chapitres suivants, qui visent à améliorer la précision, la sensibilité et le coût des systèmes de surveillance des particules fines.

Chapitre 3 : Evaluation et sélection des techniques de mesure

3.1 Introduction

Pour garantir une démarche scientifique et rigoureuse, le choix des techniques de mesure doit reposer sur des critères quantitatifs et reproductibles. Ces critères permettent de comparer objectivement les méthodes classiques et modernes, d'identifier les meilleures solutions pour chaque contexte industriel et de justifier la sélection finale. L'évaluation des performances des capteurs et des systèmes de mesure doit ainsi couvrir plusieurs dimensions : la précision, la sensibilité, les coûts, la fiabilité et la facilité d'exploitation.

3.2 Critères d'évaluation des techniques

Les critères d'évaluation retenus dans ce chapitre se fondent sur les spécificités métrologiques des capteurs et des dispositifs de mesure, en même temps que sur les exigences fonctionnelles de l'industrie. Chaque critère est établi de façon scientifique et relié à son rôle dans le cadre industriel.

- **Sensibilité** : Le capteur a une sensibilité qui se définit comme le rapport entre la variation du signal produit et la variation du signal reçu. Elle reflète la pente de la courbe de transfert du capteur et témoigne de sa capacité à percevoir des variations minimales de la grandeur mesurée. Dans le secteur industriel, une haute sensibilité est indispensable pour identifier rapidement les irrégularités ou les changements de processus. La sensibilité d'un détecteur est le rapport entre la modification du signal de sortie et la modification du signal d'entrée. Elle reflète la pente de la courbe de transfert du capteur et témoigne de sa capacité à percevoir des variations minimales de la grandeur mesurée. Dans le secteur industriel, une haute sensibilité est indispensable pour identifier rapidement les irrégularités ou les changements de processus [28].
- **Précision** : La précision se réfère à la capacité d'un capteur ou d'un système de mesure à produire des résultats qui se rapprochent de la valeur réelle. Elle se base sur la précision (minimiser les erreurs systématiques) ainsi que sur la fidélité (la capacité à reproduire les mesures). Il est essentiel d'avoir une précision élevée pour assurer le respect des normes réglementaires et la qualité des produits [29].
- **Limite de détection (LOD)** : La limite de détection est la plus petite concentration ou la plus petite variation d'un analyte pouvant être détectée avec un certain niveau de confiance statistique. Elle est déterminée à partir de l'écart-type du bruit de fond et du facteur de réponse. Une faible LOD est indispensable pour les applications de contrôle de qualité et de surveillance environnementale [30].

- **Délai de réponse** : Le délai de réponse évalue l'intervalle de temps entre un changement de la valeur mesurée et la stabilisation de la réaction du capteur. On exprime souvent cela par la constante de temps τ ou le délai requis pour parvenir à un certain pourcentage de la valeur finale suite à un changement instantané. Les systèmes de contrôle en temps réel et de sécurité nécessitent un délai de réponse minimal [28].
- **Frais d'installation** : Les frais d'installation englobent le tarif des capteurs, des dispositifs de collecte, des câbles, des interfaces et des programmes de gérance. Ils symbolisent l'investissement de départ nécessaire pour l'établissement du système de mesure. Il faut évaluer ce coût par rapport aux avantages espérés en termes de précision et de fiabilité [31].
- **Coût de maintenance** : Les dépenses de recalibrage, de changement de composants, de diagnostics et d'actions de maintenance préventive ou corrective sont rassemblées sous le terme de coût d'entretien. Il joue un rôle crucial dans le coût total de possession (TCO) du système de mesure. L'équipement performant peut perdre son attrait si sa maintenance est trop fréquente et onéreuse [32].
- **Consommation énergétique** : La consommation énergétique fait référence à l'énergie ou la puissance requise pour l'opération continue du capteur ou du système de mesure. Elle revêt une importance considérable pour les capteurs indépendants, les réseaux de capteurs dénués de fil et les applications sur mobile. Une consommation énergétique minimale autorise des opérations prolongées sans besoin d'intervention [30].
- **Fiabilité** : La fiabilité est la probabilité qu'un capteur ou un système fonctionne sans défaillance pendant une période donnée. Elle est souvent quantifiée par la durée de vie moyenne entre les pannes (MTBF) ou le taux de défaillance. Une haute fiabilité est vitale pour les applications critiques de sécurité et de contrôle de process [29].
- **Portabilité** : La portabilité fait référence à la facilité de transport et d'installation du capteur ou du système de mesure. Elle est évaluée selon la dimension, la masse, la facilité de mise en place et la résistance mécanique. La capacité de portabilité est cruciale pour les campagnes de surveillance à distance et les vérifications sur site [32].
- **Facilité de calibrage** : La simplicité du calibrage se base sur le temps, la complexité et les outils requis pour l'étalonnage du capteur. Une calibration facile et rapide minimise les périodes d'inactivité et les frais de maintenance. Les environnements industriels exigeants conviennent moins aux capteurs qui requièrent une calibration complexe et régulière [33].

- Exploitation industrielle : L'évaluation de l'adéquation du capteur aux conditions du processus (température, pression, substances corrosives, atmosphère explosive) constitue l'objectif de l'exploitation industrielle. Cela englobe la résistance aux attaques chimiques, le respect des normes de sécurité (ATEX, etc.) et l'incorporation dans les systèmes de contrôle en place. Un capteur conçu pour l'environnement industriel facilite l'intégration et diminue les risques [34].
- Surveillance en temps réel : Cela fait référence à la capacité à obtenir, traiter et transmettre des données en temps réel de manière instantanée. Elle offre un pilotage dynamique des processus, une identification instantanée des anomalies et la production constante d'alarmes. Cette caractéristique est essentielle pour les systèmes de contrôle sophistiqués et la sécurité dans l'industrie. [34]. Le tableau suivant présente un récapitulatif des critères retenus.

3.3 Analyse comparative des méthodes classiques et modernes

Cette section présente une analyse comparative détaillée des méthodes de mesure classiques et modernes. Les techniques sélectionnées représentent un éventail des approches utilisées dans l'industrie pétrochimique, les laboratoires et les smart cities. La comparaison est basée sur les critères définis dans la section 3.2, Les résultats sont synthétisés dans des tableaux afin d'en faciliter l'analyse et l'interprétation. À cette fin, six techniques représentatives sont comparées selon différents critères d'évaluation.

- Gravimétrie (méthode de référence en laboratoire)
- Chromatographie (GC/MS) (analyse détaillée de composition)
- Capteur optique (absorbance, fluorescence, infra-rouge)
- Capteur électrochimique (potentiométrie, ampèremètre)
- Technologies IoT / Low-cost (MEMS, capteurs sans fil)
- Méthodes basées IA / Traitement du signal (fusion de capteurs, modèles de corrections)

Chapitre 3 : Evaluation et sélection des techniques de mesure

Tableau 3.1 : Les critères d'évaluation avec une brève description et leur importance pour l'industrie

Critère	Définition scientifique	Importance industrielle
Sensibilité	Rapport de la variation du signal de sortie à la variation du signal d'entrée	Détecte faibles variations de grandeur, essentiel pour le contrôle qualité
Précision	Qualité de mesurer près de la valeur vraie (justesse et fidélité)	Conformité réglementaire, qualité des produits
Limite de détection	Plus petite concentration détectable avec confiance	Surveillance environnementale, contrôle de contaminants
Temps de réponse	Délai entre changement de mesurande et stabilisation de la réponse	Contrôle en temps réel, sécurité
Coût d'installation	Investissement initial (capteurs, instrumentation, intégration)	Facteur économique de faisabilité
Coût de maintenance	Dépenses récurrentes (étalonnage, remplacement)	Coût total de possession
Consommation énergétique	Énergie nécessaire au fonctionnement continu	Opérations autonomes, capteurs sans fil
Fiabilité	Énergie nécessaire au fonctionnement continu	Opérations autonomes, capteurs sans fil
Portabilité	Probabilité de fonctionnement sans défaillance	Disponibilité, sécurité
Facilité de calibration	Facilité de déplacement et d'installation	Inspections mobiles, campagnes de terrain
Exploitation industrielle	Complexité et temps d'étalonnage	Réduction des arrêts de production
Surveillance en temps réel	Compatibilité avec conditions de processus	Intégration facile, sécurité

Tableau 3.2 : Comparaison détaillée des capteurs optiques et IoT/Low-cost

Technique	Précision	Sensibilité é/LOD	Temps de réponse	Coût d'installati on	Coût de maintenan ce	Consomm ation énergétique	Fiabilité	Portabilité	Facilité de calibration
Gravimétrie	Très élevée	Faible à modérée	Long	Élevé	Élevé	Élevé	Élevée	Faible	Complexe
Chromatographie GC/MS	Très élevée	Très élevée	Long	Élevé	Élevé	Élevé	Très élevée	Faible	Complexe
Capteur optique	Moyenne à élevée	Élevée	Rapide	Faible à moyen	Faible	Faible	Bonne	Bonne	Moyenne
Electrochimique	Moyenne	Élevée	Rapide	Moyen	Moyen	Faible	Moyenne	Bonne	Moyenne
IoT/Low-cost	Moyenne à faible	Limitée	Très rapide	Très faible	Faible	Très faible	Variable	Excellente	Simple
IA/Traitement du signal	Élevée	Modérée	Rapide	Moyen	Faible	Faible	Moyenne	Excellente	Complexe (initial)

Les tableaux comparent six techniques de mesure sélectionnées : Gravimétrie, Chromatographie (GC/MS), Capteur optique, Electrochimique, Technologies IoT/Low-cost et Méthodes basées IA/Traitement du signal. Les techniques sont évaluées sur une échelle qualitative (Très faible, Faible, Moyen, Élevé, Très élevé) pour chaque critère.

