



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP  
Toulouse)*

---

Présentée et soutenue le 00/00/2023 par:  
**Sylvain POUPRY**

---

### **Contribution à la conception et à la mise en œuvre d'un système de surveillance de la qualité de l'air**

Application à la surveillance de la qualité de l'air dans les vallées des Gaves

---

#### **JURY**

John <b>PAIN</b>	Professeur des Universités, xxx, Toulon	Rapporteur
John-John <b>HAPPY</b>	Professeur des Universités, xxx, Paris	Examinateur
Kamal <b>MEDJAHER</b>	Professeur des Universités, ENIT, Tarbes	Directeur de thèse
Cédrick <b>BÉLER</b>	Maître de Conférences, ENIT, Tarbes	Co-encadrant de thèse

---

**École doctorale et spécialité :**

*EDSYS : Génie Industriel*

**Unité de Recherche :**

*Laboratoire Génie de Production*

# **Contribution à la conception et à la mise en œuvre d'un système de surveillance de la qualité de l'air :**

Application à la surveillance de la qualité de l'air dans les vallées des Gaves

**Sylvain POUPRY**

## **Abstract**

Cette thèse vise à mettre en place une démarche scientifique de surveillance et d'action de prévention de la qualité de l'air dans des zones dépourvues de stations de mesure conventionnelles. En effet, en raison d'un budget limité, des communes modestes ne disposent pas d'un moyen fiable et continu de collecter des mesures pour avoir un suivi de la qualité de l'air et de mener des actions sur le territoire en conséquence. Pour relever ce défi, cette thèse propose une approche innovante qui combine des micro-capteurs ou Low Cost Sensors (LCS) et des méthodologies de Prognostics Health Management (PHM). L'approche proposée est une proposition d'architecture permettant l'auto-surveillance et l'auto-reconfiguration sur elle même et également de générer des données fiables pour surveiller, prédire et agir sur la qualité de l'air au sein d'un territoire non couvert par les stations conventionnelles ATMO.

La thèse commence par le développement de LCS capables de collecter des données sur la qualité de l'air. Cependant, ces capteurs présentent certaines limitations, notamment au niveau du matériel et de la fiabilité des données. Pour répondre à ces limitations, une architecture basée sur la redondance est proposée pour augmenter la disponibilité du matériel et la fiabilisation des données collectées. **Fiabilité: des résultats précis et cohérents sur une longue période de temps, malgré les perturbations ou les dysfonctionnements éventuels.**

L'étape suivante consiste à développer des modèles de prédiction qui aideront les autorités à prendre des décisions éclairées sur la qualité de l'air. Ces modèles seront basés sur les données collectées par les LCS, et prendront en compte les caractéristiques spécifiques de l'environnement local.

La thèse conclut que si l'approche proposée est prometteuse, il reste encore du travail à faire. Plus précisément, il est nécessaire de développer davantage les outils de prédiction des défaillances des capteurs et d'améliorer l'évolutivité et la cybersécurité du système. Des algorithmes d'apprentissages automatiques, tels que les autoencodeurs, pourraient être utilisés pour prédire les défaillances des capteurs.

**Keyword:** Cyber-Physical System, Internet of Things, Prognostics & Health Management, air quality, citizen engagement, natural system.

# Dédicaces

Cette thèse est dédiée à ma femme Élodie qui a tout fait pour que ce soit possible

# **Publications de l'auteur**

Conférence internationales avec comité de lecture  
Revues internationales

# Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du (LGP) Laboratoire Génie de Production de Tarbes. Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements à Monsieur BÉLER Cédrik, Maître de Conférences, pour avoir su voir en moi mon potentiel et permis mon intégration dans ce projet. Je tiens à souligner que son ouverture d'esprit, sur les technologies de l'informatique et de la communication, m'a fortement inspiré. Il m'est particulièrement agréable de remercier Monsieur MEDJAHER Kamal, Professeur des Universités, qui, grâce à son intervention a permis de rendre possible cette thèse. Ses qualités humaines et son savoir m'ont permis de m'améliorer constamment et de devenir plus performant en tant que chercheur.

Je ne saurais terminer sans remercier Monsieur CLAVERIE Pascal, PDG de l'entreprise ALTELA, pour son humanité et son soutien sans faille dans mon projet de reprise d'études. Sans son accord, ce projet n'aurait pu aboutir. Pour finir, je veux te remercier, à toi Elodie : tu as cru en moi. Ta foi inébranlable en mes capacités m'a donné la force et le courage d'arriver à bout de ces études. Dans le meilleur comme dans le pire tu as été à côté de moi et tu as su me rassurer dans mes moments de doutes. Pour tout cela je te remercie de tout mon cœur ma femme ! "Don't give up, I won't give up" - The Greatest - SIA

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>11</b>
1.1	Contexte . . . . .	11
1.2	Motivation . . . . .	13
1.2.1	L'inventaire des émissions . . . . .	13
1.2.2	Sources de pollution du secteur résidentiel . . . . .	14
1.2.3	Sources de pollution des activités agricoles . . . . .	15
1.2.4	Sources de pollution du secteur transport . . . . .	16
1.2.5	Sources de pollution du secteur industrie . . . . .	16
1.2.6	Les attentes de la CCPVG . . . . .	17
1.3	Problématiques . . . . .	19
1.4	Questions de recherche . . . . .	19
1.4.1	Acquisition de mesures fiables de la qualité de l'air . . . . .	20
1.4.2	Détection des défaillances et prédition de l'état de santé des stations de mesure . . . . .	20
1.4.3	La couverture en tout point du territoire à partir de mesures de stations . . . . .	20
1.4.4	La validation des acquisitions et la modélisation de la pollution de l'air . . . . .	20
1.5	Objectifs de recherche . . . . .	21
1.6	Contribution par rapport à l'état de l'art . . . . .	21
1.7	Structure de la thèse . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>24</b>
2.1	La pollution atmosphérique . . . . .	24
2.1.1	Origine des polluants . . . . .	24
2.1.2	Cycle de vie des émissions . . . . .	26
2.1.3	La dégradation des polluants . . . . .	27
2.1.4	La dispersion des polluants . . . . .	28
2.1.5	Les phénomènes météorologiques particuliers . . . . .	29
2.1.6	Les principaux polluants surveillés . . . . .	31
2.1.7	Conclusion de la pollution atmosphérique . . . . .	32
2.2	La surveillance de la Qualité de l'air . . . . .	33
2.2.1	Le LCSQA . . . . .	33
2.2.2	Les Normes de la qualité de l'air . . . . .	34
2.2.3	Les AASQAs . . . . .	36
2.2.4	Le réseau de surveillance d'ATMO OCCITANIE . . . . .	37
2.2.5	La représentativité des stations de mesures . . . . .	41
2.2.6	Les Technologies de surveillance de la qualité de l'air . . . . .	42

2.3	Etat de l'art sur les capteurs à bas coût (Low-Cost Sensors) . . . . .	45
2.3.1	Définition . . . . .	45
2.3.2	Les capteurs de particules . . . . .	47
2.3.3	les capteurs de gaz . . . . .	47
2.3.4	État de l'art de la surveillance avec des micro-capteurs . . . . .	50
2.3.5	conclusion . . . . .	53
2.4	État de l'art acquisitions, traitements et fiabilisation des données . . . . .	54
2.4.1	Acquisition des données afin d'alimenter un modèle pour faire des prédictions: l'exemple de la météorologie . . . . .	54
2.4.2	Le Prognostics and Health Management (PHM) dans l'industrie . .	54
2.4.3	Acquisition des observations: augmenter le maillage . . . . .	56
2.4.4	La fiabilisation des données en un point d'observation . . . . .	57
2.4.5	La triple redondance modulaire et les algorithmes de vote . . . . .	58
2.4.6	Les algorithmes de détection des défaillances (santé du système) .	59
2.5	État de l'art des architectures à triple redondance sur la qualité de l'air .	60
2.5.1	Les incertitudes de mesures . . . . .	60
2.6	Les algorithmes prédictifs pour la qualité de l'air . . . . .	60
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>62</b>

# Table des figures

1.1	Situation géographique et relief de la CCPVG (géoportal.fr) . . . . .	12
1.2	TMJA des routes de la CCPVG (ccpvg.fr) . . . . .	17
1.3	Situation géographique de la CCPVG par rapport aux stations de mesures conventionnelles . . . . .	18
2.1	Gaz constituant l'atmosphère [1] . . . . .	25
2.2	Cycle de vie des émissions [3] . . . . .	26
2.3	Variabilité spatiale et temporelle des constituants clés de l'atmosphère [5] .	27
2.4	Profil vertical de température et principales couches de l'atmosphère [7] .	28
2.5	Structure de la troposphère [7] . . . . .	29
2.6	Schéma de fonctionnement du dispositif national français [14] . . . . .	34
2.7	Extrait du tableau des normes Qualité de l'air [16] . . . . .	35
2.8	Extrait du tableau des normes Qualité de l'air [17] . . . . .	35
2.9	Calcul de l'indice à partir d'un modèle méso-échelle [17] . . . . .	36
2.10	Le cadre réglementaire de la surveillance de la qualité de l'air [19] . . . . .	37
2.11	Comment sont modélisées les cartes de la Qualité de l'Air [14] . . . . .	39
2.12	Photographies d'une station fixe et d'une station mobile du réseau Atmo [20] . . . . .	40
2.13	Chaîne de mesure de la qualité de l'air pour les AASQA [21] . . . . .	44
2.14	Cartographie annuelle de la pollution en PM10 avec et sans micro-capteurs ( <a href="http://www.atmosud.org">www.atmosud.org</a> ) . . . . .	44
2.15	Projet citoyen Mobicit'air ( <a href="http://atmo-auvergnerhonealpes.fr">atmo-auvergnerhonealpes.fr</a> ) . . . . .	45
2.16	Principe de fonctionnement d'un capteur . . . . .	46
2.17	Illustration des critères fidélité, justesse et exactitude . . . . .	46
2.18	Fonctionnement du capteur de poussière SDS011 [24] . . . . .	47
2.19	Fonctionnement capteur électrochimique [25] . . . . .	48
2.20	Principe de fonctionnement d'un capteur $MO_x$ [26] . . . . .	48
2.21	Principe de fonctionnement capteur IR [27] . . . . .	49
2.22	Principe de fonctionnement capteur PID [28] . . . . .	49
2.23	Étapes d'implémentation du PHM [37] . . . . .	55

# Liste des tableaux

2.1	Labélation de station en fonction des combinaisons possibles pour le couple station/polluant [21]. . . . .	42
2.2	Méthodes d'analyse pour la surveillance réglementaire des polluants [21]. .	43
2.3	Une sélection d'études portant sur les micro-capteurs. . . . .	51
2.4	Sélection d'études portant sur des application de déploiement de LCS pour la surveillance de la qualité de l'air. . . . .	53

# Chapitre 1

## Introduction générale

### 1.1 Contexte

Cette thèse a pour origine un stage de recherche effectué pendant le projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de POUPRY Sylvain. Un partenariat avec l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT) et la Communautés de Communes Pyrénées Vallées des Gaves (CCPVG) a été créé pour étudier la qualité de l'air sur son territoire.

La CCPVG est au coeur de la vallée des Gaves. C'est un territoire situé au sud-ouest de la France, dans la région Occitanie et au sud du département Hautes-Pyrénées. Frontalière de l'Espagne, la CCPVG est un territoire intercommunal d'environ 1000 km<sup>2</sup> et couvert de forêts et de milieux semi-naturels ainsi que de hautes montagnes. La CCPVG a été créé le 1er janvier 2017. Elle est composé de :

- 46 communes;
- 15 556 habitants (7% de la population du département des Hautes-Pyrénées);
- 91% du territoire couvert par des forêts et milieux semi-naturels (61% dans le 65) soit 19 500 ha;
- 20 548 logements dont 61% sont des résidences secondaires;
- Près de 3 800 emplois tertiaires (38% des emplois);
- Près de 360 exploitations agricoles principalement dédiées à l'élevage : ovins, caprins et équins (60%), bovins (30%);
- Environ 80 industries principalement dans le secteur alimentaire (42% des établissements).

Elle est principalement composée de villes rurales et de deux villes centre (représentant plus de 50% de l'agglomération multi communale) : Pierrefitte-Nestalas et Argelès-Gazost. Ce territoire abrite une grande partie du cœur du Parc national des Pyrénées. Dépourvu d'habitants permanents, ce parc national fait l'objet d'une réglementation spécifique afin de préserver la biodiversité et le caractère exceptionnel des patrimoines naturel, culturel et paysager du Parc national. Il est traversé par la chaîne des Pyrénées et possède notamment plusieurs pics de hautes altitudes tels que le Vignemale (3298m) où le Cabaliros (2334m) illustrés par la Figure1.1.

Ce territoire possède une économie basée sur le tourisme (il passe de 16 000 habitants à 28 500 en hautes saisons), l'agriculture, l'industrie et le transport. Il est régulièrement

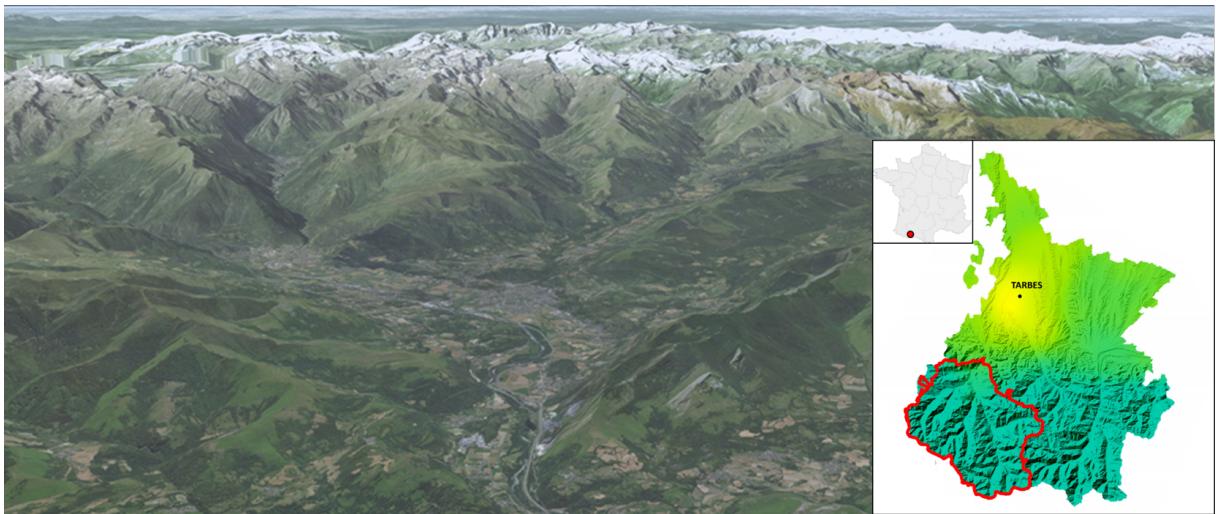


Figure 1.1: Situation géographique et relief de la CCPVG ([geoportail.fr](http://geoportail.fr)).

confronté à des pics de pollutions en raison de sa climat-topologie particulière qui est favorable à l'augmentation des concentrations des polluants. Avec moins de 20 000 habitants, la CCPVG ne se voit pas imposer l'obligation de réalisation d'un PCAET par la Loi TECV. Cependant, les élus communautaires ont formulé le souhait de voir leur projet de territoire conduit au regard des questions liées à la transition énergétique. C'est pourquoi ils ont décidé de prescrire l'élaboration d'un PCAET sur leur territoire par délibération en date du 27 septembre 2017. Pour connaître le profil de pollution de la CCPVG, un inventaire des émissions de pollution est édité chaque année par une Association Agrée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Atmo Occitanie est l'AASQA chargée de surveiller ce territoire. Elle fournit trois outils (Cf. Le réseau de surveillance d'ATMO OCCITANIE):

- l'inventaire des émissions de polluants est un résumé global des émissions de polluants sur une année au niveau départemental. Il est publié après l'année révolue;
- la modélisation de la pollution est établi à partir d'extrapolations de mesures depuis les stations de mesure. Il permet de cartographier la pollution;
- la mesure temps réelle de la pollution depuis ses stations de mesure.

En résumé, le territoire se caractérise par une topologie montagneuse et une activité touristique qui est à l'origine de phénomènes particuliers concernant la pollution atmosphérique. Ainsi, régulièrement les citoyens observent des concentrations accrues de polluants qui peuvent persister pendant plusieurs jours. Ces accumulations ne sont pas seulement le résultat de facteurs locaux, mais peuvent également être influencées par des conditions météorologiques et des courants d'air spécifiques associés aux terrains montagneux.

La CCPVG est particulièrement préoccupée par ce que l'on appelle la "pollution de fond". Contrairement aux épisodes de pollution aiguë qui peuvent être intenses mais de courte durée, la pollution de fond est persistante et s'accumule sur de longues périodes. Elle peut être moins visible et moins perceptible immédiatement, mais ses effets sur la santé sont plus insidieux. En effet, une exposition prolongée à ce type de pollution

peut entraîner des problèmes de santé chroniques, augmentant ainsi le risque de maladies respiratoires et cardio-vasculaires parmi les citoyens.

En outre, la CCPVG aspire à mieux comprendre les phénomènes de pollution qui se manifestent sur son territoire. Elle cherche à déterminer la fréquence, l'intensité et la nature de ces épisodes de pollution afin de poser un diagnostic clair sur la qualité de l'air. En ayant une vision précise des tendances et des schémas de pollution, la CCPVG pourra mieux anticiper et répondre aux défis posés. L'objectif ultime est d'élaborer des stratégies efficaces pour protéger la santé de ses habitants, en tenant compte à la fois des effets immédiats de la pollution et de ses conséquences à long terme, notamment pour les populations les plus vulnérables comme les enfants, les personnes âgées.

## 1.2 Motivation

Avec sa topographie unique marquée par un relief montagneux et les diverses activités humaines qui s'y déroulent, le territoire est régulièrement confronté, en particulier chaque hiver, à des épisodes de pics de pollutions aux particules fines. Ces pics ne sont pas le résultat d'une seule cause, mais d'une combinaison complexe de facteurs. Il existe plusieurs raisons principales à ces pics de pollution, notamment :

1. Les conditions météorologiques :
  - Dans les situations stables où il y a peu ou pas de vent (accumulation de polluants) ;
  - Lorsque l'air froid plaque les polluants à proximité du sol en période hivernale (pics particules et oxydes d'azote) ;
  - Lorsqu'il fait chaud et ensoleillé en période estivale (conditions propices à la formation d'ozone et de particules fines secondaires) ;
2. L'apport massif d'une pollution sous l'effet du vent ;
3. L'augmentation saisonnière des émissions de polluants en lien avec certaines activités telles que le chauffage domestique ou les feux pastoraux.