Les données de ce tableau sont basées sur des études de validation de capteurs et de protocoles d'évaluation de micro-capteurs. Les méthodes classiques comme la gravimétrie et la chromatographie offrent une très haute précision et sensibilité, mais au prix d'un coût élevé et d'une faible portabilité. Les méthodes modernes comme les capteurs optiques et les technologies IoT/Low-cost apportent une rapidité de réponse et une portabilité accrues, avec

des coûts d'installation et de maintenance réduits, mais avec une précision et une sensibilité moindres. [30]

Tableau 3.3 : Comparaison détaillée des capteurs optiques et IoT/Low-cost

Critère	Capteur optique	Capteur IoT/Low-cost
Précision	Moyenne à élevée	Moyenne à faible
Sensibilité	Élevée	Limite
Temps de réponse	Rapide	Très rapide
Cout d'installation	Faible et moyen	Très faible
Cout de maintenance	Faible	Faible
Consommation énergétique	Faible	Très faible
Fiabilité	Bonne	Variable
Portabilité	Bonne	Excellente
Facilité de calibration	Moyenne	Simple
Connectivité	Moyenne (souvent câblée)	Excellente (sans fil, lot)

Pour une analyse plus fine, le tableau compare les capteurs optiques et les capteurs IoT/Low-cost sur les critères spécifiques à la surveillance en temps réel et la connectivité.

Les capteurs optiques, comme les capteurs basés sur l'absorbance ou la fluorescence, sont bien adaptés aux applications de surveillance continue nécessitant une bonne précision et une sensibilité élevée. Les capteurs IoT/Low-cost, tels que les capteurs MEMS, offrent une connectivité sans fil et une faible consommation énergétique, idéaux pour les réseaux urbains et les applications de surveillance à grande échelle [32].

3.3.1 Méthodologie de comparaison

L'évaluation comparative se fait en examinant chaque méthode selon une échelle qualitative pour chaque critère. Les données proviennent de la recherche scientifique et technique ainsi que des procédures d'évaluation de capteurs. Les conditions d'évaluation (température, humidité, matrice) sont définies pour assurer la répétabilité des résultats. Des métriques statistiques comme la moyenne, la variance et l'intervalle de confiance servent à évaluer les performances des capteurs [35].

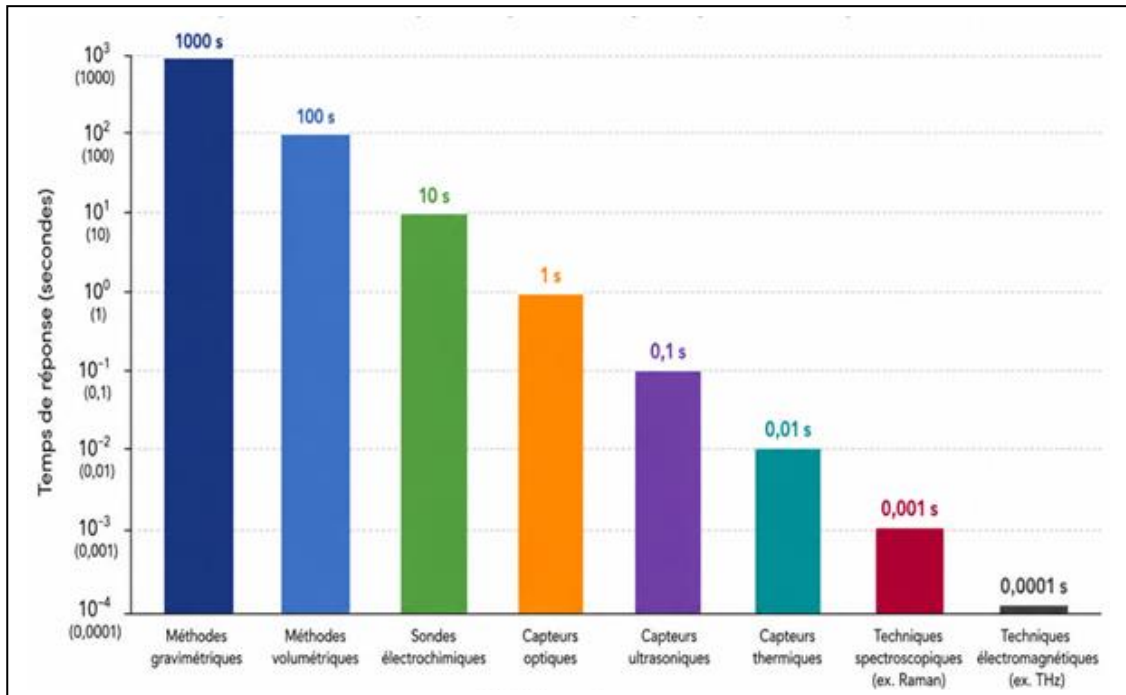


Figure 3.10: Comparaison des temps de réponse des principales techniques de mesure

3.4 Analyse des critiques des performances

3.4.1 Les atouts des méthodes performantes

Des techniques traditionnelles telles que la gravimétrie et la chromatographie fournissent une précision et une sensibilité extrêmement élevées. Elles conviennent tout particulièrement aux applications de laboratoire qui exigent une traçabilité rigoureuse et une conformité réglementaire stricte. On reconnaît la stabilité de ces techniques, qui présentent un faible dérivé des mesures, ainsi qu'une grande longévité de leurs appareils. Le respect des normes internationales (ISO, ASTM) accroît leur crédibilité dans le milieu industriel [30].

Des méthodes contemporaines comme les détecteurs optiques et les techniques IoT/Low-cost offrent une plus grande réactivité et mobilité. Ces dernières sont parfaitement conçues pour les applications de suivi en direct, où l'identification rapide des irrégularités est indispensable. La capacité à se connecter sans fil et à consommer peu d'énergie offre une surveillance constante sur de larges espaces, comme les villes intelligentes [32].

3.4.2 Limites des méthodes limitées

Les méthodes classiques ont plusieurs contraintes. Leur installation et leur entretien étant coûteux, leur déploiement à grande échelle dans les milieux industriels est restreint. Ils possèdent un délai de réponse prolongé, ce qui les rend moins appropriés pour les applications de surveillance en direct. L'exigence de conditions de laboratoire spécifiques et de main-d'œuvre compétente fait grimper les coûts opérationnels [31].

Bien que les techniques IoT/low-cost soient prometteuses, elles présentent des contraintes en matière de précision et de sensibilité. Elles sont régulièrement sujettes à des écarts de mesure et à une sensibilité aux variations climatiques, ce qui exige un étalonnage régulier. La longévité des capteurs peut être restreinte, et leur fiabilité peut fluctuer en fonction du fabricant et des conditions d'emploi. Des erreurs systématiques et des préjugés peuvent nuire à la qualité des données [35].

3.4.3 Conséquences pratiques et recommandations

Les restrictions des techniques de mesure ont des impacts concrets sur les activités industrielles. Les méthodes traditionnelles peuvent conduire à des coûts importants et des périodes d'arrêt étendues pour l'entretien. Les techniques IoT/low-cost peuvent conduire à des alertes incorrectes ou des cas de détection manquée, mettant en péril la sécurité et la qualité [33].

Pour améliorer les performances, plusieurs recommandations peuvent être proposées :

- Utiliser des techniques de filtrage et de conditionnement des signaux pour réduire le bruit et les erreurs de mesure.
- Mettre en place des systèmes de compensation de température et d'humidité pour limiter les effets climatiques.
- Implémenter des protocoles de calibration réguliers et automatisés pour maintenir la précision des capteurs.
- Adopter des systèmes de redondance et de fusion de capteurs pour augmenter la fiabilité et la robustesse des mesures.

3.5 Choix des techniques selon l'application

Le choix des méthodes de mesure doit être fait en considérant les restrictions propres à chaque domaine d'application. Nous avons préparé des tableaux et des analyses dans les prochaines sections pour vous orienter dans la sélection des méthodes les mieux adaptées à l'industrie pétrochimique, l'environnement urbain, les laboratoires, les villes intelligentes et la surveillance

Chapitre 3 : Evaluation et sélection des techniques de mesure

mobile. Le tableau 3.4 présente un récapitulatif des domaines d'application et les tableaux 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 et 3.9 présentent les techniques recommandées par domaine .

Tableau 3.4 : présentation récapitulative des domaines d'application

Domaine	Contraintes clés	Techniques recommandées	Justification
Industrie pétrochimique	Sécurité, résistance chimique, détection en continu	Capteurs optiques spécialisés, capteurs à haute fiabilité	Robustesse, conformité aux normes de sécurité
Milieu urbain (qualité air)	Coût réduit, large couverture, temps réel	Réseaux IoT/Low-cost, capteurs optiques	Scalabilité, connectivité
Laboratoires	Haute précision, traçabilité	Gravimétrie, chromatographie GC/MS	Conformité réglementaire
Smart cities	Intégration IT, énergie faible, connectivité	Capteurs IoT, capteurs optiques	Flexibilité, connectivité
Surveillance mobile	Portabilité, temps de réponse	Capteurs portables, capteurs optiques	Mobilité, rapidité

Tableau 3.5: Industrie pétrochimique

Contrainte	Technique recommandée	Justification
Résistance chimique	Capteurs portables	Résiste aux agressions chimiques
Détection en continu	Systèmes de capteurs redondants	Fiabilité accrue

Tableau 3.6: Milieu urbain (qualité air)

Contrainte	Technique recommandée	Justification
------------	-----------------------	---------------

Chapitre 3 : Evaluation et sélection des techniques de mesure

Cout réduit	Réseau lot /Low-cost	Faible investissement initial
Large couverture	Capteurs optiques	Bonne précision, sensibilité élevée

Tableau 3.7: Laboratoires

Contrainte	Technique recommandée	Justification
Haute précision	Gravimétrie	Précision maximale
Traçabilité	Chromatographie GC /MS	Conformité réglementaire

Tableau 3.8: smart cities

Contrainte	Technique recommandée	Justification
Intégration IT	Capteurs IoT	Connectivité sans fils
Énergie faible	Capteurs optiques	Faible consommation énergétique

Tableau 3.9 : Surveillance mobile

Contrainte	Technique recommandée	Justification
Portabilité	Capteurs portables	Facilité de déplacement
Temps de réponse	Capteurs optiques	Rapidité de réponse

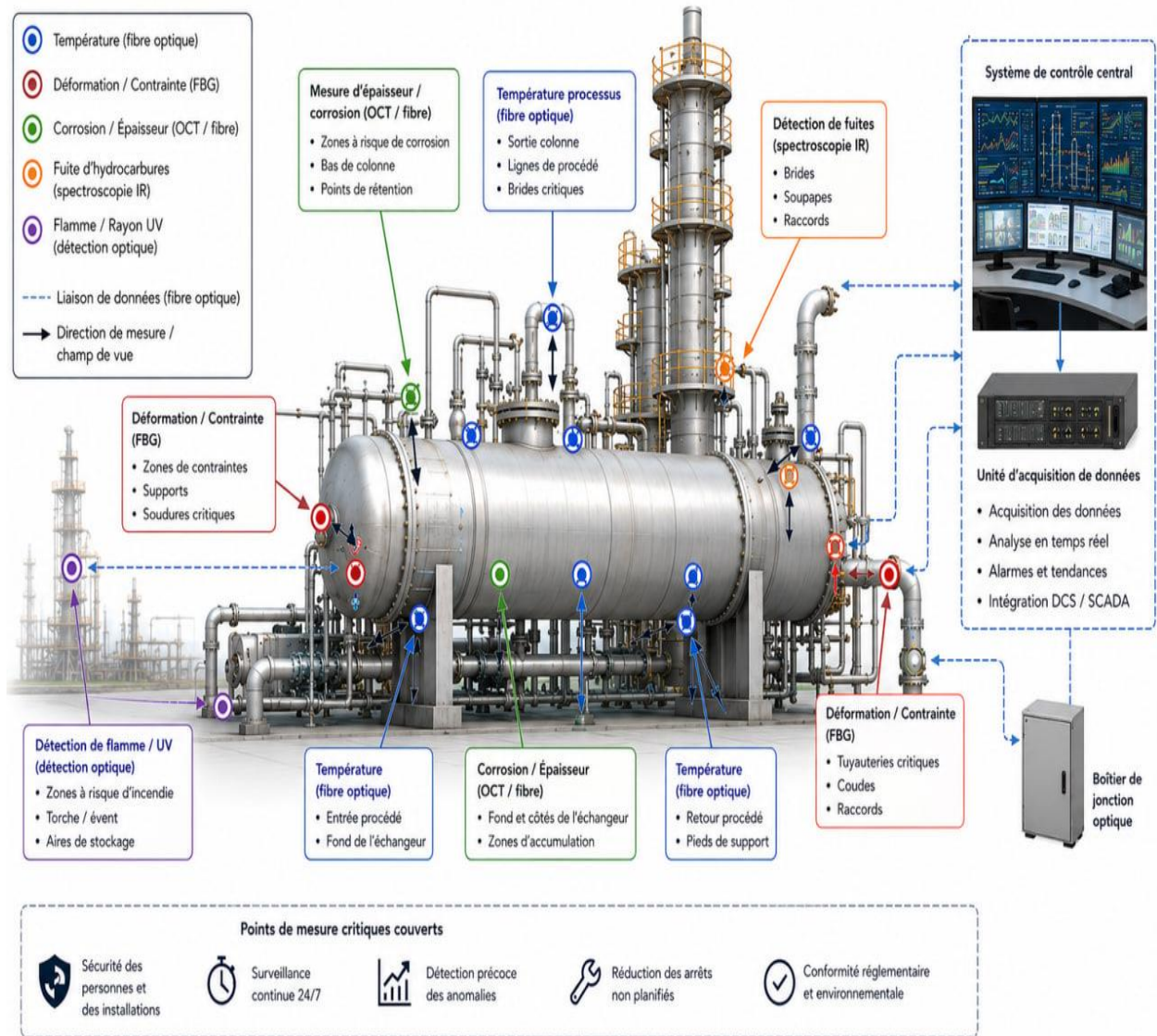


Figure 3.11 : Configuration recommandée des capteurs dans l'industrie pétrochimique

3.6 Synthèse comparative et discussion

3.6.1 Récapitulatif synthétique

L'analyse comparative des techniques de mesure démontre que les méthodes traditionnelles comme la gravimétrie et la chromatographie fournissent une précision et une sensibilité de haut niveau, mais elles sont coûteuses et peu portables. Des techniques contemporaines, telles que les capteurs optiques et les technologies IoT/Low-cost, offrent une meilleure réactivité, portabilité et connectivité, tout en diminuant les coûts d'installation et d'entretien. Il convient donc de choisir les méthodes en fonction des besoins spécifiques de chaque domaine d'application.

3.6.2 Meilleure solution selon le contexte

Concernant le secteur pétrochimique, l'option la plus efficace serait d'utiliser une association de capteurs optiques dédiés à la détection continue et de systèmes de capteurs redondants pour assurer la fiabilité. Pour un environnement urbain, une combinaison de capteurs IoT/Low-cost et de stations de référence dotées de capteurs optiques fournit une couverture optimale tout en demeurant économique. Dans les laboratoires, la gravimétrie et la chromatographie demeurent les méthodes favorites lorsque la précision et la traçabilité sont prioritaires. Les villes intelligentes utilisent des capteurs IoT pour l'intégration informatique et des capteurs optiques pour garantir la précision. La surveillance mobile exploite des détecteurs portables de première qualité pour leur mobilité et leur vitesse.

3.6.3 Limitations de l'étude et recommandations

Cette recherche présente des contraintes telles que le défi de faire des généralisations à partir des performances des capteurs dans tous les environnements industriels, les fluctuations des conditions environnementales et l'accès restreint aux données publiques concernant certaines technologies. Il est indispensable de réaliser des tests en conditions concrètes pour confirmer l'efficacité des capteurs et modifier les procédures d'étalonnage. Les suggestions pour les prochaines étapes comprennent l'élaboration de protocole d'évaluation normalisés, la conduite d'essais préliminaires, la mise en place d'un étalonnage automatisé et l'incorporation de méthodes d'IA dans le but d'optimiser l'efficacité des capteurs.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a souligné l'importance d'une évaluation rigoureuse des techniques de mesure, fondée sur des critères scientifiques et industriels pertinents. L'analyse comparative révèle que les méthodes traditionnelles, telles que la gravimétrie et la chromatographie GCMS, se distinguent par leur précision et leur sensibilité remarquables. Cependant, ces méthodes demeurent coûteuses, peu portables et essentiellement adaptées aux environnements de laboratoire. À l'opposé, les techniques modernes, notamment les capteurs optiques, les solutions IoT à faible coût et les approches fondées sur l'intelligence artificielle, se caractérisent par leur rapidité, leur faible consommation énergétique, leur portabilité et leur facilité d'intégration dans les systèmes de surveillance en temps réel. Néanmoins, ces solutions affichent encore certaines limites en termes de précision, de fiabilité et de calibrage, nécessitant une validation rigoureuse avant un déploiement à grande échelle. En définitive, le choix d'une méthode de mesure est intrinsèquement lié au contexte d'application, aux contraintes économiques, aux exigences de

Chapitre 3 : Evaluation et sélection des techniques de mesure

précision et aux conditions opérationnelles. Ce chapitre démontre ainsi qu'aucune solution universelle n'existe, mais qu'il convient de sélectionner les techniques en fonction des besoins spécifiques de chaque domaine, qu'il s'agisse de l'industrie pétrochimique, des laboratoires, des milieux urbains ou de la surveillance mobile.

Chapitre 4 : Discussions et perspectives

4.1 Introduction

L'analyse comparative des principales techniques de détection et de suivi des particules fines permet d'évaluer leurs performances, leurs avantages et leurs limites. Elle constitue une étape importante pour comprendre quelles méthodes sont les plus adaptées à la surveillance des PM1.0, PM2.5 et PM10.

Le choix d'une technique de mesure ne dépend pas uniquement de sa précision, mais aussi de plusieurs autres critères, comme la sensibilité, le temps de réponse, le coût, la facilité d'utilisation et la compatibilité avec les conditions réelles de mesure. En effet, certaines méthodes conviennent mieux à une surveillance en temps réel, tandis que d'autres sont plus appropriées pour des analyses plus précises ou des études de laboratoire. Ainsi, l'étude comparative des techniques de détection permet de mieux orienter le choix de la solution la plus efficace selon le contexte d'application. Elle offre également une meilleure compréhension des exigences techniques liées au suivi de la pollution atmosphérique par les particules fines.