Ces pics sont bien connus de la population et sont visibles. Cependant, sur toute la période de l'année la population est soumise à la pollution dite de fond qui a un impact très important sur la santé. Il est donc important de mesurer la qualité de l'air tout au long de l'année et notamment de suivre son évolution. La qualité de l'air résulte d'un équilibre complexe entre les apports directs de polluants émis dans l'air, les émissions polluantes, et les phénomènes auxquels ces polluants vont être soumis une fois dans l'atmosphère (transport, dispersion, dépôt ou réactions chimiques). Pour comprendre le résultat de la qualité de l'air, il est important de faire état des émissions même si elle n'est pas directement liée, la qualité de l'air est définie par la mesure des concentrations ponctuelles de polluant et les émissions qui sont des moyennes sur l'année entière.

### 1.2.1 L'inventaire des émissions

L'inventaire régional des émissions, élaboré et publié chaque année par Atmo-Occitanie, joue un rôle crucial dans la compréhension de la dynamique de la pollution atmosphérique

au sein de la région. Non seulement cet inventaire offre une vue d'ensemble des activités génératrices d'émissions, mais il permet également d'évaluer la part contributive de chacune de ces activités, offrant ainsi des perspectives précieuses pour les interventions et les politiques futures. Selon l'étude publiée en 2019, voici les principaux éléments clés:

- Le secteur du transport est majoritaire dans les émissions d'oxydes d'azote représentant à lui seul 60% des émissions. La principale source de cette pollution provient des véhicules diesels, qui sont connus pour être d'importants émetteurs de ce type de polluant;
- Le secteur résidentiel est très émetteur de particules fines. Plus précisément, il contribue à 39% des émissions de PM10 et à 52% des émissions de PM2.5. La majeure partie de ces émissions provient des chauffages au bois non performants, pouvant libérer une quantité importante de particules dans l'air en raison d'une combustion incomplète;
- Le secteur agricole possède le monopole des émissions de NH<sub>3</sub> de l'ordre de 99%. Cette situation est probablement due aux rejets organiques de l'élevage, qui libèrent de l'ammoniac dans l'atmosphère;
- Les secteurs industriel et du transport jouent un rôle non négligeable dans les émissions de gaz à effet de serre, avec des contributions respectives de 21% et 22%.

Les données présentées par l'inventaire d'Atmo-Occitanie en 2019 mettent en évidence le poids considérable de certains secteurs dans les émissions polluantes du territoire. Cet inventaire ne se contente pas de fournir des chiffres ; il dresse un tableau précis des origines des polluants, offrant ainsi un diagnostic initial clair des principales sources d'émissions liées aux activités humaines. Les sous-sections suivantes approfondissent ces origines, en se penchant en détail sur chaque type de polluant. Il est essentiel d'avoir une compréhension approfondie de ces polluants : connaître leur nature permet d'adapter et d'optimiser les systèmes de surveillance, assurant ainsi une détection et une réponse plus efficaces face aux variations de la qualité de l'air sur le territoire.

### 1.2.2 Sources de pollution du secteur résidentiel

Le secteur résidentiel est le premier secteur émetteur de COVNM (75%) et des GES (30%). La pratique du chauffage au bois émet la quasi-totalité des PM10 et PM2.5 pour ce secteur. Dans la globalité des émissions, il est responsable de 56% des particules fines (PM2.5) sur le territoire.

#### Le chauffage au bois

C'est une des énergies les moins chères au kWh. Il contribue également aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre: le bilan est quasiment neutre dans le cas du bois énergie car il provient des forêts locales. Lors d'utilisation d'appareils de chauffage au bois, si la combustion est complète elle va émettre du CO<sub>2</sub>, de l'eau mais aussi des PM et du NO<sub>X</sub>. Lors d'une combustion incomplète, en plus de ces molécules, d'autres polluants seront émis dans l'air (intérieur et extérieur): monoxyde de carbone, COV, HAP16, dioxines, furanes, des suies, des goudrons, etc. Le chauffage au bois réalisé dans de mauvaises conditions va donc émettre divers polluants. Plusieurs facteurs sont

à l'origine de ces émissions : les appareils peu ou pas performants (foyers fermés avant 2007 et foyers ouverts), sur ou sous dimensionnés, la combustion de bois humide ou de récupération, une combustion lente, un entretien peu régulier voire inexistant, etc. Afin de réduire ces émissions de polluants, il est possible d'agir sur trois principaux axes en simultané: les appareils de chauffage, le combustible et les habitudes de chauffage.

### **Le brûlage de déchets végétaux**

Le brûlage de déchets verts (brûlage des déchets d'entretien des jardins des particuliers) a des conséquences sur la santé en plus de créer des troubles du voisinage. A savoir, 50 kg de déchets verts brûlés émettent 920 fois plus de PM10 qu'un trajet de 20 Km jusqu'à une déchetterie (pour un véhicule diesel ancien). Cette combustion très peu performante est source multiple de polluants (les déchets verts étant souvent très humides). Ils s'additionnent à la pollution de fond. Malgré la réglementation qui interdit ce type de brûlage, il arrive souvent de voir des feux de déchets végétaux domestiques.

### **1.2.3 Sources de pollution des activités agricoles**

Le secteur agricole est contributeur à 99% aux émissions d'ammoniac ( $NH_3$ ), il contribue aussi à hauteur de 16% des oxydes d'azotes ( $NO_x$ ) et de 20% des GES. Les pratiques ancestrales d'entretiens de la montagne et des pâturages sont propres au territoire et suscitent des débats entre les citoyens et les agriculteurs.

#### **Les feux pastoraux**

Également dénommés écoubages ou brûlage dirigé, les feux pastoraux sont utilisés par l'homme depuis plusieurs millénaires à des fins essentiellement agricoles et pastorales. Ils consistent à contrôler par incinération des espèces végétales non consommées par le bétail qui envahissent progressivement les pâturages, diminuant les ressources à disposition des troupeaux et banalisant le paysage. Le feu pastoral vise ainsi à :

- Contrôler les refus (strate herbacée sèche ou morte) et la strate arbustive envahissante;
- Renouveler et diversifier les ressources pastorales dans le temps et dans l'espace;
- Favoriser l'accessibilité à la ressource pastorale, son appétence et sa précocité.

La mécanisation, très difficile voire impossible en milieu montagnard, a permis la persistance de cette technique. Le feu est utilisé pour produire de l'herbe sur de grandes surfaces avec le moins de travail possible. Les éleveurs et les bergers utilisent ces espaces pour le parcage de leur bétail. Les écoubages doivent être réalisés par temps clairs sans vent pour des raisons de sécurité évidentes. Or, ces conditions sont favorables aux inversions thermiques et donc à la stagnation des polluants. Beaucoup d'habitants des vallées s'en plaignent mais pour l'instant peu d'alternatives sont viables (des engins mécanisés existent mais à des coûts importants). Les feux pastoraux sont profondément ancrés dans la culture et les traditions pyrénéennes. La problématique de l'écoubage est complexe et nécessite du temps et de la concertation. Des réflexions sont engagées notamment par les services de l'État sur le département des Hautes-Pyrénées. Ils restent une source majeure d'émission de polluants dans les périodes où ceux-ci ne peuvent être dispersés correctement.

## Les élevages et cultures

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) émis sur le territoire est quasi-exclusivement émis par le secteur agricole. Les deux sources d'émissions d'ammoniac sur le territoire du Parc sont :

- Les cheptels, par les composés azotés issus des déjections, à hauteur de 35%;
- Les cultures et les prairies, par fertilisation des sols, à hauteur de 65%.

Ces émissions dépendent beaucoup des ventes de produits régionaux qui permettent d'améliorer les estimations.

## L'utilisation des tracteurs et fonctionnement des bâtiments

Le fioul ou le diesel sont la principale source d'énergie pour chauffer les serres et faire fonctionner les exploitations agricoles. Le secteur agricole diminue son impact grâce à l'utilisation de Gazole Non Routier pour les engins agricoles.

### 1.2.4 Sources de pollution du secteur transport

La topologie du territoire ne permet pas d'avoir actuellement d'autres transport que routier. Les vallées sont encaissées et bien souvent il n'y a qu'une seule route. Le secteur transport contribue à 59% des émissions d'oxyde d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Les émissions du transport routiers sont liées à la combustion du carburant, aux émissions de particules dues aux freinages, usures des pneus et de l'usure de la route. Il n'existe pour le moment d'alternatives utilisables comme dans les grandes villes (tramway électrique ou métro). Les transports en communs tels que les bus sont présents. Les émissions sont évaluées à partir du Trafic Moyen journalier Annuels (TMJA). En raison de sa topographie et de ses lieux de loisirs (stations de ski), les flux les plus importants sont concentré sur les axes reliant les villes les plus peuplées voir Figure1.2.

### 1.2.5 Sources de pollution du secteur industrie

Les émissions du secteur industriel proviennent de différentes sources, telles que les industries manufacturières, les industries chimiques, les carrières. La principale source de données utilisée dans l'inventaire régional est la base de données BDREP (registre déclaratif). Leurs émissions sont calculées en fonction de l'activité déclarée. Deux industries soumises à déclaration sont prises en compte sur ce territoire dans le calcul des émissions du secteur industriel. Le secteur industriel représente également 21% des émissions de COVNM et 20% des émissions de GES sur le territoire en 2017. Les émissions importantes de COVNM proviennent de l'utilisation de solvants dans l'industrie, notamment l'imprimerie, l'application de peinture ou encore la protection du bois. Le secteur industriel contribue de manière significative aux émissions de particules PM10 (42%) et PM2.5 (36%) sur le territoire de la CCPVG. Les émissions de PM10 et PM2.5 proviennent principalement des carrières présentes sur le territoire. Les activités d'extraction, de broyage et de transport de la roche, notamment, sont particulièrement émettrices de poussières. Ainsi sur le territoire de la CCPVG, les carrières émettent 78% des émissions totales de PM10 liées à l'industrie et environ 33% des émissions totales de PM10 du territoire, en 2017.

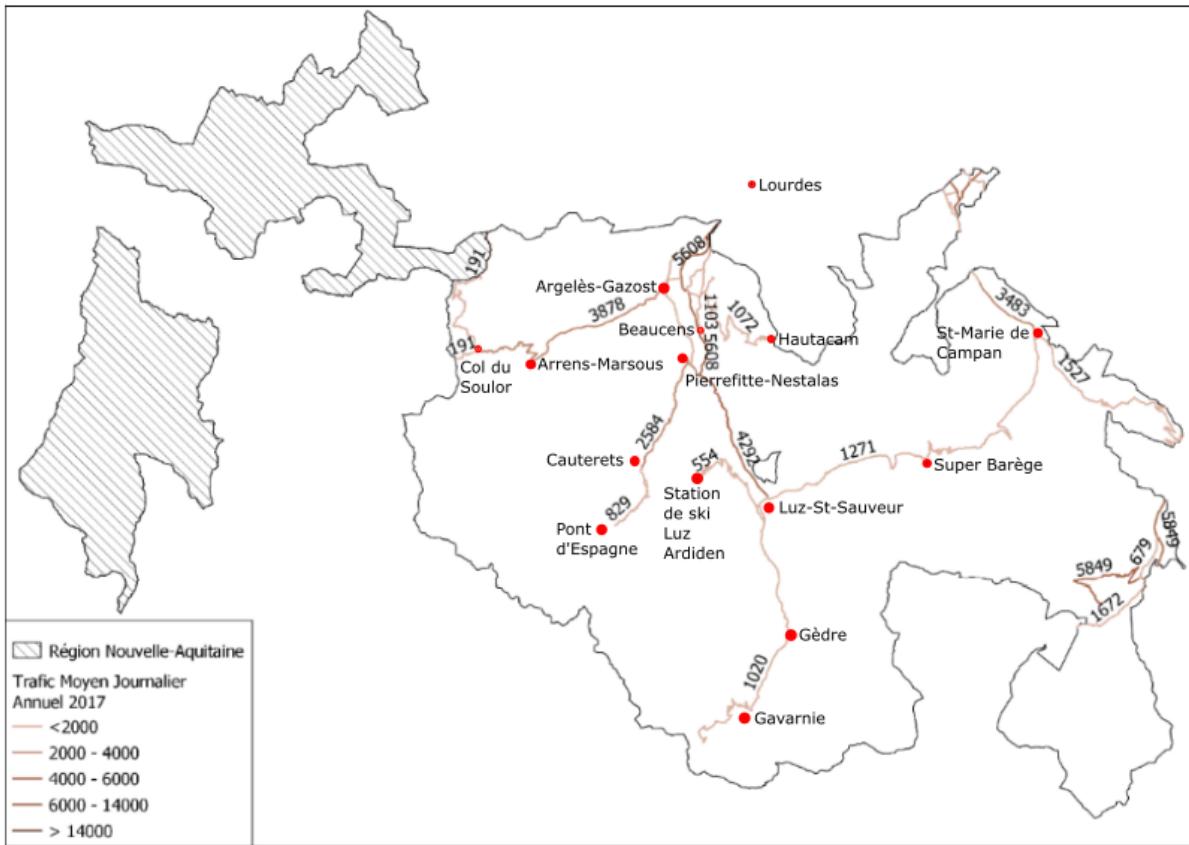


Figure 1.2: TMJA des routes de la CCPVG (ccpvg.fr).

### 1.2.6 Les attentes de la CCPVG

La CCPVG dispose de trois outils pour évaluer la qualité de l'air sur son territoire : l'inventaire des émissions de polluants, la modélisation et la mesure temps réelle. Toutefois, chacun de ces outils présente des limites.

L'inventaire des émissions de polluants, établi à l'échelle du département, ne permet pas d'avoir une vision actualisée de la situation de la CCPVG. De plus, les statistiques ne sont pas spécifiques à la zone géographique de la CCPVG. Bien que l'inventaire régional des polluants d'Atmo-Occitanie soit utile pour définir le profil des sources de pollution des activités, il ne fournit pas d'informations précises sur la qualité de l'air. En effet, la qualité de l'air est basée sur la concentration des polluants en temps réel et non sur une moyenne lissée au long de l'année. De plus, cet inventaire est un résumé global issu des extrapolations des stations de mesures de Tarbes et Lourdes, situées hors du territoire de la CCPVG voir Figure 1.3. Sa publication est tardive en raison d'un temps d'analyse non négligeable de l'ordre de six à huit mois.

La modélisation, quant à elle, ne permet pas de prédire l'état de la qualité de l'air pour permettre aux acteurs locaux de réagir. Elle est établie à partir d'extrapolations de mesures sur un nombre réduit de capteurs, avec seulement deux stations de mesures dans le département et pas une seule dans la zone géographique de la CCPVG. De plus, le territoire est en relief, ce qui soulève des questions sur la prise en compte réelle du relief par le modèle de pollution, étant donné la complexité des phénomènes météorologiques.

Le troisième outil dont dispose la CCPVG pour évaluer la qualité de l'air est la mesure en temps réel. Cependant, la Figure 1.3 illustre parfaitement la situation géographique

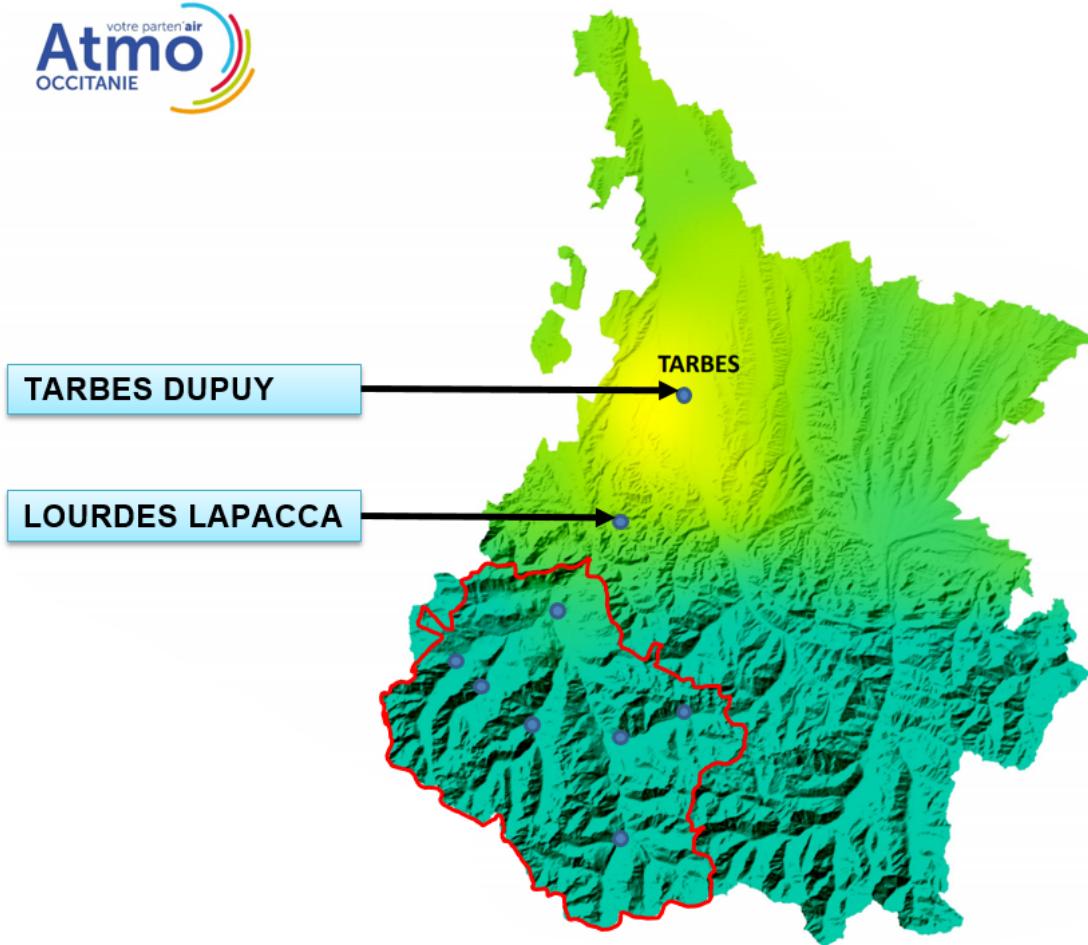


Figure 1.3: Situation géographique de la CCPVG par rapport aux stations de mesures conventionnelles.

: le territoire couvre près de 1000 km<sup>2</sup> et il n'y a pas une seule station de mesure. Cela pose un problème pour la mesure en temps réel de la qualité de l'air.