4.2 Critères de comparaison des techniques

4.2.1 Sensibilité et limite de détection

La sensibilité se réfère à la capacité d'une méthode à détecter de faibles variations de concentration en particules fines, tandis que la limite de détection correspond à la concentration minimale pouvant être mesurée de manière fiable. Ces critères sont cruciaux pour détecter les faibles niveaux de pollution et surveiller les fluctuations rapides de la qualité de l'air [37].

4.2.2 Précision et fiabilité

La précision correspond à la proximité entre la valeur mesurée et la valeur réelle, tandis que la fiabilité reflète la constance et la reproductibilité des résultats au fil du temps. Pour les capteurs à faible coût, la précision peut fluctuer en fonction de la taille des particules, des conditions météorologiques et de la composition de l'aérosol, ce qui rend nécessaire la comparaison avec une méthode de référence [38].

4.2.3 Temps de réponse

Le temps de réponse désigne le délai requis pour qu'un capteur reflète une variation de concentration suite à une modification effective dans l'air ambiant. Ce paramètre est particulièrement crucial pour le suivi en temps réel, notamment lors d'épisodes de pollution ou de fluctuations rapides des concentrations [39].

4.2.4 Coût d'installation et de maintenance

Le coût d'installation et de maintenance représente un facteur clé dans la sélection d'une technique de surveillance. Les systèmes de référence garantissent généralement une qualité de mesure supérieure, mais leur installation, exploitation et entretien sont plus onéreux comparativement aux capteurs compacts ou à faible coût [40].

4.2.5 Facilité d'utilisation

La facilité d'utilisation se rapporte à la simplicité de la mise en service, de l'exploitation et du traitement des données. Une technique aisée à utiliser requiert peu de réglages, offre une lecture claire des résultats et minimise les interventions techniques, facilitant ainsi son déploiement sur le terrain [41].

4.2.6 Couverture spatiale et temporelle

La couverture spatiale et temporelle fait référence à la capacité d'un système à fournir des mesures réparties sur plusieurs sites et sur des périodes prolongées. Les capteurs à faible coût sont particulièrement adaptés aux réseaux de surveillance denses et au suivi continu, alors que les instruments de référence sont généralement plus limités en nombre et en mobilité [42].

4.2.7 Formulation académique prête à insérer

Les critères de comparaison des techniques de détection des particules fines reposent principalement sur la sensibilité et la limite de détection, la précision et la fiabilité, le temps de réponse, le coût d'installation et de maintenance, la facilité d'utilisation, ainsi que la couverture spatiale et temporelle. Ces paramètres permettent d'évaluer l'adéquation de chaque méthode aux exigences de la surveillance de la qualité de l'air [43].

4.3 Méthodes gravimétriques

La méthode gravimétrique est reconnue comme une technique de référence pour la mesure des particules fines. Elle consiste à collecter les particules sur un filtre, puis à déterminer leur masse par pesée avant et après l'échantillonnage. Cette approche garantit une bonne précision et fournit une mesure fiable de la concentration massique. Toutefois, elle présente des limitations, notamment sa lenteur, avec des mesures généralement réalisées sur 24 heures, ainsi que la nécessité d'un matériel de pesée très sensible et de conditions environnementales strictement contrôlées [44].

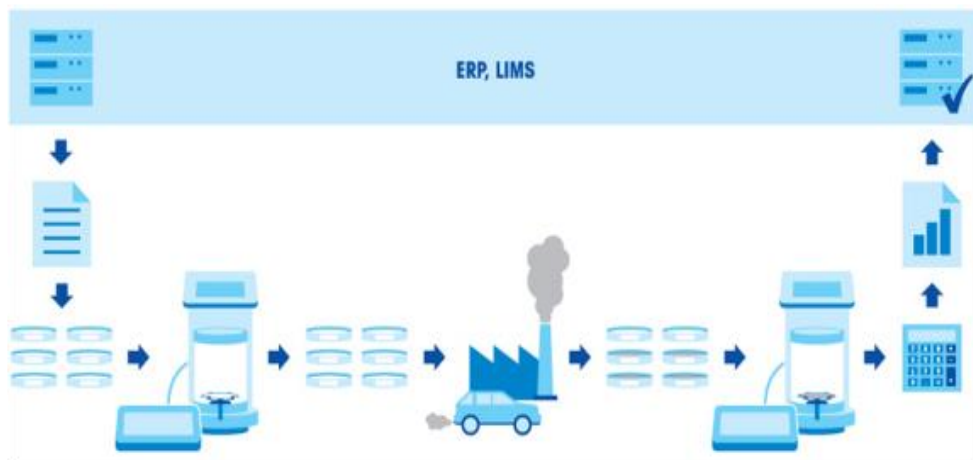


Figure 4.12 : Flux de travail de test des émissions et détermination gravimétrique des particules

Avantages

- Méthode de référence, donc très fiable [45].
- Bonne précision de mesure.
- Adaptée à la validation d'autres techniques.

Limites

- Temps de réponse long.
- Manipulation et maintenance plus contraignantes.
- Peu adaptée au suivi en temps réel.

4.4 Capteur de particule

Les compteurs de particules quantifient le nombre de particules présentes dans un volume d'air, généralement en s'appuyant sur un principe optique de diffusion lumineuse. Ils offrent des mesures rapides et continues, ce qui les rend particulièrement adaptés à la surveillance en temps réel et au suivi des fluctuations de pollution. Cependant, leur réponse peut varier en fonction de la taille, de la forme et des propriétés optiques des particules, ce qui peut influencer la précision de la conversion en concentration massique [46].

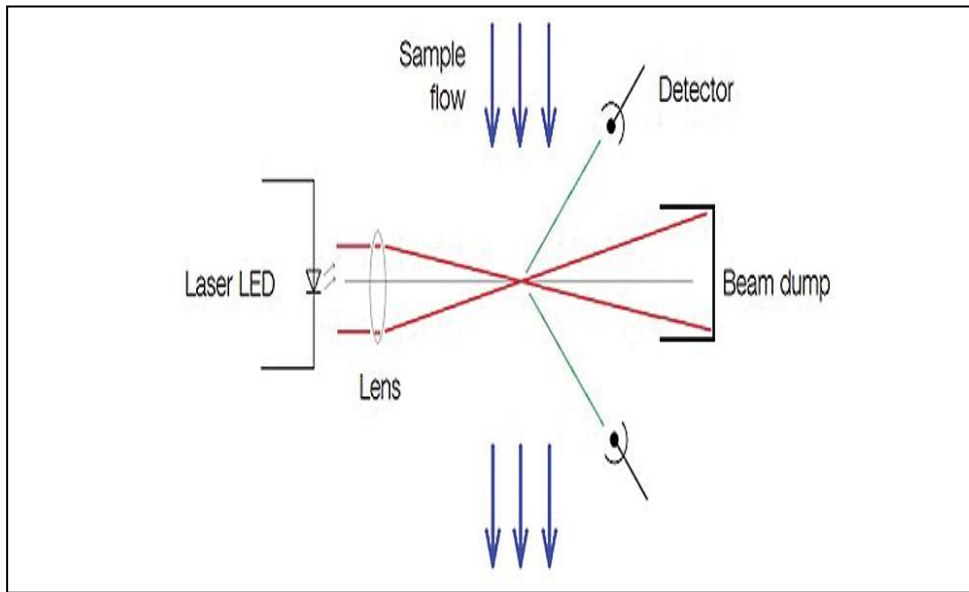


Figure 4.13 : Le principe de fonctionnement d'un compteur de particules basé sur la diffusion MIE.

Avantage

- Réponse rapide et mesure en temps réel.
- Suivi continu possible.
- Bonne sensibilité pour de faibles concentrations

Limites

- Résultats influencés par la taille et la nature des particules.
- Moins adaptés aux mesures de masse sans étalonnage.
- Sensibles aux conditions environnementales, notamment l'humidité

4.5 Méthodes optiques traditionnelles

Les méthodes optiques traditionnelles s'appuient principalement sur l'absorption et la diffusion de la lumière par les particules en suspension. Elles sont largement employées dans les domaines industriel et atmosphérique en raison de leur caractère non invasif, de leur rapidité et de leur capacité à fournir des mesures quasi instantanées. Néanmoins, leur fiabilité peut être limitée dans certaines situations, car elles demeurent sensibles à la taille des particules, à leur densité ainsi qu'aux conditions de mesure [47].