Face à ces limites, la CCPVG a décidé de mettre en œuvre une démarche scientifique pour la surveillance de la qualité de l'air sur son territoire, avec le projet BOLDAIR. Elle a besoin de faire un premier diagnostic pour mieux se rendre compte des spécificités des activités en fonction des saisons, en vue de prévoir les pics de pollutions et de protéger les personnes les plus vulnérables. Le suivi de l'évolution de la qualité de l'air tout au long de l'année permettra de prendre des mesures pour réduire les émissions, notamment en sensibilisant, en régulant l'écobuage, en aménageant les transports et en éduquant les citoyens. Le projet BOLDAIR sera ainsi un outil d'aide à la décision permettant d'avoir un appui scientifique pour agir efficacement et améliorer la qualité de l'air sur le territoire de la CCPVG

Pour résumer, la CCPVG a besoin :

- Avoir un état initial de la situation
- Monitorer les concentrations des polluants
- Anticiper les pics de pollution
- Avoir un outil d'aide à la décision

En tenant compte des attentes de la CCPVG, il est nécessaire d'avoir une approche holistique pour aborder les enjeux de la pollution atmosphérique. C'est dans cette perspective que le projet BOLDAIR a été conçu, définissant des objectifs clairs pour l'ENIT, s'efforçant de répondre aux défis posés par les enjeux environnementaux et économiques du territoire.

## 1.3 Problématiques

La réalisation d'un projet de cette envergure nécessite de prendre en compte plusieurs défis spécifiques associés à la surveillance de la qualité de l'air sur le territoire de la CCPVG:

- La contrainte financière est à prendre en compte, principalement due à la taille modeste des communes, limitant ainsi le budget alloué;
- La gestion et le contrôle des données au niveau local sont essentiels pour garantir la précision et la pertinence des informations recueillies;
- Le territoire à couvrir est vaste, s'étendant sur plusieurs milliers de kilomètres carrés, ce qui pose des défis logistiques;
- La topologie du territoire, avec ses caractéristiques uniques, peut influencer la dispersion des polluants et donc les méthodes de surveillance;
- Il est impératif d'assurer une mesure continue de la qualité de l'air, ce qui signifie une surveillance sans interruption tout au long de l'année;
- Enfin, l'absence de personnel qualifié pour la maintenance du réseau de mesure est une préoccupation majeure, car cela pourrait compromettre la fiabilité des données.

De façon générale, des territoires similaires à la CCPVG observent des pollutions qui échappent souvent à la détection. Les trois outils principaux fournis par les AASQA (surveillance en temps réel, modélisation et inventaire des émissions) ne sont pas toujours adaptés à ce type de territoire. Les stations conventionnelles, souvent coûteuses, se trouvent majoritairement dans les grandes agglomérations, laissant ainsi des zones moins denses non couvertes. De plus, lorsqu'il s'agit de modélisation, les territoires avec une topologie particulière, comme celui de la CCPVG, posent des défis spécifiques, rendant la mise en place de modèles réalistes difficile. En outre, puisque les données sont principalement détenues par les AASQA, les collectivités locales se retrouvent dépendantes de leur politique de gestion des données. Face à ces enjeux, il devient impératif de définir des objectifs de recherche clairs pour développer des solutions sur mesure et répondre aux besoins spécifiques du territoire.

## 1.4 Questions de recherche

La surveillance et la prédiction améliorées de la qualité de l'air sur un vaste territoire, tout en restant dans les limites des contraintes budgétaires et du personnel, constituent un défi majeur. L'adoption de technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), les micro-capteurs (LCS) et l'industrie 4.0 dans une architecture de réseau de micro-capteurs vise à répondre à ce défi. L'objectif est de compléter et d'amplifier le travail des AASQA

en multipliant les points de mesure pour affiner la cartographie des pollutions locales et suivre en temps réel les mouvements des polluants tout au long de l'année. Cette thèse vise à lever plusieurs verrous scientifiques majeurs :

#### **1.4.1 Acquisition de mesures fiables de la qualité de l'air**

L'exploitation d'un réseau de LCS ouvre un champ d'interrogations quant à la surveillance de la qualité de l'air en tenant compte des particularités locales et sur l'ensemble du processus d'acquisition. En effet, ces systèmes présentent des caractéristiques telles que des défaillances aléatoires et brutales, ainsi qu'une faible précision qui nécessitent une attention soutenue. Comment garantir l'obtention de données fiables sur une longue période malgré ces contraintes ? La surveillance de la santé du système de mesure, la prédiction des défaillances et la maintenance deviennent des préoccupations essentielles. La fiabilité est définie dans cette thèse comme l'obtention de résultats précis et cohérents sur une longue période de temps, malgré les perturbations ou les dysfonctionnements éventuels.

#### **1.4.2 Détection des défaillances et prédiction de l'état de santé des stations de mesure**

Les défaillances potentielles des LCS soulèvent des préoccupations quant à la fiabilité de la surveillance. Comment assurer une détection précoce des dysfonctionnements et anticiper l'état de santé des composants pour garantir une surveillance continue ? Les stations de mesure doivent fournir, outre les mesures, des indicateurs fiables sur leur état de santé, permettant des interventions rapides et assurant aux autorités une base solide pour leurs décisions.

#### **1.4.3 La couverture en tout point du territoire à partir de mesures de stations**

La surveillance de la qualité de l'air sur un territoire étendu nécessite une répartition stratégique des stations de mesure pour garantir une couverture spatiale optimale. Toutefois, les contraintes budgétaires et logistiques peuvent limiter le nombre de ces stations. La question clé est donc la suivante : comment, à partir d'un nombre limité de mesures ponctuelles, peut-on extrapoler et estimer la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire, et ce pour l'ensemble des polluants ? Les méthodes d'interpolation spatiale, telle que l'interpolation linéaire ou le kriging, offrent des pistes prometteuses, mais nécessitent une adaptation précise aux spécificités du territoire et des données disponibles.

#### **1.4.4 La validation des acquisitions et la modélisation de la pollution de l'air**

L'exploitation efficace des données météorologiques et de pollution est cruciale pour établir un modèle prédictif crédible de la qualité de l'air. Face aux ressources limitées, comment peut-on optimiser l'intégration de ces données pour prévoir avec précision les variations futures de la qualité de l'air ? La modélisation, dans des contextes de territoires avec des ressources limitées, soulève des enjeux majeurs liés à la couverture spatiale et temporelle des prédictions.

Face à ces interrogations complexes et interdépendantes, il est essentiel de structurer une approche méthodologique rigoureuse. Pour adresser de manière concrète et systématique ces questions de recherche, cette thèse définit des objectifs précis, qui guideront chaque étape de l'étude et orienteront les méthodologies employées.

## 1.5 Objectifs de recherche

Cette thèse vise à mettre en place une démarche rigoureuse qui permettra d'apporter des éléments de connaissances scientifiques, tangibles et quantifiés aux citoyens et aux acteurs du territoire en charge de la surveillance et de la gestion de la qualité de l'air. Sur base de ces éléments, ces derniers pourront mieux appréhender le problème de pollution, estimer, prédire et évaluer sa gravité, et définir des plans d'action préventifs (sensibilisation des habitants, incitation à l'utilisation de chauffage moins émetteur de polluants, incitation des éleveurs à moins recourir aux écoubages, etc.), mais aussi et surtout proactifs (régulation du trafic routier et de la pollution industrielle par anticipation de la dégradation future de la qualité de l'air). Les objectifs définis ici visent à faciliter la prise de décision pour les acteurs locaux, tout en sensibilisant et impliquant la communauté dans son ensemble. Les objectifs spécifiques sont:

1. Surveillance en temps réel: Déployer une instrumentation adaptée sur le territoire pour obtenir une cartographie précise et en temps réel de la qualité de l'air. Cela implique le développement ou l'adaptation de technologies de surveillance, en tenant compte des spécificités locales;
2. Prédiction et proactivité: Élaborer des modèles prédictifs fiables pour anticiper les variations de la qualité de l'air. Ces modèles permettront d'initier des actions proactives, telles que la régulation du trafic ou la limitation de certaines activités polluantes lors des pics de pollution prévus;
3. Engagement sociétal: Impliquer activement les acteurs locaux (élus, habitants, industries, etc.) dans le processus de surveillance et de gestion. Cela comprend la sensibilisation aux enjeux, la formation à l'utilisation des outils de surveillance et la promotion de pratiques respectueuses de l'environnement.

En conclusion, cette thèse vise à doter les communes des outils et des connaissances nécessaires pour réagir de manière éclairée aux défis posés par la pollution de l'air, tout en intégrant la dimension locale (é(écoubages, agriculture, mauvaises pratiques, dégradations des végétaux).

## 1.6 Contribution par rapport à l'état de l'art

Les approches conventionnelles pour surveiller la qualité de l'air ont souvent reposé sur des stations de mesure fixes, coûteuses et nécessitant une expertise pour leur utilisation et leur maintenance. Bien que ces stations fournissent des données précises, elles peuvent ne pas couvrir suffisamment un vaste territoire, en particulier dans des territoires éloignées et montagneux. De plus, avec des ressources limitées, l'implantation de telles stations est difficile voire impossible.

L'utilisation d'un réseau de capteurs sur un large territoire, comme les capteurs à faible coût (LCS), offre une solution potentielle à ce problème. Cependant, cela vient avec ses propres défis :

- Couverture d'un vaste territoire avec un budget modeste.
- Assurance de la cohérence et de la continuité des données.
- Absence de stations conventionnelles pour référence.
- Manque de personnel spécialisé et pas de gestion des mesures.
- Surveillance et prédition de la qualité de l'air avec des LCS.

L'approche proposée vise à répondre à ces défis en utilisant une combinaison de technologies modernes et d'analyses avancées. Les réseaux de LCS sont une opportunité pour surveiller la qualité de l'air, car ils sont moins coûteux et plus faciles à déployer et nécessitent peu de personnel qualifié. En effet, leur force réside dans leur dimension spatiale, qui permet de détecter la pollution locale. Une architecture est proposée afin d'augmenter le territoire en ajoutant des capacités de calcul, de communication et d'analyse. Cela implique l'installation d'un réseau de mesure des concentrations de pollution pour surveiller l'environnement. Cependant, les études publiées sont insuffisantes en ce qui concerne la durée expérimentale du déploiement des LCS surtout lorsque le sujet de l'étude doit être suivi en continu sur plusieurs années.

Une nouvelle approche consiste à utiliser la redondance modulaire au niveau du point de mesure. Le fait regrouper et de comparer les mesures des LCS entre eux augmentent la fiabilité des données et permet de détecter leurs défaillances éventuelles. Cette approche permet également d'extraire des indicateurs pour prédire l'état de santé du point de mesure et par extension de l'architecture complète. En plus de surveiller le territoire, cette architecture peut s'auto-diagnostiquer et s'auto-configurer (via l'équipe de maintenance) grâce à l'intégration de fonctionnalités de Prognostics and Health Management (PHM). Cette intégration permettra une plus grande confiance dans l'adaptabilité du système de prédition basé sur des composants en réseau (capteurs, traitement et actionneurs). En résumé, cette approche permet de surmonter les inconvénients des déploiements standards avec les LCS et offre une solution plus fiable pour surveiller l'environnement.

Comparé à d'autres travaux dans ce domaine, cette approche se distingue par son utilisation innovante de la redondance des LCS, son intégration du Prognostics and Health Management (PHM), et sa combinaison de surveillance et de prédition.

Les implications sociétales de cette recherche sont vastes. En fournissant des outils plus accessibles et plus fiables pour la surveillance de la qualité de l'air, cette démarche peut aider les régions à prendre des décisions éclairées pour protéger la santé de leurs habitants, même avec des ressources limitées.

Il existe cependant des limitations. La fiabilité à long terme des LCS, même avec redondance, reste à déterminer. De plus, la prédition dépend fortement de la qualité et de la quantité des données d'entrée. Des travaux futurs pourraient chercher à renforcer la robustesse des LCS et à intégrer davantage de sources de données pour la prédition.

En conclusion, cette recherche contribue à combler un vide important dans la surveillance de la qualité de l'air en proposant une solution innovante et rentable pour les territoires avec des ressources limitées.

## 1.7 Structure de la thèse

Les développements et la réponse aux questions de recherche cités précédemment sont développés et justifiés dans ce manuscrit à travers quatre chapitres.

Le chapitre 2 traitera des différents état de l'art utilisés pour mener les recherches, a savoir celui de la pollution atmosphérique, des LCS, des techniques de fiabilisation des données et des algorithmes de prédictions statistiques des données. Dans le chapitre 3, sera présenté l'architecture générale, les définitions et les hypothèses de travail puis ensuite Le chapitre 4 est consacré aux développement mathématiques, aux algorithmes de prédictions des données Les applications sur le territoire de la CCPVG sont présenté dans le Chapitre 5 et la présentations des résultats sur des données réelle issue du déploiement de l'architecture Pour terminer, dans la conclusion générale, l'ensemble des développements seront comparés aux objectifs initiaux de la thèse puis un résumé des travaux ainsi que les perspectives de recherche concluront ce manuscrits.

# Chapitre 2

## État de l'art

### 2.1 La pollution atmosphérique

La croissance de la population et de l'activité humaine a entraîné une augmentation des émissions de polluants depuis la révolution industrielle. Cette pollution atmosphérique est responsable de perturbations climatiques ainsi que d'une baisse de la qualité de l'air. La composition de l'atmosphère est majoritairement composée d'azote (78,1 %), de dioxygène (21 %), de vapeur d'eau (entre 1 % et 4 %), ainsi que d'autres gaz inertes tels que l'argon, l'hélium et le néon qui ne contribuent pas à la pollution atmosphérique comme le montre la Figure 2.1. Les autres gaz se trouvent en concentrations infimes mesurées en ppm. Cependant, l'augmentation de la concentration de certains gaz mineurs peut influencer de manière significative l'équilibre de l'atmosphère [1].

Les polluants sont des gaz et des composés chimiques ayant un effet néfaste sur l'environnement et la santé des êtres vivants, provenant soit de sources naturelles, soit de l'activité humaine. La dispersion des polluants dans l'air dépend de leur durée de vie et de leur réactivité, certains étant dégradés tandis que d'autres réagissent et deviennent des polluants secondaires. Bien que les polluants se trouvent principalement dans la troposphère, les plus stables peuvent migrer dans la couche supérieure de l'atmosphère. Les phénomènes météorologiques peuvent provoquer un brassage des concentrations de polluants, rendant la pollution locale un problème global. Enfin, certains polluants sont plus surveillés en raison de leur origine anthropique, qui peut être contrôlée, ainsi que de leurs impacts sanitaires à court et long terme.

#### 2.1.1 Origine des polluants

Les polluants gazeux, tels que le dioxyde de soufre  $SO_2$  et les oxydes d'azote  $NO_2, NO$ , sont classés selon leur espèce chimique. Bien que le dioxyde de carbone  $CO_2$  n'ait pas d'effet direct sur la santé des êtres vivants, il est considéré comme un polluant en raison de sa contribution à l'effet de serre et au changement climatique, qui affectent indirectement les êtres vivants. Les particules en suspension, classées selon leur taille et appelées matière particulaire (PM), constituent le deuxième type de polluant. Les émissions de polluants sont considérées comme des sources, tandis que leur captation est appelée un puits (par exemple, les forêts sont des puits de  $CO_2$ ). Les polluants primaires sont émis directement depuis la source, tandis que les polluants secondaires sont créés par des réactions chimiques dans l'atmosphère. La pollution peut avoir une origine naturelle ou anthropique, c'est-à-dire créée par les activités humaines.

Constituant	Formule chimique	Masse moléculaire (12C = 12)	Pourcentage en volume par rapport à l'air sec ( $10^{-2}$ v/v)	Masse totale dans l'atmosphère (g)	Temps de résidence moyen dans l'atmosphère
<b>Atmosphère totale</b>				$5,136 \cdot 10^{21}$	
<b>Air sec</b>		28,9644	100,0	$5,119 \cdot 10^{21}$	
<b>Vapeur d'eau</b>	H <sub>2</sub> O	18,0153	Variable	$0,017 \cdot 10^{21}$	6 à 15 jours
<b>Diazote</b>	N <sub>2</sub>	28,0340	78,084	$3,866 \cdot 10^{21}$	$15 \cdot 10^6$ ans
<b>Dioxygène</b>	O <sub>2</sub>	31,9988	20,948	$1,185 \cdot 10^{21}$	$8 \cdot 10^3$ ans
<b>Argon</b>	Ar	39,9480	0,934	$6,59 \cdot 10^{19}$	infini
<b>Dioxyde de carbone</b>	CO <sub>2</sub>	44,0099	0,0370	$2,72 \cdot 10^{18}$	15 ans
<b>Néon</b>	Ne	20,1830	$1,818 \cdot 10^{-3}$	$6,48 \cdot 10^{16}$	infini
<b>Hélium</b>	He	4,0026	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{185}$	infini
<b>Méthane</b>	CH <sub>4</sub>	16,0430	$\approx 1,7 \cdot 10^{-4}$	$\approx 4,3 \cdot 10^{15}$	9 ans
<b>Hydrogène</b>	H <sub>2</sub>	2,0159	$\approx 5,0 \cdot 10^{-5}$	$\approx 1,8 \cdot 10^{14}$	10 ans
<b>Protoxyde d'azote</b>	N <sub>2</sub> O	44,0128	$\approx 3,1 \cdot 10^{-5}$	$\approx 2,3 \cdot 10^{15}$	150 ans
<b>Monoxyde de carbone</b>	CO	28,0106	$\approx 1,2 \cdot 10^{-5}$	$\approx 5,9 \cdot 10^{14}$	2 mois
<b>Ozone</b>	O <sub>3</sub>	47,9982	$2 \text{--} 200 \cdot 10^{-6}$	$\approx 3,3 \cdot 10^{15}$	1 à 2 mois
<b>Ammoniac</b>	NH <sub>3</sub>	17,0306	$\approx 0,1 \text{ à } 1 \cdot 10^{-6}$	$\approx 3,0 \cdot 10^{13}$	20 jours
<b>Dioxyde d'azote</b>	NO <sub>2</sub>	46,0055	$\approx 1 \cdot 10^{-7}$	$\approx 8 \cdot 10^{12}$	1 jour
<b>COV (composés organiques volatils)</b>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub>	variable	$\approx 0,1 \text{ à } 1 \cdot 10^{-6}$	$\approx 10^{14}$	heures-jours
<b>Dioxyde de soufre</b>	SO <sub>2</sub>	64,063	$\approx 2 \cdot 10^{-8}$	$\approx 2,3 \cdot 10^{12}$	1 jour
<b>Sulfure d'hydrogène</b>	H <sub>2</sub> S	34,080	$\approx 2 \cdot 10^{-8}$	$\approx 1,2 \cdot 10^{12}$	1 jour

Figure 2.1: Gaz constituant l'atmosphère [1].