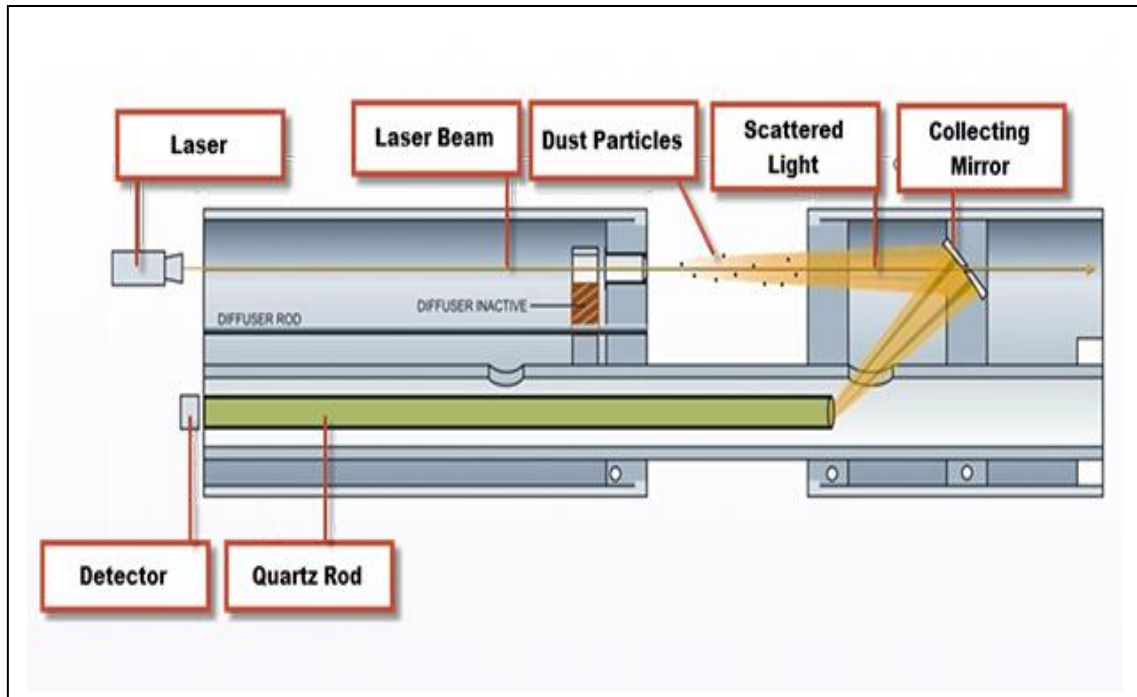


Figure 4.14 : Découvrez comment le 4650-PM mesure la lumière diffusée vers l'avant.

Avantages

- Mesure rapide et quasi instantanée.
- Méthode non intrusive.
- Adaptée au suivi en continu.

Limites

- Forte dépendance à la taille et à la nature des particules.
- Perturbation possible par l'humidité et les gouttelettes d'eau.
- Moins adaptée aux analyses chimiques détaillées.

4.6 Comparaison des nouvelles techniques de détection

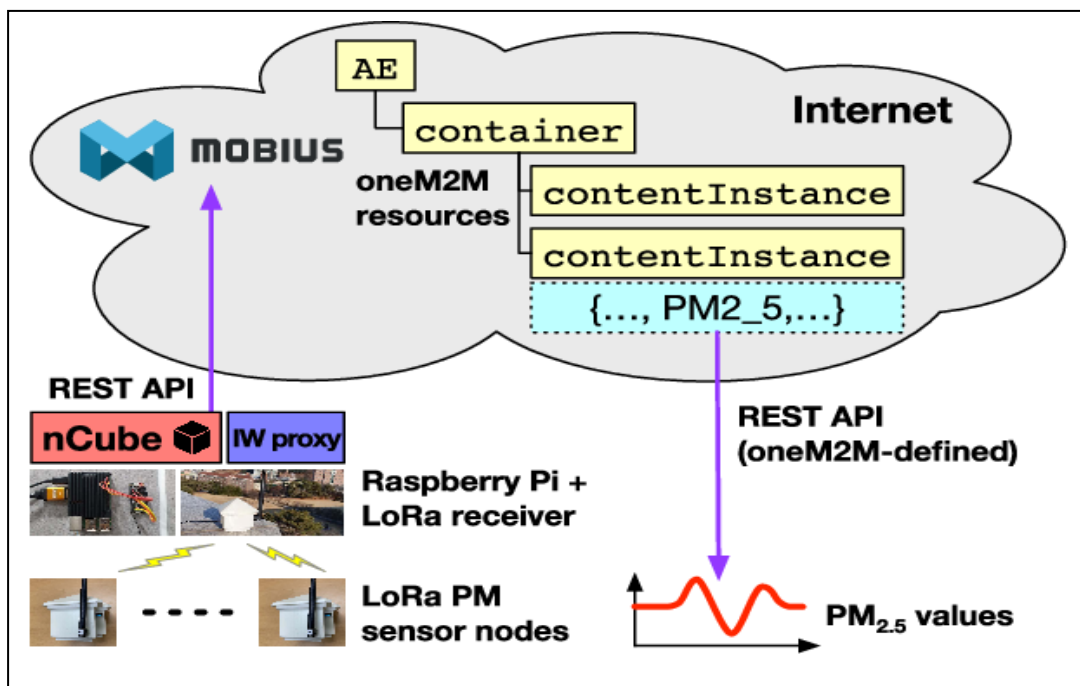
4. 6. 1 Capteurs à bas coût

Les capteurs à bas coût sont des dispositifs compacts conçus pour mesurer les particules fines à moindre coût, avec une faible consommation énergétique et une mise en service simplifiée. Ils sont particulièrement adaptés à la multiplication des points de mesure, permettant ainsi un suivi détaillé des variations spatiales de la pollution grâce à une densité accrue du réseau.

Cependant, leur précision peut fluctuer en fonction de la taille des particules, des conditions environnementales et de la calibration, ce qui nécessite généralement une validation par rapport à une méthode de référence [48].

4.6.2 Internet des objets

L'Internet des objets (IoT) permet de connecter des capteurs à des plateformes numériques pour collecter, transmettre et analyser les données en temps réel. Cette technologie facilite la surveillance continue, le suivi à distance et le déploiement de réseaux distribués sur de larges territoires, souvent en utilisant des technologies à faible consommation comme LoRaWAN. Toutefois, ses principales limites résident dans la qualité des capteurs embarqués, la fiabilité de la connectivité réseau et la calibration des mesures [49].



4. 6. 3

Figure 4.15 : Procédure complète, depuis la mesure des particules dans les nœuds de capteurs basées sur les cartes matérielles disponibles dans le commerce

Télédétection par satellite

La télédétection par satellite offre une couverture spatiale étendue, permettant d'observer la distribution des particules fines à l'échelle régionale voire continentale. Cette technique est particulièrement utile pour analyser les épisodes majeurs de pollution et compléter les mesures au sol par des cartes de concentration à large échelle. Cependant, elle fournit généralement des estimations indirectes de la pollution et présente une précision moindre au niveau local comparativement aux capteurs terrestres ou aux stations de mesure [50].

4.6.4 Réseaux de capteurs intelligents

Les réseaux de capteurs intelligents combinent plusieurs capteurs connectés à des outils de traitement des données, incluant parfois des algorithmes de prévision ou de classification. Ils offrent une surveillance dynamique, une couverture spatiale améliorée et une exploitation plus précise des données en temps réel. Toutefois, leur performance dépend de l'interopérabilité des dispositifs, de la fiabilité des communications et de la qualité de l'étalonnage des capteurs [51].

4.6.5 Intelligence artificielle et apprentissage automatique

L'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique (Machine Learning) représentent une avancée majeure dans le domaine de la détection et du suivi des particules fines, s'intégrant naturellement après l'évolution vers les réseaux de capteurs intelligents. Ces technologies permettent d'exploiter massivement les données collectées pour améliorer la précision, la fiabilité et l'efficacité des systèmes de surveillance.

4.6.6 Utilisation du Machine Learning pour corriger les erreurs de mesure

Le Machine Learning s'avère particulièrement efficace pour corriger les erreurs systématiques des capteurs, en particulier ceux à bas coût, sensibles aux variations environnementales telles que la température, l'humidité ou les vibrations. Les algorithmes d'apprentissage détectent les motifs d'erreur et ajustent les mesures de manière adaptative selon les conditions ambiantes, ce qui peut améliorer la précision des données de 30 à 40 %. Ces modèles sont entraînés à partir de données de calibration issues de stations de référence, permettant une correction continue et automatique des mesures. [52] .

4.7 Méthodes hybrides de surveillance

Les méthodes hybrides de surveillance constituent une approche innovante qui combine plusieurs sources de données et technologies afin d'optimiser le suivi de la qualité de l'air, en tirant parti des complémentarités entre différentes techniques de détection [53]

4.7.1 Combinaison de multiples sources :

Station de référence :Utilisent des méthodes précises (gravimétriques, TEOM, BAM) fournissant des mesures fiables servant à calibrer et valider les autres sources.

Capteurs low-cost : Permettent un déploiement massif et une couverture spatiale étendue, bien que leur précision soit limitée et nécessite une calibration régulière.

IoT (Internet of Things) :Réseaux connectant les capteurs low-cost pour une collecte en temps réel, une transmission automatique et une analyse centralisée des données.

Chapitre 4 : Discussions et perspectives futures

Données satellitaires : Fournissent une surveillance atmosphérique à grande échelle (concentrations de PM_{2.5}, PM₁₀, aérosols), complétant les mesures locales et offrant une couverture mondiale.

4.7.2 Avantages des méthodes hybrides

Tableau 4.10 : Avantages des méthodes hybrides

avantage	Explication
Meilleure précision	La combinaison de stations de référence (haute précision) et de capteurs low-cost (couverture étendue) permet d'obtenir des mesures précises sur toute la zone surveillée, avec calibration continue des capteurs low-cost par référence aux stations de référence
Réduction des coûts	Le déploiement massif de capteurs low-cost à coût faible réduit considérablement les coûts d'investissement comparé au déploiement de multiples stations de référence coûteuses (TEOM, BAM)
Couverture spatiale étendue	Les capteurs low-cost et les données satellitaires permettent une couverture géographique large, identifiant les zones de pollution qui seraient autrement non surveillées par les stations de référence fixes
Temps réel	Les réseaux IoT permettent une collecte et transmission de données en temps réel, facilitant la détection rapide des pics de pollution et la mise en place de mesures préventives
Robustesse	La combinaison de multiple sources de données réduit la dépendance à une seule technique, augmentant la robustesse du système face aux défaillances de capteurs ou aux conditions environnementales extrêmes

4.8 Discussion des résultats

4.8.1 Techniques les plus performantes

Les instruments de référence, en particulier les méthodes gravimétriques et les systèmes de surveillance calibrés sur des équipements standards, demeurent les techniques les plus performantes grâce à leur fiabilité et leur précision élevées. Cependant, plusieurs études

Chapitre 4 : Discussions et perspectives futures

démontrent que certains capteurs à bas coût peuvent atteindre des performances satisfaisantes après calibration locale, notamment pour le suivi des variations des particules fines. En pratique, l'efficacité réelle de ces dispositifs dépend fortement du contexte de mesure, de l'humidité ambiante, de la composition des aérosols et de la qualité de l'étalonnage [54].