## Les sources naturelles

Les sources de pollution naturelle proviennent généralement des phénomènes suivants [2] :

- Les volcans émettent du soufre S, des particules en suspension et du CO<sub>2</sub> ;
- La faune et la flore émettent des composés organiques volatils COV et du CO<sub>2</sub> ;
- Les vents sont à l'origine des particules en suspension (poussières) et des aérosols marins (gaz + particules) ;
- Les éclairs émettent des oxydes d'azote NO et de l'ozone O<sub>3</sub> par combinaison du N<sub>2</sub> et du NO<sub>2</sub> ;
- Le soleil, par rayonnement, crée des polluants photochimiques, dont l'ozone, c'est une pollution géogénique .

## Les sources antropiques

Les sources anthropiques de pollution sont diverses et dépendent des secteurs d'activité. L'industrie et les transports utilisent la combustion d'énergie fossile, qui produit des polluants tels que le CO, le CO<sub>2</sub>, les COV, les NO<sub>x</sub>, les SO<sub>2</sub> et les métaux lourds, ainsi que

des particules fines et ultrafines (PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>1</sub>). D'autres secteurs industriels émettent des COV et des particules en suspension, selon leur secteur d'activité et leur consommation d'énergie. Les incendies, considérés comme des activités humaines, émettent également des COV, du CO, du CO<sub>2</sub> et des particules. L'agriculture est également responsable d'une part importante des émissions, notamment l'épandage et la dispersion en aérosols de pesticides et d'engrais NH<sub>3</sub>, le lisier et les boues d'épuration, responsables des COV et du NH<sub>3</sub>, ainsi que l'élevage, qui contribue au méthane CH<sub>4</sub> et aux gaz à effet de serre. Ces polluants sont transportés par les vents ou les phénomènes dynamiques des masses d'air, et sont finalement absorbés par des puits ou continuent d'augmenter leur concentration dans l'atmosphère.

### 2.1.2 Cycle de vie des émissions

Les polluants primaires proviennent principalement de sources situées à la surface du sol. Leur dispersion s'effectue de manière horizontale et verticale. En fonction de leur avancée verticale, ils subissent une transformation secondaire. Les polluants sont transportés sur une distance qui est limitée par leur durée de vie, appelée temps caractéristique du transport atmosphérique. Le schéma présenté dans la Figure 2.2 illustre le cycle de vie des polluants.

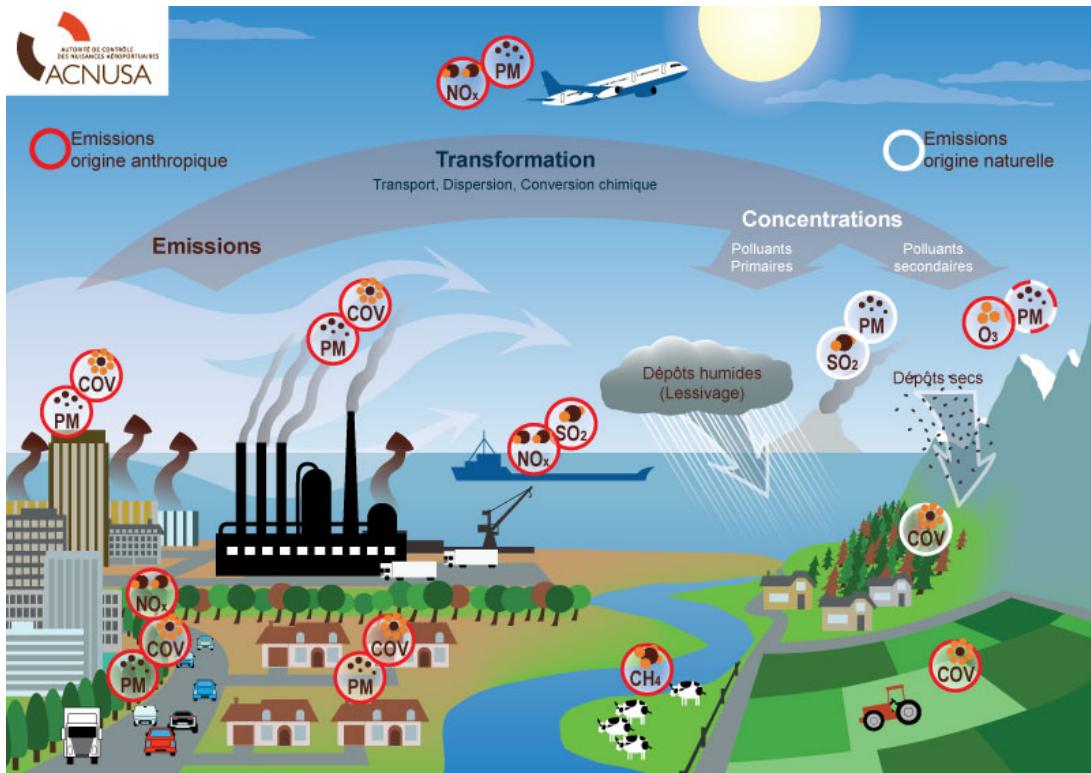


Figure 2.2: Cycle de vie des émissions [3].

Les impacts de la pollution sont évalués à trois échelles géographiques distinctes : locale, régionale et planétaire. Les polluants ayant une durée de vie courte ont un impact local, tandis que les polluants persistants peuvent être transportés sur de longues distances, même à haute altitude, et avoir un impact planétaire en affectant le climat ou la couche d'ozone [4].

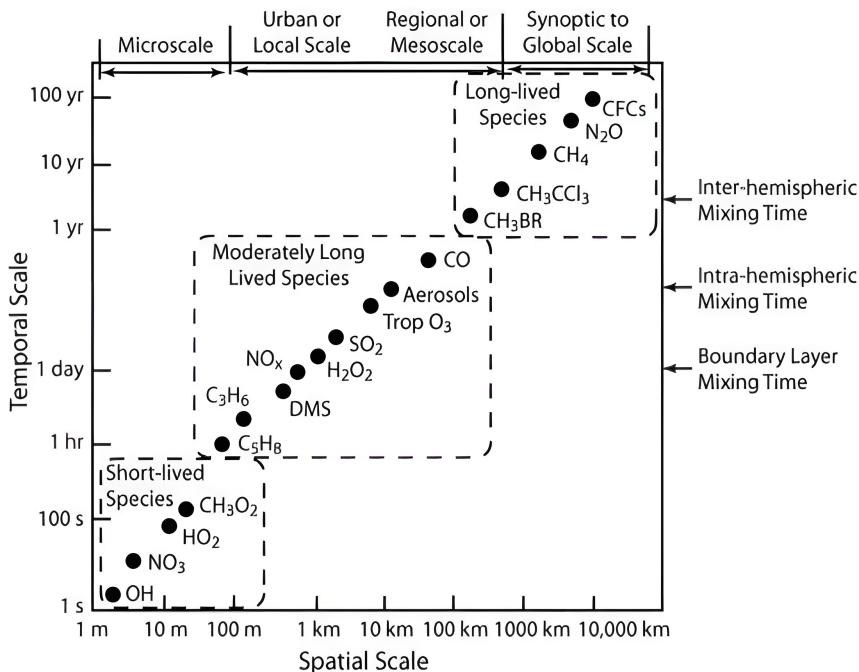


Figure 2.3: Variabilité spatiale et temporelle des constituants clés de l'atmosphère [5].

Pour mesurer la qualité de l'air, les concentrations de fond et les polluants transportés sont additionnés pour la prise en compte de la pollution totale afin de mesurer la qualité de l'air. La durée de vie d'un polluant permet d'estimer son origine potentielle. La figure 2.3 illustre la durée de vie des polluants et leur résidence dans les couches atmosphériques, permettant ainsi de différencier les sources de pollution locales des événements globaux.

### 2.1.3 La dégradation des polluants

Les polluants atmosphériques sont en grande partie par se dégradés par le rayonnement solaire (photochimie), produisant des radicaux tels que  $OH^-$ ,  $H_2O^-$ ,  $NO_3^-$ , et  $O_3$  qui réagissent avec les polluants pour former d'autres composés [6]. Les composés organiques se dégradent successivement jusqu'à se transformer en  $CO_2$ . La durée de vie des particules en suspension dépend de leur forme et de leur nature, leur solubilité ou leur sédimentation (regroupement en couche) étant influencée par leur emprisonnement dans les puits.

#### Les puits de polluants

Il existe deux types de puits pour la pollution : les dépôts secs et les dépôts humides. Pour les dépôts secs, le polluant se dépose par contact. L'efficacité du puits est caractérisée par la nature de la surface de contact (sol, étendue d'eau, végétation...). Les dépôts humides permettent le lessivage des polluants par la pluie. Leur efficacité dépend de l'humidité, de la solubilité des polluants et de la quantité de pluie. Les phénomènes météorologiques vont soit améliorer l'efficacité d'absorption des puits soit permettre la stagnation des polluants dans l'atmosphère.

## 2.1.4 La dispersion des polluants

Pour commencer, il est essentiel de comprendre la structure de l'atmosphère afin de mieux appréhender les mouvements des polluants ainsi que de leurs trajectoires.

### La structure de l'atmosphère

L'atmosphère est composée de plusieurs couches :

- La Troposphère est la couche la plus proche du sol, où nous vivons. Elle est chauffée par les rayonnements du sol et présente un gradient de température négatif : la température diminue avec l'altitude.
- La Stratosphère est située juste au-dessus de la Troposphère et contient la couche d'ozone, qui absorbe les rayonnements solaires. Elle présente un gradient de température positif : la température augmente avec l'altitude.
- La Mésosphère est une zone de transition entre la terre et l'espace. Son gradient de température est identique à celui de la Troposphère.
- La Thermosphère contient du dioxygène, qui absorbe les rayonnements et explique son gradient de température positif. Elle peut atteindre des températures de l'ordre de 2 000°C.

La Figure 2.4 présente les couches de l'atmosphère en fonction de l'altitude.

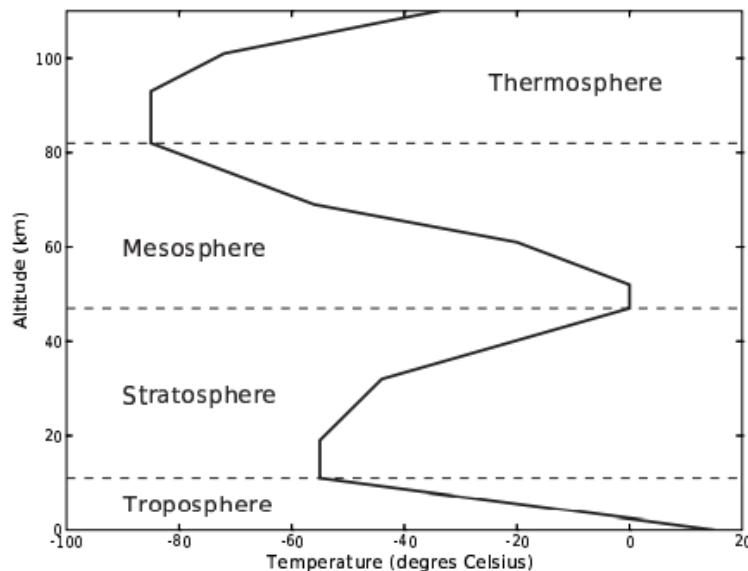


Figure 2.4: Profil vertical de température et principales couches de l'atmosphère [7].

Au-delà de la Thermosphère, se trouve l'Exosphère, la température continue d'augmenter mais les gaz sont en quantité infime. La Troposphère, la couche où nous vivons, permet grâce au gradient de température négatif, de disperser les polluants vers la Stratosphère. Comme le montre la Figure 2.5, la troposphère est divisée en deux couches car la qualité de l'air observée dans les premiers mètres au niveau du sol. Selon Stull [7], la couche limite atmosphérique (CLA) est la partie de la troposphère désigne la partie de la Troposphère

qui subit des variations l'ordre de l'heure au minimum. Cette couche est très réactive aux phénomènes naturels tels que l'évaporation, le réchauffement et la pollution. Au-dessus de la CLA, se trouve la troposphère libre où se forment les nuages. Ces derniers ont un impact sur le transport des polluants via leur effet sur le rayonnement (température du sol, pluie, réaction photochimiques...). Ces couches ne sont pas étanches entre elles, les effets météorologiques vont influencer sur la dispersion des polluants.

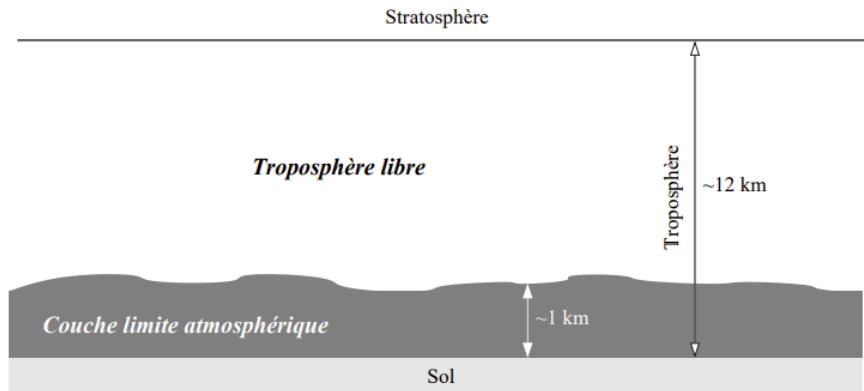


Figure 2.5: Structure de la troposphère [7].

### 2.1.5 Les phénomènes météorologiques particuliers

Pour comprendre la qualité de l'air, il ne suffit pas de considérer uniquement les polluants, les phénomènes météorologiques jouent également un rôle important. Ces derniers sont responsables de la dispersion ou du transport des polluants. La convection, les vents et les précipitations, par exemple, contribuent à disperser les polluants dans l'air, ce qui peut améliorer la qualité de l'air, ou au contraire augmenter leur concentration. Ainsi, les phénomènes météorologiques sont un facteur clé à prendre en compte pour évaluer la qualité de l'air.

#### Les phénomènes dispersifs

La dispersion des polluants est influencée par plusieurs facteurs, notamment la topologie du territoire et les paramètres météorologiques. La couche limite atmosphérique (CLA) est la partie de la troposphère qui est influencée par les limites du sol et de la couche d'atmosphère libre. La dynamique des masses d'air dans cette couche est complexe et désordonnée, avec une épaisseur moyenne de 1 km qui varie de jusqu'à 3 km en pleine journée et descend à 10 m la nuit. Le vent et la pression atmosphérique sont des facteurs clés de la dispersion des polluants, avec la vitesse et la direction du vent qui déterminent la rapidité et la direction de la dispersion. Cependant, la vitesse horizontale du vent peut varier en fonction de la pression atmosphérique et de la topologie du terrain, et les phénomènes de convection peuvent influencer la dispersion des polluants en renforçant les vents de surface pendant la journée et les vents d'altitude pendant la nuit. Le rayonnement joue un rôle important dans la formation des polluants secondaires par photochimie, tandis que l'instabilité de l'atmosphère peut entraîner un courant ascendant qui transporte la pollution vers le haut. Les obstacles naturels peuvent également modifier la circulation

des vents et concentrer l'écoulement des polluants dans certaines directions, tels que les brises de terre et de mer, les obstacles naturels et les constructions.

### Les phénomènes concentratifs

Les effets des phénomènes météorologiques peuvent être observables à l'œil nu, notamment par l'apparition d'un voile dans le paysage. L'humidité, la température et le rayonnement ont un impact sur la concentration des polluants. L'humidité favorise la concentration des particules de pollution en les captant avec des gouttelettes en suspension, qui seront ensuite relâchées lors de pluies ou brouillards. Une faible humidité accélère les réactions photochimiques et augmente la concentration de polluants. La température élevée favorise les réactions, tandis qu'une température basse peut concentrer les polluants en réduisant leur volatilité.

Une atmosphère stable, caractérisée par une couche d'air chaud au-dessus d'une couche plus froide près du sol, peut favoriser la concentration de polluants en rendant l'air froid plus dense et plus lourd que la couche du dessus. Ce phénomène se produit fréquemment la nuit par vent faible. Les configurations urbaines, telles que les parkings souterrains, les tunnels, les bâtiments encaissés et les rues canyons, combinées à un vent faible, contribuent à une augmentation de la concentration des polluants en agissant comme des obstacles concentrateurs, augmentant ainsi leur temps de présence et réduisant leur dégradation.

### Les phénomènes spécifiques en montagne

Les phénomènes spécifiques en montagne sont étudiés pour mieux comprendre les mouvements de pollution. Pour expliquer et prévenir les pics de pollution, il est crucial d'étudier le comportement des masses d'air pollué, également appelé dynamique atmosphérique [8].

Dans cette optique, les brises d'aval (brises montantes) et les brises d'amont (brises descendantes) sont des phénomènes importants à prendre en compte. Les brises d'aval se déclenchent en fonction de l'intensité du rayonnement solaire et se produisent de la minuit jusqu'au coucher du soleil. Plus il fait chaud, plus l'effet est important, atteignant une vitesse de 15 à 20 km/h. Le réchauffement des versants de la montagne permet à l'air près du sol de s'alléger et de créer une brise montante vers le sommet de la montagne, créant ainsi un flux d'air provenant des plaines et finissant vers les sommets. Si une vallée basse contient une mer de nuage, les brises d'aval peuvent transporter les nuages jusqu'à une vallée plus haute. Lorsque le soleil se couche, un reflux est créé et les nuages retournent à leur emplacement d'origine. Cet effet apporte de la chaleur et de l'humidité vers les sommets, aidant à la formation de nuages sur le relief.

Les brises d'amont se produisent après la fin des brises d'aval et sont accompagnées d'un "renversement de brise". Le sol rayonne et se refroidit ainsi que la couche d'air proche, qui devient plus dense. Un phénomène de glissement le long des pentes de cet air dense se crée, et l'air froid se concentre en fond de vallée, créant une couche épaisse d'air froid (100 à 200 m) qui s'écoule vers les plaines. La brise d'amont est une brise nocturne et est plus forte lorsque le ciel est dégagé. Elle peut être arrêtée si le ciel est couvert, car la déperdition de chaleur du sol est stoppée par la couche de nuage.

Ces phénomènes de brise dépendent de la configuration des vallées, de l'exposition au soleil et de la présence de glaciers ou de neige sur les versants. Ils sont essentiels au climat montagnard. En été, lors de ciel dégagé, la brise d'aval fait circuler l'air et transporte l'humidité, formant des nuages au niveau du sommet. Elle est plus forte que la brise d'amont, ce qui donne l'impression que la montagne aspire l'air de la plaine. En

hiver, lors d'épisodes anticycloniques, la brise d'amont transporte un air sec (libéré de son humidité au contact de la neige sur les versants) vers la plaine en traversant les vallées.

En outre, les effets dynamiques des vallées face aux vents peuvent entraîner plusieurs phénomènes, en fonction de la direction du vent par rapport à l'axe de la vallée. Lorsque le vent est perpendiculaire, la vallée devient le centre de la turbulence et une couche d'air dense peut être chassée pour laisser place à l'air froid provenant de l'extérieur de la vallée qui descend vers le fond. Dans le cas où le vent souffle dans l'axe de la vallée, des turbulences se créent au niveau des versants, le vent est accéléré dans les vallées étroites et crée des remous en sortie. Si le vent souffle avec un angle inférieur à 90°, une partie de l'air s'engouffre dans la vallée, l'effet de canalisation est accentué lorsque le vent est proche de l'axe. Les effets météorologiques spécifiques à la montagne sont dus aux brises locales et à la canalisation des vents extérieurs dans les vallées.

### 2.1.6 Les principaux polluants surveillés

Cette section énumère les principaux polluants prioritaires de l'union européenne. Pour chacun d'eux, l'origine, les effets sur la santé et les conséquences sur l'environnement sont présentés. Les polluants sont présentés dans l'ordre suivant : particules en suspension, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ozone, ammoniac et composés organiques volatils.

#### Les particules en suspensions

Le polluant *PM10*, mesuré par son diamètre de moins de 10 micromètres, provient de phénomènes d'érosion, de pollens et d'émissions industrielles. Les particules fines *PM2,5*, quant à elles, pénètrent plus profondément dans l'appareil respiratoire et sont émises par la combustion, le trafic, les carrières et l'industrie du bâtiment [2]. Les deux types de particules peuvent être de nature différente, allant des pollens aux particules minuscules de métaux ou d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les *PM10* sont généralement retenues par le système de défense du corps humain, mais leur absorption par voie orale peut entraîner des cancers de la vessie. Les *PM2,5*, en revanche, peuvent être évacuées par la toux ou le mucus, mais provoquent des troubles respiratoires, cardio-vasculaires et peuvent entraîner des cancers du poumon.

#### Le Dioxyde de soufre $SO_2$

Le dioxyde de soufre  $SO_2$  provient de la combustion des énergies fossiles contenant du soufre, telles que le pétrole, le fioul et le charbon, émis par des activités telles que l'industrie métallurgique, l'industrie chimique, les centrales thermiques et le chauffage au fioul. Ce gaz irritant peut entraîner des troubles respiratoires et cardiaques à long terme. Il est également à l'origine des pluies acides par sa transformation secondaire (particule de sulfate), il devient au contact de l'eau de l'acide sulfurique, causant ainsi des dommages directs aux végétaux et modifiant l'équilibre des sols. Il contribue notamment au noircissement des façades des bâtiments.

#### Les Oxydes d'Azote $NO$ et $NO_2$

Les oxydes d'azote  $NO_x$ , quant à eux, proviennent principalement de la combustion de diesel et de bois énergie et sont émis par le trafic routier diesel, le chauffage des serres et l'industrie manufacturière. Ils contribuent à la formation des pluies acides et contribue à

la formation d'Ozone dans sa transformation secondaire. Gaz irritant, il pénètre dans le système respiratoire plus profondément que le  $SO_2$  ce qui, à long terme, provoquent des infections pulmonaires, des problèmes respiratoires chroniques et la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO). Il perturbe également la croissance et les défenses naturelles des végétaux.

### L'Ozone $O_3$

L'ozone  $O_3$  est un composant normal de l'atmosphère, mais devient un polluant secondaire lors de fortes concentrations, provoqué par les  $NO_x$ , les  $COV$  et le  $CO$ . Ce polluant photochimique perturbe les poumons, les reins, le cerveau et les yeux par oxydation et peut causer des oedèmes pulmonaires à forte concentration. Il perturbe également les processus physiologiques tels que la photosynthèse et la respiration nocturne des végétaux et dégrade certains polymères et caoutchoucs. Pour terminer, il contribue à l'effet de serre.

### L'ammoniac $NH_3$

L'ammoniac  $NH_3$  provient principalement de l'engrais et est produit à 90 % par l'agriculture, notamment lors d'épisodes d'épandage et de fertilisation des sols. Il est irritant et possède une forte odeur. Il contribue à la formation de particules de nitrate d'ammonium. Ces composés azotés acidifient l'environnement car ils sont injectés dans la terre.

### Les Composés Organiques Volatils $COV$

Les composés organiques volatils  $COV$  sont des gaz provenant de sources telles que l'utilisation de solvants organiques, le bois énergie, le trafic routier essence, les industries chimiques et agroalimentaires. Les  $COV$  comprennent tous les gaz contenant au moins un atome de carbone et étant sous forme gazeuse à partir de 0°C. Les  $COV$  peuvent être divisés en deux catégories : les  $COVNM$  et les  $COV$ . Les  $COVNM$  excluent le méthane ( $CH_4$ ), qui est présent en grande quantité et qui provient de la dégradation de la matière organique. Les  $COVNM$  ont un impact plus important sur la santé que les autres  $COV$ . Les  $COV$  contribuent à la formation de l'ozone dans la troposphère et sont des réactifs photochimiques. Ils peuvent être irritants et réduire la capacité respiratoire à court terme. À long terme, ils peuvent devenir mutagènes et cancérogènes.

### Autres polluants

Cette section se penche sur deux polluants atmosphériques : les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et le monoxyde de carbone  $CO$ . Ces derniers sont produits lors de combustions réalisées dans des conditions défavorables telles que la combustion de bois humide, une chaudière mal réglée, une cheminée ouverte ou un moteur mal réglé. Le monoxyde de carbone est un gaz inodore, incolore et très toxique qui peut être difficile à détecter. Le HAP quant à lui, peut affecter le système immunitaire tandis que le monoxyde de carbone peut provoquer des troubles respiratoires, des maux de tête et même entraîner la mort par asphyxie.

## 2.1.7 Conclusion de la pollution atmosphérique

Cette section est consacrée à la compréhension de l'origine, du cycle de vie et de la dispersion des polluants dans l'atmosphère. La structure de l'atmosphère joue un rôle important

dans le transport des polluants et leur devenir. Les spécificités topologiques des montagnes influencent également la pollution dans les vallées.

Comprendre les phénomènes de diffusion des polluants est essentiel pour évaluer la qualité de l'air. Il est important de suivre l'évolution de la pollution sur le terrain et à des fréquences régulières, voire en temps réel, pour évaluer les risques pour la santé publique. Ce sujet concerne tout le monde, y compris la CCPVG.

Dans la partie suivante, nous abordons la surveillance de la qualité de l'air en France, en examinant les lois qui ont initié cette surveillance. Nous étudions également le réseau de stations de mesure de la région Occitanie et les normes relatives à la qualité de l'air.

## 2.2 La surveillance de la Qualité de l'air

La pollution de l'air est l'une des principales préoccupations de santé publique à l'échelle mondiale. Elle est responsable de 4,2 millions de décès par an dus à la pollution ambiante (air extérieur) [9]. Pour améliorer la qualité de l'air, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) propose des recommandations [10] qui ont été adoptées par diverses organisations au niveau national ou continental (UE, CHINE, USA), telles que les Normes nationales de qualité de l'air ambiant aux États-Unis (NAAQS) ou Atmo France en France dans le cas présent. Parmi ces recommandations, les nouvelles directives de l'OMS, approuvées en septembre 2021 [11], fixent des seuils de pollution encore plus stricts que ceux définis en 2005 [12]. Afin de se conformer à ces recommandations, les gouvernements s'appuient sur des organisations telles que l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), chargée de surveiller la qualité de l'air en Europe, AirNow aux États-Unis, le Département de l'environnement et de l'écologie de chaque province en Chine et le Conseil central de contrôle de la pollution en Inde, etc. [13]. Ces organisations sont responsables de la surveillance de la qualité de l'air et doivent fournir des informations fiables et régulières au public et aux autorités.

En France, la surveillance de la qualité de l'air est assurée par un réseau d'associations coordonnées par la fédération Atmo France. Le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable ainsi que le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) supervisent cette surveillance, tandis que l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) est chargée du support technique.

### 2.2.1 Le LCSQA

Créé en 1991 par le ministère chargé de l'environnement, le LCSQA est un support scientifique et technique pour l'État et les Agences Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Depuis 2011, il est responsable de la coordination du dispositif de surveillance de la qualité de l'air. Il est en partenariat avec l'École des Mines de Douai, le Laboratoire National de métrologie et d'Essais ainsi que l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques. Une de ses missions est de garantir une surveillance optimale sur l'ensemble du territoire. La Figure 2.6 illustre les interactions entre les différents acteurs.

Pour garantir la mission de surveillance, le LCSQA a mis en place une chaîne d'étalonnage pour assurer la cohérence des mesures de la qualité de l'air effectuées par les AASQAs. Les principaux polluants mesurés sont  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  et  $O_3$ , qui permettent de calculer l'indice ATMO pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants et l'indice IQA pour les autres villes. Le LCSQA fournit également les cadres nécessaires à la mise en application des lois et propose des Plans Climat Air Energie National et

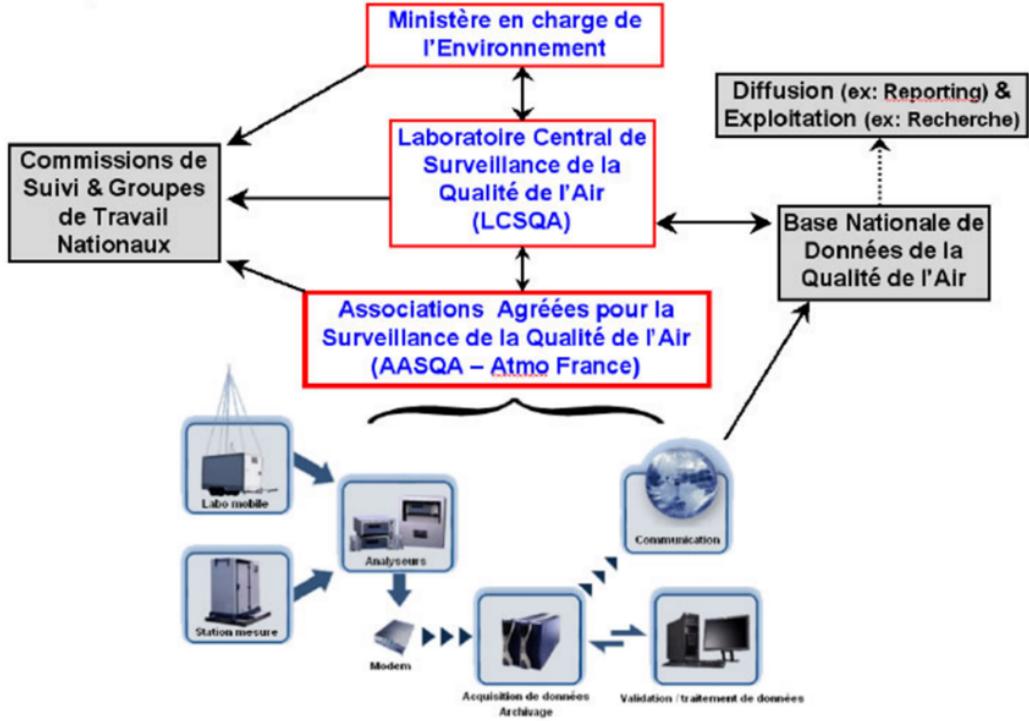


Figure 2.6: Schéma de fonctionnement du dispositif national français [14].

Territorial. En vertu de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (TECV), un Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET) doit être élaboré pour les territoires de plus de 20 000 habitants [15]. Cette loi, publiée au Journal Officiel le 18 août 2015, a pour objectif de permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et à la préservation de l'environnement.

Le réseau de stations de mesure fixe permet d'établir une situation et de suivre l'évolution des efforts de réduction des émissions, ainsi que d'agir au niveau de la population en cas de pics de pollution en mettant en place des dispositions préfectorales. Le LCSQA coordonne et normalise les données pour permettre aux AASQAs de surveiller la qualité de l'air sur tout le territoire national et de prédire son évolution, leur permettant ainsi d'agir pour protéger la population.

### 2.2.2 Les Normes de la qualité de l'air

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et la Communauté Européenne fixent les normes de la qualité de l'air. Les directives européennes sont la référence réglementaire légale. Les directives de l'OMS sont complémentaires et recommandées sans pour autant être réglementaires. Les enjeux sont sanitaires et elles sont définies afin de protéger la population notamment les personnes vulnérables. Les  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  et  $O_3$  sont étroitement surveillées pour leur effet de nuisance. En effet, rien que pour les particules fines, 45 120 décès prématurés sont recensés en 2013 selon Santé publique France. La Figure 2.7 présente un extrait du tableau des normes Qualité de l'air. En rouge, l'origine des valeurs seuils, car les normes peuvent être aussi nationale. Les objectifs de qualité sont les valeurs à atteindre à long termes. La valeur cible est un objectif à atteindre selon un délai définit. La valeur limite correspond à la valeur ou une concentration plus

élevée constitue une menace pour la santé ou l'environnement.

<b>PARTICULES (PM<sub>10</sub>)</b>		
Objectif de qualité	30 µg/m <sup>3</sup> ( <b>FR</b> )	en moyenne annuelle
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	50 µg/m <sup>3</sup> ( <b>UE</b> )	en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours par an
	40 µg/m <sup>3</sup> ( <b>UE</b> )	en moyenne annuelle
Seuil d'information et de recommandation	50 µg/m <sup>3</sup> ( <b>FR</b> )	en moyenne sur 24 heures
Seuil d'alerte	80 µg/m <sup>3</sup> ( <b>FR</b> )	en moyenne sur 24 heures

<b>PARTICULES (PM<sub>2,5</sub>)</b>		
Objectif de qualité	10 µg/m <sup>3</sup> ( <b>FR</b> )	en moyenne annuelle
Valeur cible pour la protection de la santé humaine	20 µg/m <sup>3</sup> ( <b>FR</b> )	en moyenne annuelle
Valeur limite 2015 pour la protection de la santé humaine	25 µg/m <sup>3</sup> ( <b>UE</b> )	en moyenne annuelle

Figure 2.7: Extrait du tableau des normes Qualité de l'air [16].

Le cadre légal définit différents seuils de qualité de l'air, qui se divisent en seuils d'information et de recommandation pour la prévention de la pollution, ainsi que des seuils d'alerte qui entraînent des mesures d'urgence. Ces normes sont en place pour protéger la population et l'environnement, et sont utilisées par les autorités locales pour prendre des mesures, telles que l'encouragement des transports en commun et la réduction des activités industrielles.

Ces seuils servent également à calculer l'indice de la qualité de l'air, qui permet de connaître rapidement la qualité de l'air dans une région donnée. L'indice ATMO, utilisé en France, a été harmonisé avec celui de l'agence européenne pour l'environnement depuis le 1er janvier 2021, et comprend désormais les particules fines PM<sub>2,5</sub>. L'indice est divisé en six classes pour faciliter la compréhension de la qualité de l'air par les citoyens.

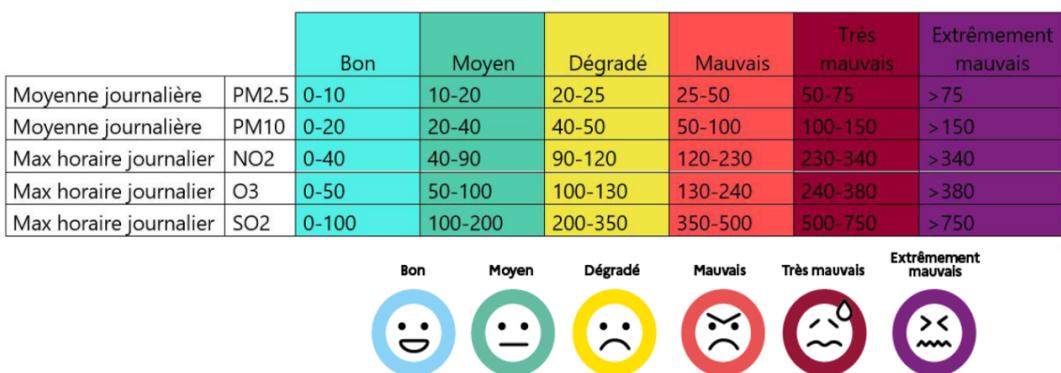


Figure 2.8: Extrait du tableau des normes Qualité de l'air [17].

Le calcul de l'indice ATMO est effectué quotidiennement à partir des concentrations dans l'air de cinq polluants réglementés par l'Union européenne : le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>, le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>, l'ozone O<sub>3</sub> et les particules de diamètre inférieur à 10 micromètres

$PM_{10}$  et 2,5 micromètres  $PM_{2.5}$ . Il vise à donner une vue synthétique de la pollution de fond dans des conditions quotidiennes. Les AASQA calculent cet indice à partir de données de modélisation qui intègrent la météo, d'autres plates-formes de modélisation de la pollution, l'inventaire régional des émissions et les mesures des stations de fond de la qualité de l'air.

Il convient de noter que l'indice ATMO ne prend pas en compte les mesures influencées par la pollution, telles que le trafic et l'activité industrielle. Le modèle utilisé est un modèle méso-échelle, ce qui signifie que l'indice ATMO est déduit à partir d'un maillage caractérisé par des niveaux de pollution et est croisé avec la situation géographique de la commune ou de l'intercommunalité comme le montre la Figure 2.9.

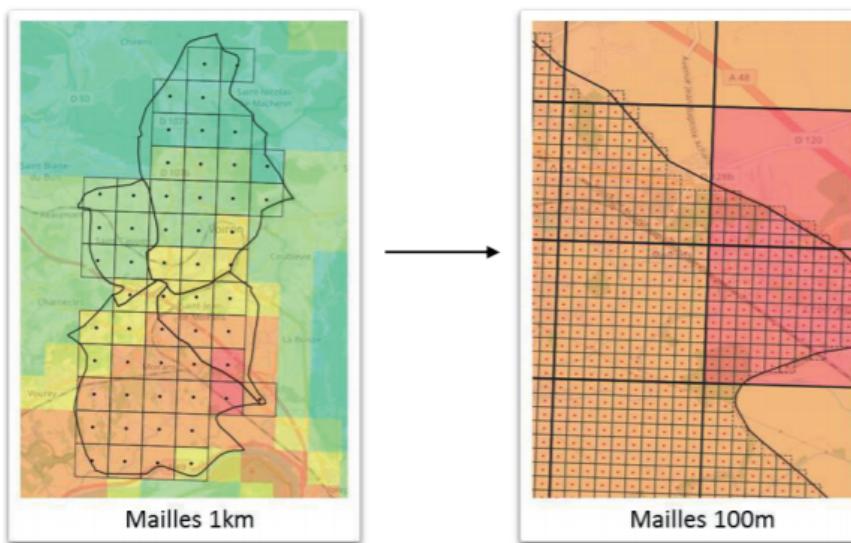


Figure 2.9: Calcul de l'indice à partir d'un modèle méso-échelle [17].