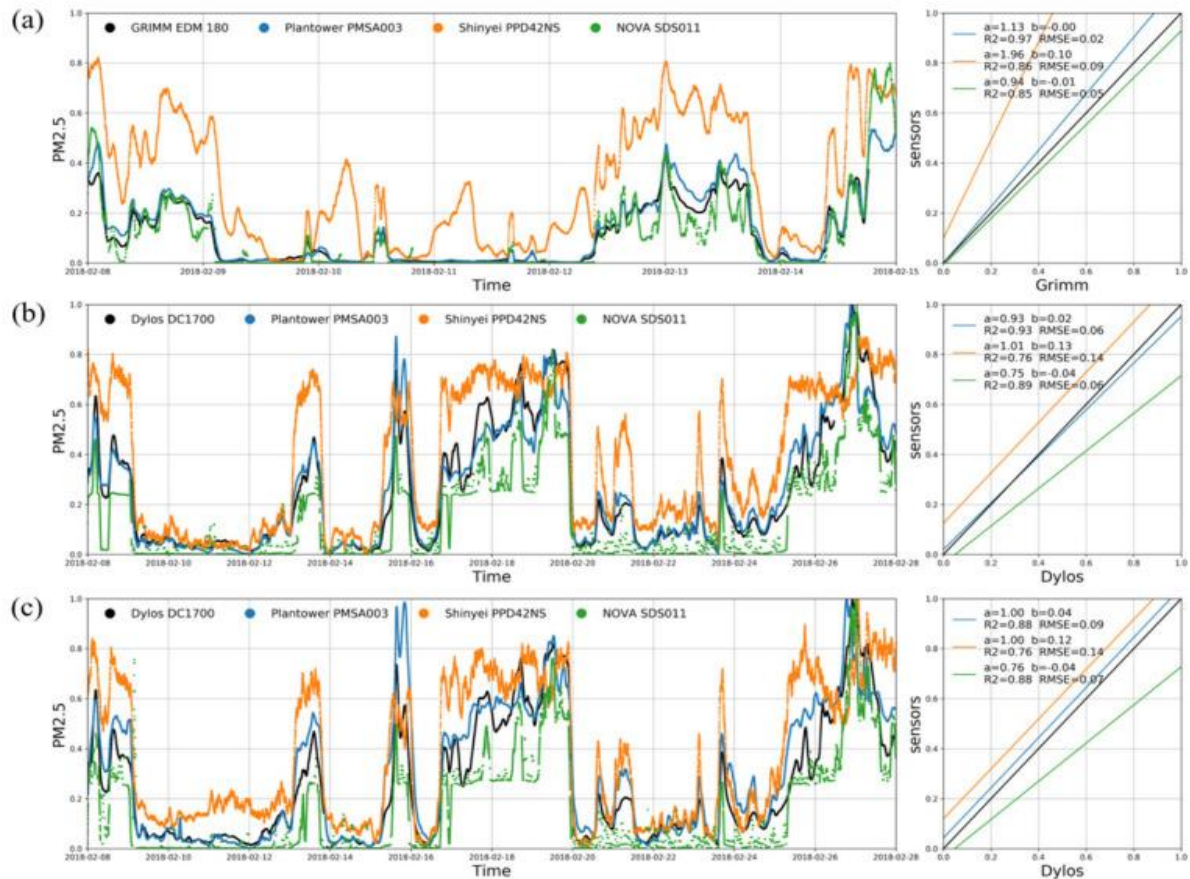


Figure 4.16 : Comparaison entre (a) le premier ensemble de capteurs PM et de données horaires GRIMM du 8 février 2018 au 15 février 2018, (b) le deuxième ensemble de capteurs PM et de données horaires Dylos du 8 février 2018 au 28 février 2018 et (c) le troisième ensemble de capteurs PM et les données horaires Dylos du 8 février 2018 au 28 février 2018.

4.8.2 Techniques les plus économiques

Les techniques les plus économiques sont les capteurs à bas coût et les solutions basées sur l'Internet des objets (IoT), dont le coût unitaire est nettement inférieur à celui des stations de référence. Leur principal avantage réside dans la possibilité de déployer un grand nombre de points de mesure à moindre coût, améliorant ainsi la densité spatiale du suivi. Toutefois, ces

économies impliquent des besoins accrus en calibration, maintenance et gestion des données afin d'assurer la qualité des résultats [55].

4.8.3 Solutions adaptées aux pays en développement

Les solutions les mieux adaptées aux pays en développement sont généralement les réseaux de capteurs à bas coût associés à l'Internet des objets (IoT). Ils permettent de pallier les insuffisances des réseaux traditionnels de surveillance tout en restant financièrement accessibles. Ces systèmes assurent une couverture spatiale étendue et peuvent être déployés à l'échelle communautaire ou urbaine pour générer des données locales exploitables. Néanmoins, leur mise en place nécessite une stratégie de calibration, une alimentation électrique stable et une infrastructure minimale pour la transmission et le traitement des données [56].

4.8.4 Perspectives futures

Les perspectives futures visent le développement de systèmes hybrides alliant capteurs à bas coût, Internet des objets (IoT), modèles avancés de calibration et traitement intelligent des données. L'intégration de l'apprentissage automatique devrait permettre d'améliorer la correction des biais et la qualité des mesures en conditions réelles. À terme, la combinaison des capteurs au sol avec les données issues de la télédétection et des réseaux intelligents offrira un suivi plus complet, rapide et précis de la pollution par les particules fines [57].

Chapitre 4 : Discussions et perspectives futures

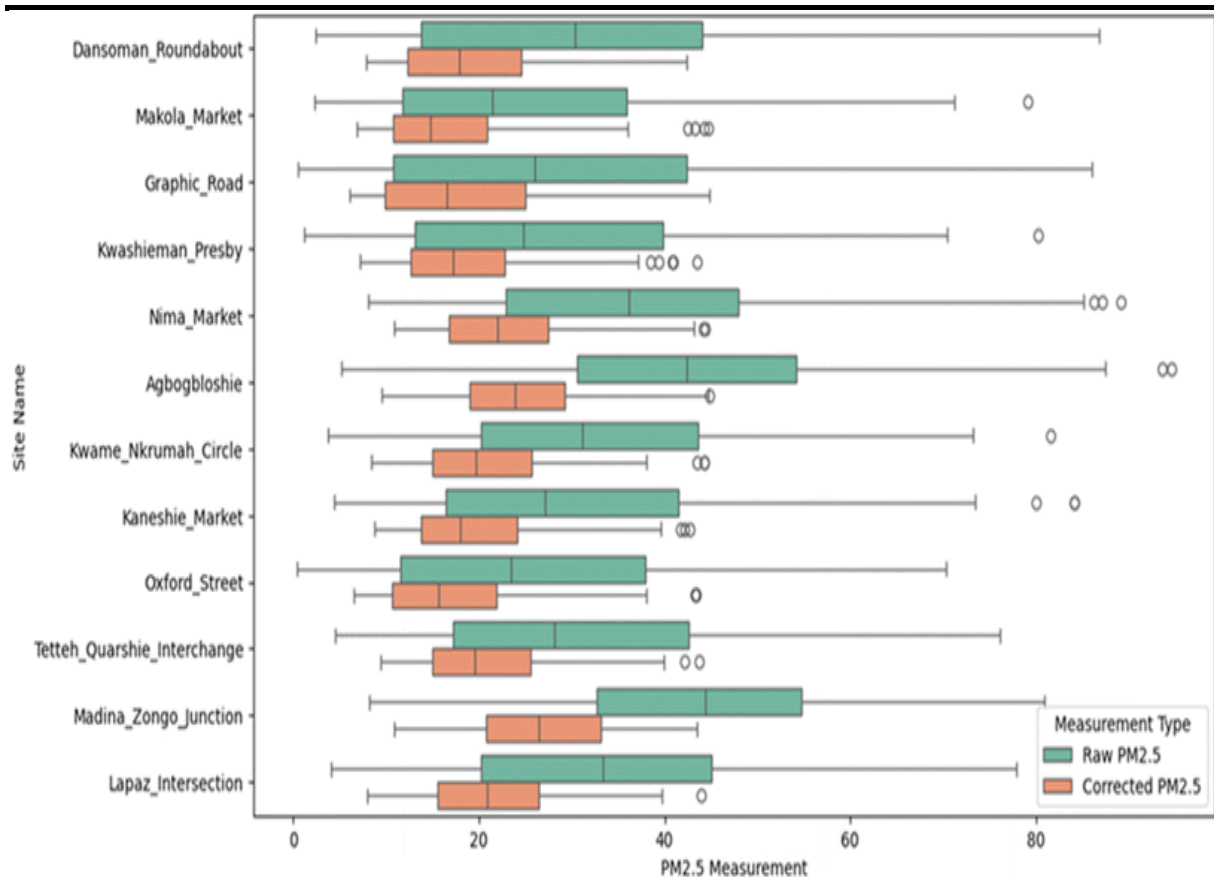


Figure 4.17 : Mesures PM_{2,5} enregistrées par le capteur Clarity S Node sur les sites de déploiement.

4.9 Conclusion

En conclusion, l'analyse comparative des techniques de détection et de suivi des particules fines révèle que chaque méthode possède des avantages et des limites en fonction des objectifs visés. Les techniques classiques demeurent les plus fiables et précises, mais leur coût élevé et leur faible flexibilité limitent leur déploiement à grande échelle. À l'inverse, les solutions émergentes basées sur les capteurs à bas coût, l'Internet des objets et les réseaux intelligents offrent une meilleure accessibilité, une surveillance plus dense et un suivi en temps réel mieux adapté aux exigences contemporaines. Cependant, leurs performances sont fortement conditionnées par la calibration, les conditions environnementales et la qualité du traitement des données. Il en ressort que la solution la plus appropriée n'est pas forcément la plus précise ou la plus onéreuse, mais celle qui s'adapte le mieux au contexte d'utilisation. Les approches hybrides, combinant capteurs économiques, calibration avancée et intégration des données, représentent une voie prometteuse pour l'évolution future de la surveillance des particules fines.

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire consacré à l'étude des nouvelles techniques de détection et de suivi des polluants par les particules fines PM1.0, PM2.5 et PM10, il ressort clairement que la surveillance de la qualité de l'air constitue aujourd'hui un enjeu scientifique, environnemental et sanitaire majeur. La pollution particulaire, en raison de sa fréquence, de sa dispersion et de ses impacts sur l'organisme, nécessite des outils de mesure capables non seulement d'identifier la présence des particules, mais aussi de suivre leur évolution dans le temps et dans l'espace. Les particules fines, par leur petite taille, présentent en effet une capacité de pénétration élevée dans le système respiratoire, ce qui renforce l'intérêt de leur détection précise et continue.

La partie des généralités nous a permis de mettre en évidence la distinction entre les différentes fractions particulaires, notamment les PM10, PM2.5 et PM1.0, dont le comportement atmosphérique et les effets sanitaires diffèrent selon leur diamètre aérodynamique. Plus la taille des particules diminue, plus leur durée de suspension dans l'air augmente et plus leur impact potentiel sur la santé devient important. Cette classification est essentielle pour comprendre les mécanismes de pollution et orienter le choix des méthodes de mesure les plus pertinentes.

L'analyse des sources a montré que les particules fines peuvent provenir de phénomènes naturels, tels que l'érosion des sols, les tempêtes de poussière, les embruns marins, les éruptions volcaniques ou encore les feux de végétation, mais aussi de sources anthropiques liées aux activités humaines. Parmi ces dernières, le trafic routier, le chauffage domestique, les procédés industriels, les chantiers et certaines pratiques agricoles occupent une place importante. Cette diversité des origines explique la complexité du suivi des particules fines et la nécessité d'utiliser des méthodes de mesure capables de fonctionner dans des contextes très variés.

L'étude comparative des techniques classiques a montré que les méthodes gravimétriques, les compteurs de particules et les méthodes optiques traditionnelles restent des références importantes dans le domaine de la mesure des particules fines. Leur principal avantage réside dans leur fiabilité et dans leur rôle de base de calibration pour d'autres dispositifs. Cependant, elles présentent des inconvénients notables, notamment un coût élevé, une maintenance importante, une mise en œuvre parfois lourde et un temps de réponse limité. Ces contraintes réduisent leur capacité à assurer une surveillance dense, continue et accessible à grande échelle.

À l'inverse, l'analyse des nouvelles techniques de détection a mis en évidence l'intérêt croissant des capteurs à bas coût, de l'Internet des objets, de la télédétection par satellite et des réseaux de capteurs intelligents. Ces solutions offrent une meilleure flexibilité de déploiement, une couverture spatiale plus large et une possibilité de suivi en temps réel. Elles répondent ainsi aux exigences actuelles de surveillance fine de la pollution atmosphérique, notamment dans les zones urbaines et industrielles où les variations de concentration peuvent être rapides et localisées.

Les capteurs à bas coût constituent sans doute l'une des avancées les plus prometteuses. Leur faible prix d'acquisition, leur compacité et leur facilité d'intégration dans des réseaux distribués permettent de multiplier les points de mesure et d'obtenir une image plus détaillée de la pollution. Leur association à l'Internet des objets renforce encore leur intérêt, en facilitant la transmission automatique des données, la supervision à distance et l'exploitation temps réel. Dans plusieurs travaux récents, des réseaux IoT de capteurs ont été déployés à grande échelle avec des résultats encourageants pour le suivi des PM_{2.5} et PM₁₀.

Toutefois, ces nouvelles solutions ne peuvent pas être considérées comme totalement autonomes ni exemptes de limites. Leur performance dépend fortement de la calibration, des conditions environnementales, de l'humidité, de la température, de la composition des aérosols et de la stabilité des capteurs dans le temps. La littérature montre qu'une calibration locale ou hybride, souvent appuyée par des méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique, améliore significativement la qualité des mesures. Cela confirme que la valeur d'un capteur à bas coût ne réside pas seulement dans son prix, mais dans l'ensemble du système de traitement, de correction et d'interprétation des données qui l'accompagne.

Dans ce cadre, les réseaux de capteurs intelligents apparaissent comme une solution d'avenir. En combinant plusieurs dispositifs connectés, des algorithmes de traitement et parfois des outils prédictifs, ils permettent non seulement de mesurer les concentrations de particules fines, mais aussi d'anticiper certains épisodes de pollution et d'identifier des tendances locales. La télédétection par satellite, quant à elle, complète utilement les observations au sol en offrant une vision globale à grande échelle, même si elle reste moins précise pour les mesures locales directes.

Ce travail montre également que les solutions les plus adaptées ne sont pas nécessairement les plus coûteuses ni les plus sophistiquées, mais celles qui répondent le mieux au contexte d'utilisation. Dans les pays en développement, où les réseaux de surveillance classiques sont

souvent insuffisants ou trop onéreux, les capteurs à bas coût associés à l'IoT représentent une alternative particulièrement pertinente. Ils permettent d'améliorer la disponibilité des données, de réduire les coûts d'installation et de favoriser une surveillance plus équitable de la qualité de l'air. Leur déploiement doit cependant s'accompagner d'une stratégie rigoureuse de calibration, de validation et de maintenance.

D'un point de vue technique et scientifique, les perspectives futures sont très prometteuses. Les recherches actuelles s'orientent vers des systèmes hybrides combinant capteurs compacts, intelligence artificielle, réseaux communicants et fusion de données provenant de plusieurs sources. Cette évolution devrait permettre d'améliorer la fiabilité des mesures, de réduire les biais de calibration et de renforcer la capacité de surveillance à long terme. L'intégration des données issues du sol, des plateformes connectées et de la télédétection constitue sans doute l'une des voies les plus intéressantes pour une gestion moderne et efficace de la pollution atmosphérique.

En conclusion, ce mémoire met en évidence que l'étude des nouvelles techniques de détection et de suivi des particules fines PM_{1.0}, PM_{2.5} et PM₁₀ s'inscrit dans une dynamique de transformation profonde des systèmes de surveillance environnementale. Les techniques classiques conservent leur rôle de référence, mais les solutions innovantes ouvrent la voie à une surveillance plus dense, plus réactive et plus accessible. L'avenir repose donc sur des approches intelligentes, connectées et calibrées, capables d'offrir des données fiables pour mieux comprendre, suivre et réduire la pollution par les particules fines.

Bibliographie

- [1] Nederman MikroPul, PM10 et PM2.5, consulté le 26 mai 2026.
- [2] Ministère de la Transition écologique. (2023). Les polluants de l'air : situation, impacts et encadrement. Consulté le 26 mai 2026, sur <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/polluants-lair-situation-impacts-encadrement>
- [3] KERCHICH, Y. Pollution atmosphérique. Alger : Ecole Nationale Polytechnique. Publication ENP 5ème année, cours, 2020
- [4] DELTRIAN, PM1 – Comprendre les particules fines (PM10, PM 2.5 et PM1), disponible sur : <https://www.deltrian.com/fr/actualites/article/pm1>, consulté le 26 mai 2026.
- [5] Préfecture de l'Aude, Pollution de l'air par les particules en suspension (PM10), disponible sur : <https://www.aude.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Solidarite.-sante.-handicap-et-cohesion-sociale/Sante/Pollution-de-l-air-par-les-particules-en-suspension-PM10>, consulté le 26 mai 2026.
- [6] AIRPARIF, Les particules fines, disponible sur : <https://www.airparif.fr/les-particules-fines>, consulté le 26 mai 2026.
- [7] NEDERMAN MikroPul, PM10 and PM2.5 – Knowledge Center, disponible sur : <https://www.nedermanmikropul.com/fr-fr/knowledge-center/pm10-and-pm2-5>, consulté le 26 mai 2026.
- [8] INSEE, PM10 et PM2.5, disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2196>, consulté le 26 mai 2026.
- [9] DELTRIAN, PM1, disponible sur : <https://www.deltrian.com/fr/actualites/article/pm1>, consulté le 26 mai 2026.
- [10] Mpoyo Kumwimba Paul Didi, Pollution atmosphérique par par les fines particules PM2,5 et PM10 le long de la route Kassapa dans la ville de Lubumbashi, République Démocratique du Congo , Mémoire de DEA en Sciences chimiques, Université de Lubumbashi (2022)
- [11] Ministère de la Transition écologique, Les polluants de l'air : situation, impacts et encadrement, disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/polluants-lair-situation-impacts-encadrement>, consulté le 26 mai 2026.
- [12] Benammar Soufiane Bahi, Contribution à l'étude des paramètres influençant la dispersion Atmosphérique des polluants émis par une centrale Energétique, master en physique, Université de Tlemcen (2021).
- [13] Organisation Mondiale de la Santé (OMS), WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide, Genève, 2021.