Le système de surveillance de la qualité de l'air en France est organisé à plusieurs niveaux. Au niveau international, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) établit des lois et des réglementations. Au niveau européen, des directives sont établies pour les États membres. Au niveau national, la France est divisée en régions, ce qui permet de surveiller et de distribuer les responsabilités et les missions. Les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'air (AASQA) remplissent ce rôle au niveau régional et départemental. Ils sont les acteurs locaux de la surveillance de l'air et fournissent les références scientifiques pour toutes les actions effectuées par les préfectures.

### 2.2.3 Les AASQAs

La loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (LAURE) du 30 décembre 1996 est à l'origine de l'agrément des AASQA créées en 1970 pour la surveillance de la qualité de l'air. Elles vise "le droit à chacun de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé". Ces associations ont pour mission :

- Surveiller et prévoir la qualité de l'air;
- Informer et sensibiliser la population;
- Accompagner les acteurs locaux;

- Contribuer à l'innovation sur les territoires.

Ce sont des associations de loi 1901 agréées par l'état [18], indépendantes financièrement et dirigées de façon quadripartite (État, Collectivités, Entreprises, Associations et personnalités qualifiées santé-environnement).

Au nombre de 18 (une par région), elles sont au plus près des acteurs locaux et permettent de partager des diagnostiques à l'échelle de la région. Les AASQAs sont des acteurs de la transition écologique au plus près des citoyens et des décideurs, présents durablement dans les territoires et en mesure d'évaluer et de suivre, de manière indépendante, l'efficacité des plans d'actions sur la qualité de l'air [19]. Les enjeux sont croisés (air, climat et énergie) et traitent aussi la qualité de l'air extérieur et intérieur. Les données fournies par ces dernières se veulent être fiables et transparentes pour servir de références. Une normalisation des informations est faite pour construire un indicateur de la qualité de l'air à l'échelle nationale (indice ATMO). Atmo-Occitanie est l'AASQA de la région Occitanie. Elle surveille, entre autres, le département des Hautes-Pyrénées où est située la CCPVG.

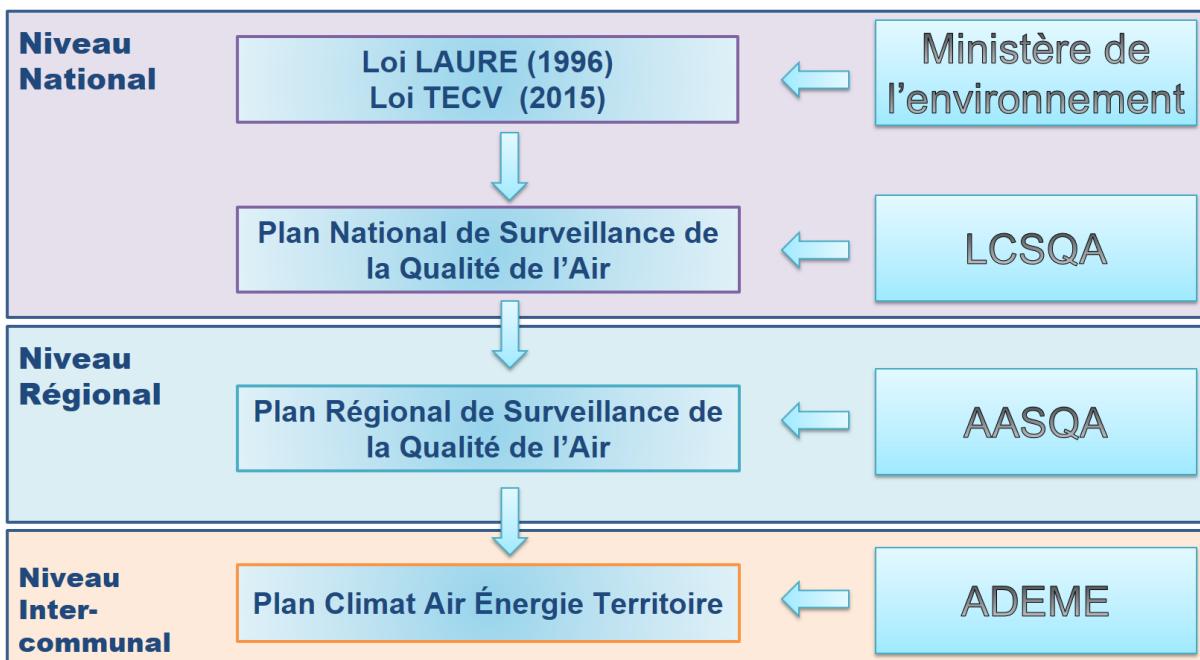


Figure 2.10: Le cadre réglementaire de la surveillance de la qualité de l'air [19].

## 2.2.4 Le réseau de surveillance d'ATMO OCCITANIE

Atmo-Occitanie surveille la qualité de l'air de 13 départements dont 2 grandes métropoles : Toulouse et Montpellier. La région Occitanie est la 1ère région viticole et la 2ème région agricole de France. Elle est composée d'un littoral méditerranéen, un massif montagneux (les Pyrénées) et des territoires ruraux. Atmo-Occitanie accompagne les acteurs locaux pour concilier développement économique, développement démographique et qualité de l'air. C'est à travers le Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air (PRSQA) que les réglementations européennes et nationales sont suivies au niveau régional. Grâce aux suivis de plans et programmes territoriaux Plans Climat Air Energie Territorial (PCAET), Plans de Déplacements Urbains (PDU), Plans de Protection de

l'Atmosphère (PPA), Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT)), elle accompagne les collectivités pour lutter contre la pollution et l'air et assurer leur transition énergétique. La Figure 2.10 illustre les différents plan et programmes en liaison avec la loi LAURE et du niveau géographique.

La surveillance de la qualité de l'air est basée sur trois outils complémentaires et indépendants :

- **L'inventaire des émissions** qui localise géographiquement les activités sources de pollution sur le territoire;
- **La modélisation** pour la prévision et fournir une cartographie de la pollution à différentes échelles dans le temps;
- **Le dispositif de mesures fixes ou mobiles** sur le territoire permet de mesurer la pollution temps réel.

Ainsi, la première mission de l'AASQA est de surveiller les polluants au niveau régional grâce aux mesures en temps réel et à l'inventaire régional des émissions. Le découpage de la région en département permet de suivre l'évolution de la pollution par département.

### **L'inventaire régional des émissions**

Il s'inscrit dans le cadre de l'arrêté du 24 août 2011 relatif au Système National d'Inventaires d'Emissions et de Bilans dans l'Atmosphère (SNIEBA), le Pôle de Coordination nationale des Inventaires Territoriaux (PCIT). Il est associé avec le Ministère en charge de l'Environnement, l'INERIS, le CITEPA et AASQAs. Atmo Occitanie réalise et maintient à jour un Inventaire Régional Spatialisé des émissions de polluants atmosphériques et GES sur l'ensemble de la région Occitanie. L'inventaire des émissions référence une trentaine de substances avec les principaux polluants réglementés ( $NO_x$ , particules en suspension,  $NH_3$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ , benzène, métaux lourds,  $HAP$ ,  $COV$ , etc.) et les gaz à effet de serre ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ , etc.). Cet inventaire est notamment utilisé par les partenaires d'Atmo Occitanie comme outil d'analyse et de connaissance détaillée de la qualité de l'air sur leur territoire ou relative à leurs activités particulières. Les quantités annuelles d'émissions de polluants atmosphériques et GES sont ainsi calculées pour l'ensemble de la région Occitanie, à différentes échelles spatiales (EPCI, communes, ...), et pour les principaux secteurs et sous-secteurs d'activité. La méthodologie de calcul des émissions consiste en un croisement entre des données primaires (statistiques socio-économiques, agricoles, industrielles, données de trafic...) et des facteurs d'émissions issus de bibliographies nationales et européennes. Elle est régie par l'équation n°(2.1):

$$Es, a, t = Aa, t * Fs, a \quad (2.1)$$

Avec:

**E**: émission relative à la substance "s" et à l'activité "a" pendant le temps "t"

**A**: quantité d'activité relative à l'activité "a" pendant le temps "t"

**F**: facteur d'émission relatif à la substance "s" et à l'activité "a"

Voici un exemple pour mieux comprendre: Les émissions de PM10 "Es" dues au chauffage bois "a" pendant l'année "t" sont égales nombre de fois que le chauffage est allumé "Aa" pendant l'année "t" multiplié par la masse de polluant émise par tonne de bois "Fs" servant au chauffage "a". Le résultat est en Tonne par An (T/An).

L'inventaire des émissions permet d'alimenter les données pour la modélisation et il est également un outil de diagnostic et d'aide à la décision pour les politiques publiques (études d'impact, scénarisation, plan climat).

## La modélisation

La modélisation est un outil permettant de simuler le transport des polluants mais aussi leur dispersion. A partir de diverses données, elle permet de cartographier la concentration des polluants de l'échelle régionale à l'échelle de la rue. La modélisation peut aussi prévoir les mouvements de pollution et donc la cartographier à une date ultérieure, c'est ce qui est communément nommé une prévision. La modélisation de la pollution permet alors

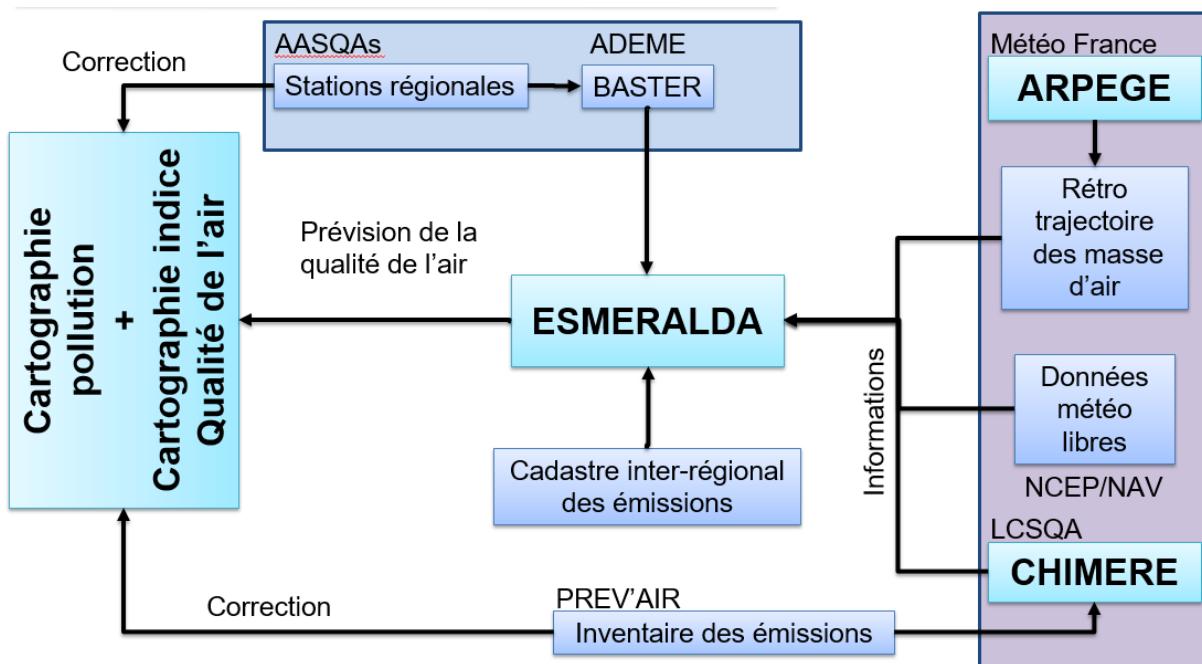


Figure 2.11: Comment sont modélisées les cartes de la Qualité de l'Air [14].

de:

- Évaluer la situation annuelle de la pollution de l'air sur un territoire au regard de la réglementation et d'identifier les zones à enjeux;
- Évaluer l'exposition des populations;
- Prévoir la qualité de l'air du jour et les jours suivants, et ainsi anticiper la survenue d'épisodes de pollution de l'air.

La Figure 2.11 illustre les données entrant dans le système **EtudeS Multi RégionA Les De l'Atmosphère** (ESMERALDA). La plate-forme inter-régionale ESMERALDA résulte de l'étroite collaboration de neuf AASQA [14]. **CHIMERE** (en français chimère) est un modèle déterministe de chimie-transport. C'est un code informatique qui réunit un ensemble d'équations représentant le transport et la chimie d'espèces chimiques et qui permet de quantifier l'évolution d'un panache de polluants en fonction du temps sur différents domaines (de l'urbain au continental). Le modèle de prévision numérique planétaire **Arpège** (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) est un élément essentiel

pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France. Ainsi, l'ADEME a développé **BASTER**, base de données qui recueille en temps quasi réel les mesures réalisées par les AASQA. Une liaison directe est établie entre BASTER et les modèles de qualité de l'air utilisés dans le cadre du système **PREV'AIR**. L'ADEME l'Agence de la transition écologique fournit BASTER, une base de données temps réel. Elle recueille les mesures réalisées par les AASQAs. Ensuite PREV'AIR interroge la base pour faire fonctionner ses modèles et fournie les cartographies aux AASQAs. La modélisation ne peut se faire sans les mesures des stations de la qualité de l'air, elles permettent notamment de corriger les cartes de pollutions et forment ce que l'on appelle une boucle de rétroaction.

### Les stations de mesure fixes et mobiles

Au nombre de 44, les stations de mesure fixe évaluent la qualité de l'air sur l'ensemble de la région Occitanie [20]. Des stations de mesure mobiles sont aussi déployées pour couvrir ponctuellement certaines parties du territoire éloignée des stations ou sous influence d'une pollution à surveiller. En effet, les stations sont concentrées près des grandes villes (6 à Montpellier, 16 à Toulouse, 3 à Nîmes, 3 à Perpignan). Les autres sont situées dans les préfectures de chaque département. Les stations de mesure sont mises en place par Atmo Occitanie la mesure est continue ou bien temporaire. Elle se concentre sur les polluants surveillés par la réglementation. Le but est de surveiller vérifier si les valeurs sont respectées mais aussi d'alerter en cas de dépassement. Elles permettent de suivre l'évolution de la qualité de l'air dans le temps. La mesure peut être en direct ou différée (pluviométrie, analyse de particules de métal dans l'air). Les concentrations sont mesurées toutes les heures (en micro-grammes par mètre cubes). Les polluants mesurés sont l'Ozone ( $O_3$ ), les Oxydes d'Azotes ( $NO_x$ ), les particules en suspensions ( $PM10$ ) et les particules fines ( $PM2.5$ ).



Figure 2.12: Photographies d'une station fixe et d'une station mobile du réseau Atmo [20].

Nous discuterons plus précisément des stations de mesures dans la section suivante.

### 2.2.5 La représentativité des stations de mesures

Une station de mesure de la qualité de l'air a pour but de contrôler la pollution atmosphérique et de surveiller les concentrations en polluants dans l'air ambiant. Quelles soient fixe ou mobile (remorque ou camion laboratoire), elle analyse l'air en continu. Elles sont classifiées selon deux critères : l'environnement d'implantation et l'influence du type de pollution.

#### L'environnement d'implantation

L'environnement d'implantation définit le type de zone sur une échelle de plusieurs kilomètres[18]. Une station sera classifiée comme étant urbaine si l'environnement est une zone bâtie en continue (bâtiments de deux étages minimum). Une station sera périurbaine lorsque la zone n'est pas bâtie en continue (combinée avec des zones non construites). La station rurale est classé en trois sous zones :

- Proche zone urbaine: elle est située dans les 10 km de la périphérie de la zone urbaine;
- Régionale: elle est éloignée entre 10 et 50 km d'une source de pollution;
- Nationale: elle est le plus éloignée possible de toute source de pollution ( $> 50$  km).

Les stations rurales régionales participent à la surveillance de l'exposition de la population et des écosystèmes à la pollution atmosphérique de fond, notamment photochimique, à l'échelle régionale. Les stations nationales participent à la surveillance dans les zones rurales de la pollution atmosphérique de fond issue des transports de masses d'air sur de longues distances et notamment à l'échelle nationale et continentale. Elles sont soumises à des directives (2004/107/CE (article 4, point 9) et 2008/50/CE (article 6, point 5)) très strictes et doivent répondre à leurs exigences. Selon les dispositions de la Directive 2008/50/CE (annexe III – § 2), "les points de prélèvement visant à assurer la protection de la végétation et des écosystèmes naturels sont implantés à plus de 20 km des agglomérations ou à plus de 5 km d'une autre zone bâtie, d'une installation industrielle, d'une autoroute ou d'une route principale sur laquelle le trafic est supérieur à 50 000 véhicules par jour". L'objet de ces critères est de garantir une représentativité spatiale minimale (au moins 1000 km<sup>2</sup>) des points de prélèvements.

#### Le type d'influence

Le type de pollution présent dans la zone de la station va déterminer l'influence sur la mesure [21]. La station sera dite sous **influence industrielle** lorsque la présence de polluants issue de l'industrie (centrale thermique, raffinerie, aéroport, construction...) a une influence conséquente sur les concentrations. Elle sera sous **influence trafic** lorsque le point de prélèvement est à proximité d'un axe routier important. Enfin, elle sera classifiée de **fond** lorsqu'elle n'est pas soumise au deux influences précédentes. Elle est représentative d'une zone d'au moins plusieurs Km<sup>2</sup>. Elle est principalement utilisée pour surveiller l'exposition moyenne de la pollution de fond de la population et/ou de la végétation. Il est possible qu'une station de mesure soit soumise à plusieurs influences. La Table 2.1 illustre les possibilités de classifications.

		Environnement d'implantation				
		Urbain	Péri-Urbain	Rural		
Type d'influence	Fond			Proche d'une zone urbaine	Régional	National
	Trafic	U_F	PU_F	RP_F	RR_F	RN_F
	Industrielle	U_I	PU_I	RP_I	OS	OS

U: Urbain

RP: Rural Proche (de zone urbaine)

F: Fond

PU: Péri\_Urbain

RR: Rural Régional

T: Trafic

OS: Observation spécifique

I: Industrielle

RN: rural National

Table 2.1: Labérisation de station en fonction des combinaisons possibles pour le couple station/polluant [21].

Ces stations de mesures ont une classification et une labérisation en fonction de critères vus précédemment. Cependant, nous pouvons remarquer qu'en fonction de leurs objectifs, elles seront différentes. Surveiller une pollution de fond implique des mesures de concentrations spécifiques en comparaison à des stations de mesure sous influence du trafic. Ces stations sont soumises à des directives européennes et à des normes éditées par l'AFNOR.

## 2.2.6 Les Technologies de surveillance de la qualité de l'air

La Directive 2008/50/CE impose des méthodes de mesures normalisées pour chaque polluant surveillé. L'intérêt de ces méthodes est d'avoir une grande précision des concentrations mesurées pour les comparer aux objectifs de qualité de l'air (CF. 4.2 Normes de la QA). Elles sont appliquées à toutes les stations de mesure de la qualité de l'air gérées par les AASQA. Le but est d'avoir les mêmes réglages des analyseurs de gaz pour toutes les stations.

### Les stations de mesure conventionnelles

Ces stations suivent la Directive 2008/50/CE, elles doivent surveiller les gaz réglementés suivant des méthodes normalisées car c'est sur la base de ces mesures que les services de l'état, les collectivités, les médias et le public sont informés de la qualité de l'air (pic de pollution surtout). C'est aussi à partir de ces mesures que peuvent être déclenchées des procédures réglementaires destinées à améliorer la qualité de l'air : réduction des émissions industrielles, limitation de vitesse ou circulation alternée... Les données de qualité de l'air sont exploitées au niveau national et international pour les missions suivantes:

- Études épidémiologiques;
- Suivi de la pollution atmosphérique;
- Analyse au niveau régional;
- Transmission et exploitation par la commission européenne.

### Directives et Normes Européennes

Ces différentes utilisations des données montrent qu'il est nécessaire de fiabiliser le dispositif de surveillance dans le temps et dans l'espace afin de garantir la justesse des mesures et de la pérenniser dans le temps : de cette façon, la population, les pouvoirs publics, les instances européennes... peuvent s'appuyer et avoir confiance dans les données de qualité

de l'air. La Table 2.2 présente les méthodes d'analyse pour la surveillance réglementaire des polluants [21] : Ces stations de mesures ont une classification et une labélisation

	Polluants					
	NOx	O3	SO2	CO	PM10	PM2.5
Méthode de référence	EN 1421	EN 14625	EN14212	EN 14626	EN 12341	EN 14907
Principe de mesure	Chimiluminescence	Absorption UV	Fluorescence UV	Rayonnement IR non dispersif	Gravimétrie sur filtre	

Table 2.2: Méthodes d'analyse pour la surveillance réglementaire des polluants [21].

en fonction de critères vus précédemment. Cependant, nous pouvons remarquer qu'on fonction de leurs objectifs, elles seront différentes. Surveiller une pollution de fond implique des mesures de concentrations spécifiques en comparaison à des stations de mesure sous influence du trafic. Ces stations sont soumises à des directives européennes et à des normes éditées par l'AFNOR.

## La chaîne d'acquisition des polluants

Une station de mesure possède sur son toit des cannes de prélèvement de l'air automatique. Elles permettent de récupérer l'air ambiant au moyen d'une pompe et de les acheminer aux différents analyseurs à l'intérieur de la station. Chaque analyseur va mesurer le polluant en suivant la méthode de référence lui correspondant. La fréquence de mesure est inférieure à l'heure, en effet, plusieurs mesures sont effectuées et elles sont ensuite analysées et transmises toutes les heures à la station d'acquisition. La station d'acquisition récolte les données de toutes les stations de la région, les stocke et les transmet via la 4G toutes les heures au bureau des techniciens. Ce bureau va valider une première fois les données et écarter les incohérences géographiques et typologique de la station. Une validation complémentaire est effectuée par le bureau des ingénieurs pour le suivi de l'évolution de la qualité de l'air. Ensuite le pôle ATMO où sont regroupé d'autre ingénieurs, va vérifier la conformité des mesures avec les réglementations européennes et alerter suivant les dépassements les pouvoirs concernés. Ils éditent également les bilans de la qualité de l'air, les modélisations de la pollution, la cartographie à l'échelle régionale et urbaine ainsi que l'inventaire des émissions. La Figure 2.13 illustre la chaîne de mesure.

Les réglementations européennes et les normes alourdissent la chaîne de mesure et l'ajout de nouvelles stations de mesure est difficile et coûteux. Lorsque la surveillance de la qualité de l'air ne demande pas une précision aussi haute que celle des stations traditionnelles (niveaux de concentration plutôt que mesures réglementaires), des alternatives de mesures complémentaires peuvent être envisagées : ce sont les réseaux de micro-capteurs ou LCS.

## Les réseaux de LCS

A cause de leur coût et de leur manque de mobilité et malgré le déploiement de stations mobiles, elles ne peuvent répondre à un besoin croissant de la population à surveiller la qualité de l'air localement. Des initiatives citoyennes commencent à émerger grâce aux progrès technologiques et la disponibilité des capteurs à faible coût. Ces réseaux de capteurs permettent de cartographier la pollution avec des niveaux de pollution en temps réel et avec une densité spatio-temporelle augmentée au regard des stations traditionnelles [22]. (Cf. Les Micro-capteurs) Voici quelques exemples de projets menés par différents AASQAS : ATMOSUD déploie 5 stations de mesure composées de micro-capteur pour



Figure 2.13: Chaîne de mesure de la qualité de l'air pour les AASQA [21].

affiner les cartes de pollution fournie par elle-même. La Figure 2.14 illustre la précision spatiale apportées par les mesures. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a mené une campagne

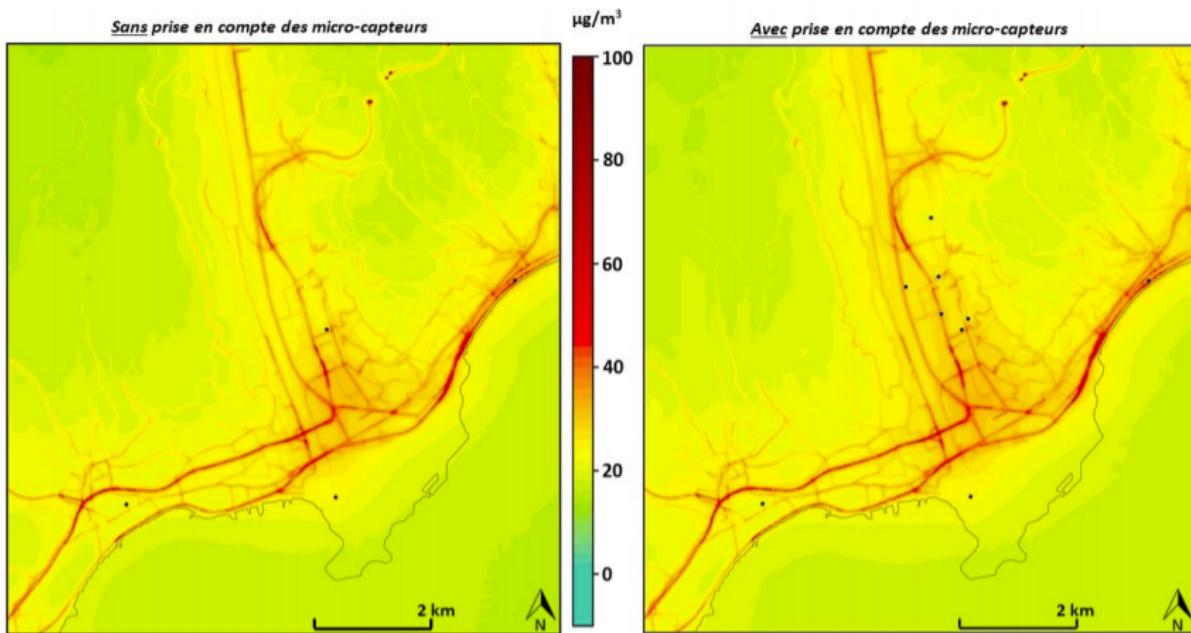


Figure 2.14: Cartographie annuelle de la pollution en PM10 avec et sans micro-capteurs ([www.atmosud.org](http://www.atmosud.org)).

de sensibilisation auprès des citoyens à l'aide de micro-capteurs : le projet Mobicit'air. Elle permet à 30 volontaires de mesurer la qualité de l'air avec un dispositif portable sur une période de 18 mois. Ce projet citoyen vise à sensibiliser sur la qualité de l'air et rassembler autour de la réduction de pollution.

Atmo Hauts-de-France équipait 50 volontaires de la région avec des micro-capteurs, dans le cadre du projet SoNumAir pendant 15 jours. Le bilan de cette étude est que les citoyens contournent le problème : ils diminuent leur exposition à la pollution mais ne cherchent pas à réduire la production.



Figure 2.15: Projet citoyen Mobicit'air ([atmo-auvergnerhonealpes.fr](http://atmo-auvergnerhonealpes.fr)).

ATMO Grand Est connecte des micro-capteur à son réseau de surveillance de la pollution afin de mieux détecter les pics de pollutions et de réguler le trafic en conséquence.

Les réseaux de capteurs à bas coûts sont une réelle opportunité pour la surveillance de la qualité de l'air et sont de plus en plus utilisé par les AASQA pour une complémentarité du réseau traditionnel de mesure. La section suivante est dédié aux micro-capteur, leur définition et les opportunités qu'ils peuvent offrir pour la surveillance de la qualité de l'air.

## 2.3 Etat de l'art sur les capteurs à bas coût (Low-Cost Sensors)

Les progrès actuels technologiques et la disponibilité des micro-capteurs permettent aux initiatives citoyennes de surveiller la qualité de l'air à faible coût [22]. Ils permettent d'augmenter la densité de mesure spatio-temporelle pour en faire des cartes de gradient de pollutions en temps réel à l'échelle locale. Dans cette section, nous présenterons les différentes technologies de micro-capteur puis nous allons aborder l'état de l'art de la surveillance de la qualité de l'air avec de tels dispositif et enfin discuter de leur pertinence.

### 2.3.1 Définition

Selon le dictionnaire Larousse, un **capteur** est *un organe qui élabore, à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique, souvent de nature électrique, utilisable à des fins de mesure ou de commande*. De façon générale, un capteur convertir la grande physique à mesure appelée également mesurande en un signal électrique de mesure pour des traitements numériques ultérieurs (Figure 2.16).

La définition du micro-capteur ou LCS, provient essentiellement du fait que le prix du capteur est à minima inférieur à 10% du prix d'un capteur de référence utilisé par les stations traditionnelles [23]. De manière générale, un capteur doit répondre à plusieurs caractéristiques correspondant à sa qualité métrologique:



Figure 2.16: Principe de fonctionnement d'un capteur.

- Étendue de mesure : gamme de mesure du capteur (ex : de -10V à +20V son étendue est de 30V) ;
- Résolution : plus petite variation de la grandeur mesurée ;
- Sensibilité : variation du signal en sortie en fonction de l'entrée ;
- Exactitude : coïncidence avec la valeur dite "vraie" on la définit à travers l'erreur de mesure ;
- Justesse : erreur globale résultant d'un grand nombre de mesure ;
- Fidélité : capacité à donner des mesures sans erreurs accidentnelles ;
- Répétabilité : fidélité de mesure lorsque la même méthode est utilisée, dans les mêmes conditions, par le même opérateur en utilisant le même équipement pendant un court laps de temps ;
- Reproductibilité : fidélité de mesure lorsque la même méthode est utilisée, dans des conditions différentes, par différents opérateurs avec des équipements différents.



Figure 2.17: Illustration des critères fidélité, justesse et exactitude.

Ces caractéristiques sont utiles pour la comparaison qualitative des capteurs entre eux. D'autres caractéristiques s'ajoutent également tels que la fiabilité et la qualité qui vont être déterminant pour la disponibilité du capteur. La Figure 2.17 illustre les différences entre fidélité, justesse et exactitude. Les capteurs de mesure de la pollution sont ceux qui seront utilisés pour le déploiement de l'architecture. Ils se déclinent en deux types de capteurs: les capteurs de gaz et les capteurs de particules.

### 2.3.2 Les capteurs de particules

C'est un capteur optique (Optical Particle Counter) basé sur la diffraction d'une lumière Infrarouge. Un flux d'air forcé passe à travers le capteur grâce à un mini ventilateur. Les particules en passant devant la lumière va diffracter une partie du faisceau vers le détecteur photosensible. L'intensité de la diffraction est liée à la taille de la particule mais aussi à sa densité. Par un calcul, on en déduit la concentration en micro-gramme par mètres cubes ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

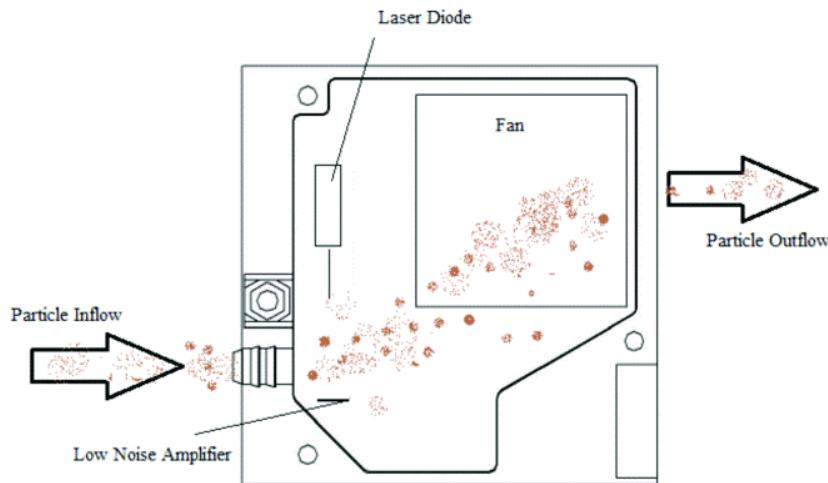


Figure 2.18: Fonctionnement du capteur de poussière SDS011 [24].

Un exemple type de capteur de poussière est le SDS011 (Figure 2.18) utilisant un laser pour mesurer la concentration. Ils peuvent détecter les PM10 et PM2.5. Cependant, ils sont sensibles aux conditions météorologiques (brouillard, vent fort). Ils peuvent être saturés lorsqu'ils sont placés trop près de sources de poussières (carrières, routes non goudronnées). Ils sont aussi sensibles à la condensation.

### 2.3.3 les capteurs de gaz

Il existe quatre technologies de capteurs de gaz, électrochimique, semi-conducteurs, à infrarouge et PID. Tous renvoient en valeur une concentration en ppm ou en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ils sont utilisés pour le suivi qualitatif de l'air, c'est-à-dire que la précision et les interférences entre gaz polluant importe peu puisque l'objectif est de mesurer la globalité. Les méthodes de mesures sont plus simples car ils utilisent des propriétés physiques et/ou des réactions chimiques.

#### Les capteurs électrochimiques

Le principe de fonctionnement se base sur une réaction électrochimique. Le gaz va transmettre des charges électriques à l'électrolyte solide, ce qui va induire une différence de potentiel ou un courant en fonction de la concentration. La Figure 2.19 détaille le fonctionnement d'un tel capteur.

Le principal problème de ces capteurs est que des gaz peuvent interférer dans la mesure. Ils ont tendance à dériver à long terme car l'électrolyte est consommé par la réaction d'oxydo-réduction. Le choix des matériaux du capteur peut amener à des détections de faibles concentrations mais augmente le coût.

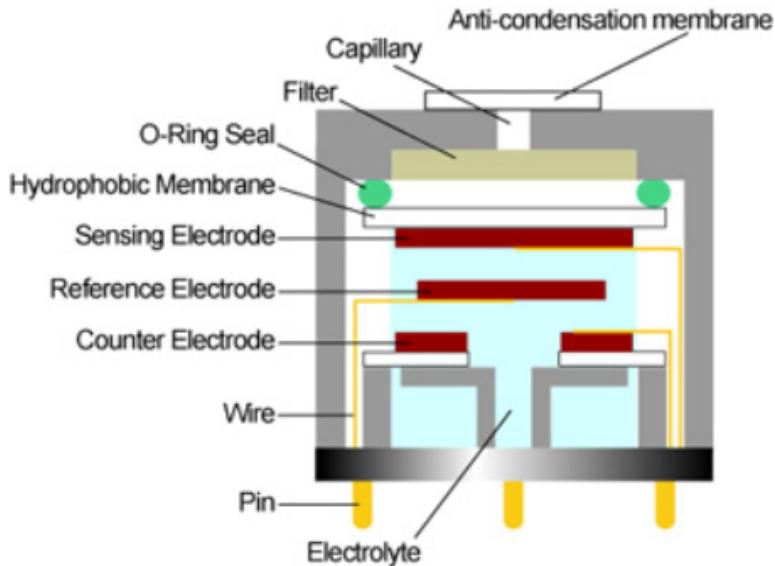


Figure 2.19: Fonctionnement capteur électrochimique [25].

### Les capteurs semi-conducteurs $MO_x$

Appelé aussi capteur métal oxyde, son fonctionnement est basé sur le changement de conductivité de cette couche sensible lors de l'exposition au gaz. La résistance de la couche d'oxyde sera mesurée et permet d'en déduire la concentration du gaz. Il est à noter qu'une résistance de chauffage est intégrée afin de cibler le gaz mesuré. Il doit donc être préchauffer pour effectuer la mesure. La Figure 2.20 présente le fonctionnement d'un tel capteur.

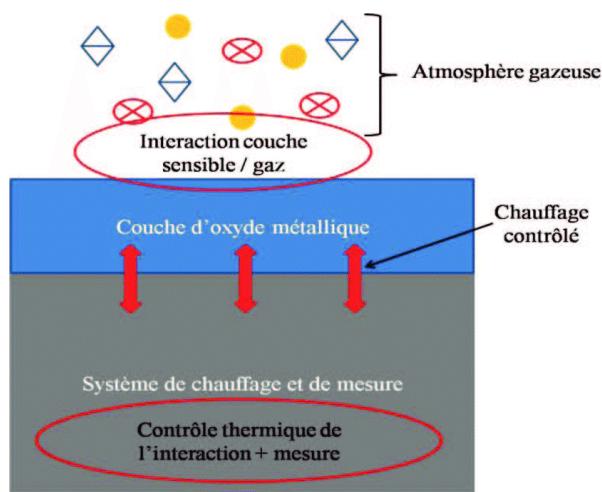


Figure 2.20: Principe de fonctionnement d'un capteur  $MO_x$ [26].

C'est un capteur très sensible mais peut être interféré avec d'autres gaz s'ils ne sont pas filtrés. Une résistance chauffante est nécessaire à son fonctionnement ce qui augmente sa consommation d'énergie. Il a tendance à accumuler le gaz mesuré ce qui entraîne une dérive dans le temps. Il est sensible à la température et à l'humidité.