[14] Commission européenne, Directive (EU) 2024/2881 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe, Bruxelles, 2024.

[15] République Algérienne Démocratique et Populaire, Décret exécutif n°06-02 du 07 janvier 2006 fixant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique, Journal Officiel de la République Algérienne, 2006.

[16] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Indice de la qualité de l'air (IQA) - Guide méthodologique, Québec, Canada.

[17] United States Environmental Protection Agency, Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – Air Quality Index (AQI), Washington D.C., USA, 2024.

[18] European Environment Agency, Air Quality Monitoring Network in Europe, Copenhagen, 2024.

[19] World Meteorological Organization, Global Atmosphere Watch (GAW) Programme Report, Genève, 2024.

[20] Techniques de l'Ingénieur. (s.d.). Une diversité d'outils et de méthodes pour mesurer les polluants non réglementés dans l'air. Consulté le 21 mai 2026,

[21] Boutibi Boutlelis et Kelkoul Hassène Hichem, Les nouvelles techniques pour l'identification de la pollution dans une zone industrielle. Mémoire de master, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed (2021).

[22] AUTEUR(S). Titre de l'article [en ligne]. In: IOS Press / ACM Digital Library. DOI: <https://doi.org/10.3233/AIS-220577>. Consulté le 21/05/2026.

[23] AUTEUR(S). Titre de l'article [en ligne]. PubMed Central (PMC), National Center for Biotechnology Information (NCBI), s.d. Disponible sur : <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7730878/> (consulté le 21/05/2026).

[24] Peixe, J. et Marques, G. Low-cost IoT-enabled indoor air quality monitoring systems: A systematic review. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, vol. 16, no 2, 2024, p. 167–180.

[25] Contrex AG. Compteur de particules de condensation UF-CPC.

[26] Krishna, M. T. et Chauhan, A. J. Air Pollution and Health. Proceedings of the Royal Society of Medicine, vol. 57, no 5, 1964, p. 448–452.

[26] Morali, A. (2023). Impression 3D de capteurs piézoélectriques et intégration aux polymères renforcés [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].

[27] Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. (2019). MOBICITAIR – Évaluation des micro-capteurs TERA : Rapport d'étude. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- [28] Shukla, K., & Aggarwal, S. G. (2022). A Technical Overview on Beta-Attenuation Method for the Monitoring of Particulate Matter in Ambient Air. *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 220195.
- [29] Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. C. et Kumar, N. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, vol. 40, no 30, 2006, p. 5880–5892.
- [30] Woźniak, M. et Knoblich, G. Communication and action predictability: two complementary strategies for successful cooperation . *Royal Society Open Science*, vol. 9, 2022, article 220577.
- [31] NATURE INDEX. Satellite remote sensing for air quality assessment [en ligne]. Nature Index, Springer Nature. Disponible sur : <https://www.nature.com/nature-index/topics/14/satellite-remote-sensing-for-air-quality-assessment> (consulté le 21/05/2026).
- [32] Fluke Reliability. Capteur piézoélectrique : définition, avantages, fonctionnement. Fluke Corporation
- [33] 1. Bendifallah, A., Capteurs et Instrumentation – Chapitre 2, Université Batna 2, Département d'Électronique, Algérie. Disponible sur : Chapitre 2 Capteurs et Instrumentation (consulté le 31 mai 2026).
- [34] Bendifallah, A., Capteurs et Instrumentation – Chapitre 2, Université Batna 2, Algérie. Disponible sur : https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bendifallah_ahmed/files/chapitre_2_capteurs_et_instrumentation.pdf (consulté le 31 mai 2026).
- [35] G. Perrin, Mieux comprendre pour mieux mesurer : défis et avancées en calibration de capteurs de pollution en environnement ouvert, ETICS 2025, CNRS, 2025. https://uq.math.cnrs.fr/media/etics2025_perrin.pdf
- [36] CRAPC, Guide des équipements PTAPC 2022, Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques, Algérie, 2022. <http://dalile-infra.dgrsdt.dz/infrastructure/wp-content/uploads/2020/09/Guide-equipements-PTAPC-2022.pdf>
- [37] LCSQA, Protocole d'évaluation des micro-capteurs pour la mesure des concentrations massiques particulaires, 2016. https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/lcsqa2016_protocole_evaluation_micro-capteurs-md.pdf
- [38] Kunak Air, Calibration des capteurs de qualité de l'air : précision, fiabilité et excellence dans les mesures environnementales, 2025. <https://kunakair.com/fr/calibration-des-capteurs-de-qualite-de-air/>

- [34] AQUAREF, Protocoles d'évaluation des performances des capteurs et instruments pour la mesure in situ des paramètres physico-chimiques dans l'eau, 2012. https://www.aquaref.fr/sites/default/files/2012LNE7_protocoles_capteurs.pdf
- [35] G. Perrin, M. Dumon, B. Lebental, Mieux comprendre pour mieux mesurer : défis et avancées en calibration de capteurs de pollution en environnement ouvert, ETICS 2025, CNRS / Université Gustave Eiffel, 2025. https://uq.math.cnrs.fr/media/etics2025_perrin.pdf
- [36] N. Fourati, HDR – Habilitation à Diriger des Recherches (travaux sur capteurs et systèmes de détection), CNAM Paris, 2023. https://hal.science/tel-04144683v1/file/HDR_Najla_Fourati_Public.pdf
- [37] Farnaz Fouladi, Maximilian J Bailey et al, Air pollution exposure is associated with the gut microbiome as revealed by shotgun metagenomic sequencing, *j.envint.* 138.105604. Epub 2020
- [38] Florentin M. J. Bulot, Steven J. Johnston et al, Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment, *Scientific Reports* volume 9, 2019, 7497
- [39] Adnan Masic, Dzevad Bibi et al, Evaluation of optical particulate matter sensors under realistic conditions of strong and mild urban pollution, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 6427-6443, 2020
- [40] Prashant Kumar, Lidia Morawska et al, The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205, 2015
- [41] Brigida Alfano, Luigi Baretta et al, A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives, *Sensors*, 20(23), 6819, 2020
- [42] Prashant Kumar, Sarkawt Hama et al, Temporary reduction in fine particulate matter due to 'anthropogenic emissions switch-off' during COVID-19 lockdown in Indian cities. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102382, 2020.
- [43] Mohsen Ahmadi, Abbas Sharif et al, Investigation of effective climatology parameters on COVID-19 outbreak in Iran, *Science of the Total Environment*, 729, 1387051, 2020
- [44] Emissions Testing: Particulate Matter Measurement. Consulté le 2 juin 2026, sur la page officielle Mettler Toledo
- [45] Emissions Testing: Gravimetric Analysis of Particulate Matter. Consulté le 2 juin 2026, sur Emissions Testing – Gravimetric Analysis of Particulate Matter.
- [46] Löfstedt, B. (2024). Inside the Particulate Monitor – Optical Methods. OPSIS AB. Publié le 11 mars 2024.
- [47].Stuart, D. (2020, December 1). The Pros and Cons of Particulate Matter Monitors. AMETEK Land.

- [48] NicoleHannah Cowell , Lee Chapman, Field Calibration and Evaluation of an Internet-of-Things-Based Particulate Matter Sensor, *Front. Environ. Sci.*9, 2022
- [49] Yun, J., Woo, J., & Kim, J. (2021). IoT-Enabled Particulate Matter Monitoring and Forecasting Method Based on Cluster Analysis, *IEEE Internet of Things Journal* PP(99):1-1,2020
- [50] Jiayu Li, Huang Zhang et al , Integrating low-cost air quality sensor networks with fixed and satellite monitoring systems to study ground-level PM_{2.5}. *Atmospheric Environment*, 223, 117293, 2020
- [51] Yuxuan Yang, IoT-based air pollution monitoring system, *Highlights in Science Engineering and Technology* 17:299-307,2022
- . [52] Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. (2019). MOBICITAIR – Évaluation des micro-capteurs TERA : rapport d'étude. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes
- [53] Wikipedia contributors. Beta attenuation monitoring. Wikipedia, The Free Encyclopedia
- [54] Han Mei et al, Field Evaluation of Low-Cost Particulate Matter Sensors in Beijing. *Sensors*, 20(15), 4381, 2020.
- [55] Lidia Morawska , Phong K Thai et al, Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone ?*Environ int*, 116:286-299, 2018
- [56] Amit Kumar, Bhola R Gurjar , Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring in Developing Countries – A Critical View. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 16(2), 65–70,2019.
- [57] Patricke Attey Yeboah, Cristian Afful, Utility of low-cost sensor measurement for predicting ambient PM_{2.5} concentrations: evidence from a monitoring network in Accra, Ghana, *Environmental Science: Atmospheres*, 5, 517–529. 10, 2025