## Les capteurs à infrarouge (Absorption IR, NDIR)

La détection de certains gaz s'appuie sur leur capacité à absorber certaines longueurs d'onde notamment dans le domaine de l'Infrarouge. Cette atténuation d'énergie du faisceau laser est mesurée et elle est proportionnelle à la concentration (Loi de Beer-Lambert). La Figure 2.21 illustre le fonctionnement à l'intérieur du boîtier.

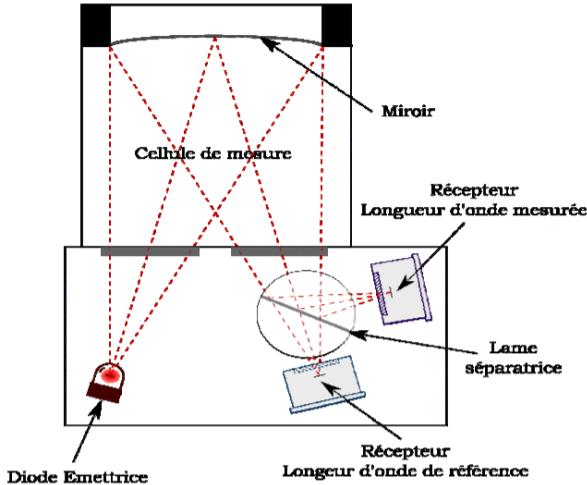


Figure 2.21: Principe de fonctionnement capteur IR [27].

Utilisé principalement pour le  $CO_2$  dans le cadre de la pollution pour sa précision. Cependant pour mesurer des concentrations d'hydrocarbure, il devient difficile de distinguer quels gaz sont mesurés (sélectivité). Peu sensible à la température et l'humidité.

## Les capteurs PID (Photo-ionisation)

Un flux d'air forcé amène l'air dans une chambre d'ionisation avec une lampe UV et de deux électrodes (Figure 2.22). Le but est de créer des ions à partir de l'intensité du rayonnement de la lampe UV. Un courant est créé et il est proportionnel à la concentration des molécules ionisées.

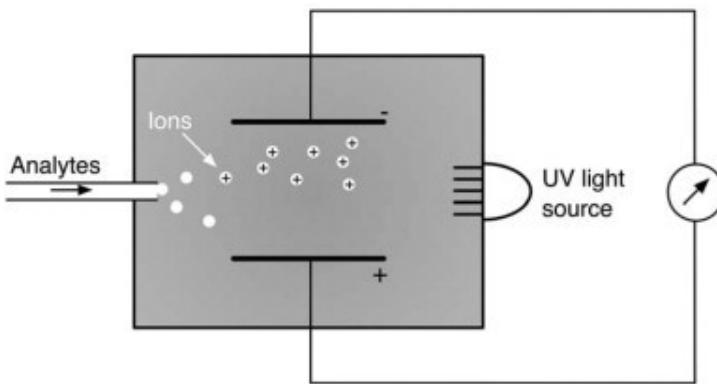


Figure 2.22: Principe de fonctionnement capteur PID [28].

La mesure par PID dépend de l'ionisation de certains gaz. Il est utilisé notamment pour les COV pour sa sensibilité. A cause du vieillissement de la lampe, il subit une dérive.

### 2.3.4 État de l'art de la surveillance avec des micro-capteurs

Actuellement, la plupart des mesures de la pollution proviennent de stations fixes situées dans des endroits particuliers tels que les aéroports, les zones militaires ou bien les universités. Le réseau de mesure est de temps en temps ponctué par des stations de mesures mobiles. Cependant, leur densité est très faible au regard du territoire à couvrir. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les capteurs à bas coût pour augmenter la densité de mesure spatio-temporelle. La question soulevée est de savoir si ces capteurs offrent une réelle opportunité pour la surveillance de la qualité de l'air.

#### Les études portant sur les micro-capteurs

Plusieurs articles scientifiques relatent le développement de stations de mesure de la qualité de l'air notamment le déploiement de capteurs à bas coût. La principale question est de savoir si ces derniers peuvent apporter une plus-value en regard des stations de mesures traditionnelles. Nous avons parcouru la littérature scientifique et sélectionné six études sur ces capteurs que nous avons synthétisés dans la table 2.3.4. Les critères de sélections sont basés sur des études traitant de leur déploiement sur le terrain afin de constater leur réel comportement et les solutions qui ont pu être apportées. Ces études concentrent les avantages de l'utilisation des micro-capteurs sur les points suivants:

- Déploiement aisé;
- Possibilité de mesure temps réel, précision temporelle;
- Idéal pour niveaux de concentration et calcul indice QA;
- Adaptés pour la surveillance de pics de pollution;
- Densité de mesure dans le temps et l'espace excellente;
- Maintenance faible ;
- Faible coût (rapport x10 à x100).

Les principaux inconvénients trouvés sont:

- Incertitudes et de répétabilité;
- Qualité variable d'un capteur à l'autre;
- Reproductibilité des mesures (mesures différentes dans le même environnement);
- Interférences avec d'autres gaz (la concentration mesurée ne sera pas uniquement celle du gaz attendu);
- Dérive dans le temps de certains capteur (due à leur usure);
- Précision ne permettant pas d'égaler celle des stations de mesure traditionnelles;

La qualité métrologique des LCS est discutable mais des solutions sont disponibles pour les contourner et offrir une réelle alternative. La Table 2.3.4 présente une sélection des études les plus pertinentes pour améliorer les performances des réseaux de LCS.

Réf	Titre article	Contributions
[29]	Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research	Les LCS sur étagère varient en qualité et les interférences croisées à faibles concentrations posent problème, tout comme leur mauvaise reproductibilité. Les méthodes statistiques et les capteurs en grappe offrent des solutions potentielles pour résoudre ces problèmes.
[30]	Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates ?	Obtenir des capteurs robustes et reproductibles est un défi. Il est nécessaire de les évaluer sur le terrain dans différentes conditions environnementales. Les capteurs peu coûteux ne conviennent pas aux applications nécessitant une grande précision. Cependant, ils peuvent fournir des informations générales sur la qualité de l'air.
[31]	Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment : How far have they gone ?	Examen approfondi des technologies de détection à faible coût pour la surveillance de la qualité de l'air. Les LCS conviennent à des applications spécifiques, mais des travaux supplémentaires sont nécessaires pour exploiter leur plein potentiel. Les capteurs de PM 0,1 à bas coût ne sont pas encore disponibles, et il n'y a aucune corrélation entre les particules PM 0,1 et les PM 2,5.
[32]	An improved low-power measurement of ambient NO <sub>2</sub> and O <sub>3</sub> combining electrochemical sensor clusters and machine learning.	En regroupant des capteurs et en traitant les données avec le Machine Learning (ML), il est possible de se rapprocher des performances du RMSE des instruments de référence (sur la période d'étude). Plus la période de collecte des données est longue, plus ces algorithmes prédisent avec une précision proche des observations de référence.
[33]	The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, highdensity networks.	Cet article démontre la faisabilité de réseaux de LCS de type electrochimique avec des regroupements et évolutifs avec des post-traitements pour diverses périodes allant jusqu'à 2,5 mois et à bas coût. Les données ont une densité de mesure (dans le temps et dans l'espace) impossible à atteindre avec les méthodes de mesure standard actuelles.
[34]	Development of a normalized multisensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection.	Des techniques d'étalonnage et de normalisation ont été développées pour corriger les écarts de référence et de sensibilité, garantissant ainsi une réponse homogène des capteurs. Cette approche permet d'informer le public en temps réel et avec une grande précision spatiale sur la pollution en combinant les prévisions et les indices de pollution.

Table 2.3: Une sélection d'études portant sur les micro-capteurs.

## Les solutions de la littérature

Ces études mettent en lumière des solutions de post et prétraitement pour compenser les faiblesses de ces capteurs à bas coûts. Les solutions vont de l'emplacement des capteurs aux solutions par des algorithmes. Incertitudes et de répétabilité:

- Regrouper les capteurs et traiter les données avec le Machine Learning (ML). La période de collecte de données doit être longue pour ces algorithmes prédisent avec précision les observations ;
- Utiliser de manière adéquate les capteurs électrochimiques pour fournir une sensibilité élevée avec un bruit faible ;
- Mise au point de techniques d'étalonnage et de normalisation pour corriger les écarts de référence et de sensibilité afin d'assurer une homogénéité dans la réponse des capteurs.

Fiabilité des capteurs:

- Une évaluation des performances sur le terrain dans diverses conditions environnementales est nécessaire ;
- L'utilisation du ML espacerait le temps requis pour les calibrations physiques et fiabilise les données une fois le capteur calibré dans son environnement ;
- Le regroupement de capteurs combiné à un post-traitement améliore considérablement les résultats mais aussi leur disponibilité.

Reproductibilité des mesures :

- Les capteurs en grappe peuvent améliorer considérablement la reproductibilité.

Interférences avec d'autres gaz :

- Les méthodes statistiques offrent des perspectives considérables pour supprimer les interférences, si elles sont sauvegardées par le laboratoire.

Ces capteurs à bas coût sont des opportunités pour surveiller la qualité de l'air cependant ils ne peuvent remplacer les stations de mesure traditionnelles. Ils sont actuellement utilisés pour des applications de surveillance de sites industriels ou pour affiner le maillage dans certains endroits non couverts par les stations de mesure.

## Les applications déployées

Les applications de surveillance de la qualité de l'air se multiplient. Nous avons déjà recensé quatre initiatives avec les AASQAs (Cf. section 4.6.4 Les réseaux de capteurs à bas coût) mais leur portée à la récolte d'information. Nous avons sélectionné parmi plusieurs articles, quatre développements présentant des idées allant plus loin que le simple monitoring de l'air que nous présentons dans la table 2. Les contributions utilisent et valident l'utilisation de capteurs à bas coût, chacune d'entre elles présente un prisme d'amélioration de tels systèmes : • alerter la population des zones polluées ; • prendre les mesures en temps réel et les afficher sur une carte ; • l'utilisation du modèle météo pour prévoir les mouvements de pollution ; • utiliser l'intelligence artificielle à partir des données pour quantifier l'incertitude des capteurs et fiabiliser les mesures.

Réf	Titre article	Contributions
[35]	Distributed System as Internet of Things for a New Low-Cost, Air Pollution Wireless Monitoring on Real Time	Capteurs sans fil base Arduino Données envoyées sur les BdD du (WHO) Utilisé uniquement pour surveiller
[36]	IOT-Based Air Pollution Monitoring and Forecasting System	Déploiement d'un réseau de capteurs qui relèvent des données en temps réel. Effectue des prédictions de mouvement de la pollution et l'analyse de l'environnement. Utilisé lors des accidents de pollution industrielle
[31]	Air Pollution Monitoring System Using Zigbee and GPS Module	Réseau de capteurs utilisant la technologie Zigbee et un module GPS. Affichage des mesures sur une carte de Google Map en temps réel pour une surveillance géographique. Des alertes peuvent être utilisée suivant le niveau de pollution
[32]	Wireless sensor network based pollution monitoring system in metropolitan cities	Réseau de capteurs avec différentes technologies de communication. Les données sont utilisées pour du Data Mining, La pollution est calculée à base de probabilités. Il prédit la pollution et son mouvement. Des alertes d'évacuation ou de confinement sont utilisées.

Table 2.4: Sélection d'études portant sur des application de déploiement de LCS pour la surveillance de la qualité de l'air.

### 2.3.5 conclusion

Les capteurs à bas coûts ou micro-capteurs sont de plus en plus utilisés. De l'initiative citoyenne à la surveillance de sites industriels ou sensibles, ils suscitent un véritable engouement. L'avantage de cette technologie est qu'elle est portative et peut être miniaturisée jusqu'à aller dans une poche. Ils séduisent par leur simplicité d'utilisation. Cependant ils sont complémentaires aux stations de mesure de référence c'est pourquoi ils doivent être utilisés dans des cadres précis tels que la surveillance de pics de pollution, des mouvements exceptionnels de pollution atmosphérique, lancement d'alerte suivants des seuils établis, améliorer une cartographie de pollution modélisée avec un maillage plus fin et enfin faire du diagnostic en cas de sinistre par exemple. La qualité de ces capteurs s'améliore d'années en années mais ils sont sensibles aux interférences (température, humidité, autres gaz...). Ils ont besoin d'être couplés avec un appareil de référence sur la zone d'étude. On peut remarquer également que la plupart des déploiements de micro-capteur n'ont pas de réelle stratégie de positionnement, ni de stratégie sur la perception des défaillances. La stratégie est également basée sur la duplication d'un même système pour des raisons évidentes de conception et de coûts.

## 2.4 État de l'art acquisitions, traitements et fiabilisation des données

D'une manière plus générale, le but des stations de mesure conventionnelle consiste à alimenter un modèle afin de pouvoir faire des préditions. cette section est dédié à la fiabilisation des points de mesures. Actuellement les stations de mesure conventionnelle sont des références scientifique et sont exploitées par des personnes qualifiées. Le principal problème de l'utilisation des ces stations consiste en leur coût d'exploitation et de maintenance. En conséquence, il y a peu de points de mesures et des territoires de plusieurs km<sup>2</sup> ne sont pas couvert par les station et un modèle va extrapoler les mesures des stations de mesure pour faire des estimations de pollution en fonction des mouvement dynamiques de l'atmosphère.

### 2.4.1 Acquisition des données afin d'alimenter un modèle pour faire des prédictions: l'exemple de la météorologie

Les prévisions météorologiques reposent sur l'analyse et la modélisation de données obtenues à partir de diverses sources (stations de surface, ballons-sondes, radars et satellites). Une première lecture acquisition permet aux prévisionnistes d'évaluer l'état atmosphérique actuel et déterminer les tendances des grands mouvements de l'atmosphère. L'analyse des données permet de déterminer les tendances météorologiques à court terme.

Les modèles numériques de prévision simulent le comportement de l'atmosphère et sont également utilisés pour faire des prédictions. L'assimilation des données dans ces modèles est une étape importante. Elle consiste à utiliser des données réelles pour ajuster les équations du modèles par la comparaison des données d'observation aux prévisions du modèle pour le même temps. Les différences sont calculées et un lissage est effectué pour obtenir une solution plus précise. Une méthode courante pour cette analyse est l'analyse variationnelle à trois dimensions ou 3D-VAR. Une autre méthode est l'analyse variationnelle à quatre dimensions ou 4D-VAR, qui consiste à ajuster les observations à une simulation numérique et à refaire l'analyse à partir de l'heure initiale.

Les prévisions d'ensemble, utilisées par les différents services météorologiques nationaux d'importance tels que le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (CEPMMT), le centre national américain de prévision environnementale (NCEP), le Centre météorologique canadien (CMC) et Météo-France, combinent plusieurs modèles avec des analyses légèrement différentes pour obtenir la solution la plus probable. Les prévisionnistes comparent leurs estimations et les sorties de ces modèles pour juger de leur validité et les corriger au besoin. Il en est de même pour le modèle AROME pour la prévision des mouvements de pollution. Ces différents modèles ont ainsi besoin en entrée des données d'acquisition les plus fiables et robustes possible. Le Prognostics and Health Management (PHM) est une discipline d'origine industrielle qui vise à améliorer les acquisitions de la santé du système.

### 2.4.2 Le Prognostics and Health Management (PHM) dans l'industrie

Les industriels tendent à renforcer leur capacité à anticiper les défaillances afin de recourir à des actions préventives les plus juste possible dans un objectif de réduction des coûts et des risques. Aussi, la mise en œuvre de solutions de Prognostics and Health Management

(PHM) prend une part grandissante dans les activités de maintenance et le processus de pronostic est aujourd’hui considéré comme un des principaux leviers d’action dans la recherche d’une performance globale. [37]

Le PHM est une discipline qui vise à fiabiliser un système, améliorer sa disponibilité, sa sécurité, mais aussi de réduire les coûts d’entretiens. Son implémentation au sein d’un système industriel se fait au travers de sept étapes illustrées dans la figure 2.23 :

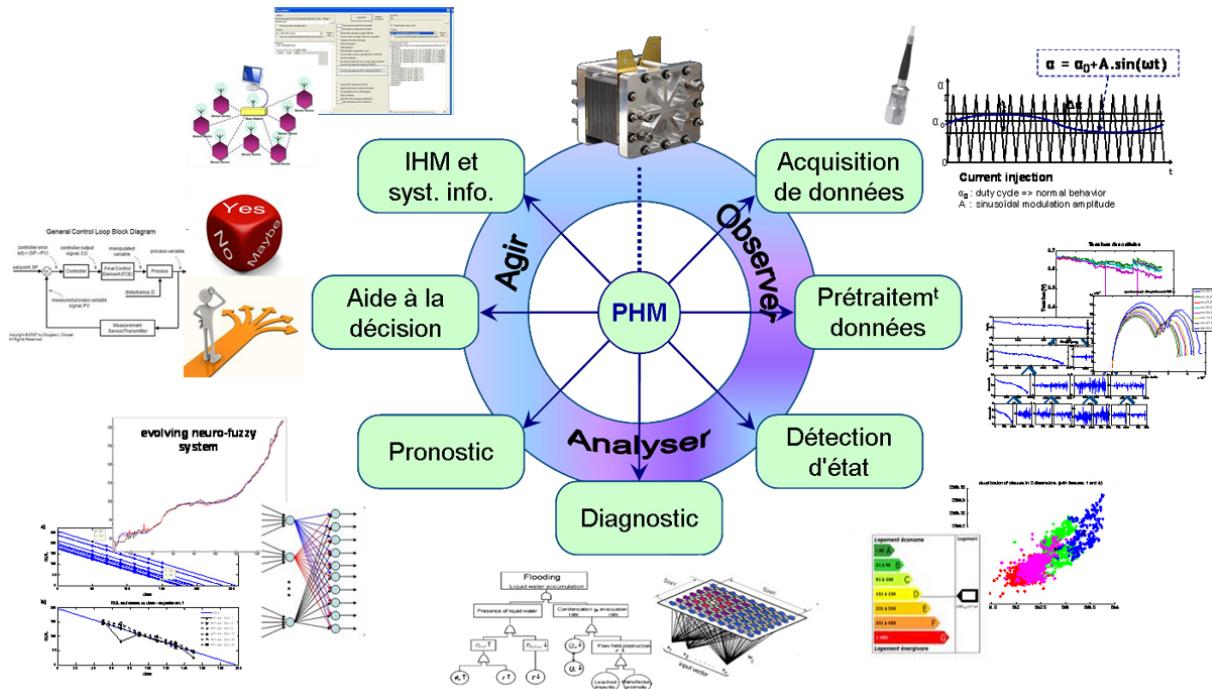


Figure 2.23: Étapes d’implémentation du PHM [37].

### • Acquisition des données

La mise en place des capteurs ne doit pas influencer le système physique, ni modifier son comportement. L’acquisition des données est l’étape la plus importante du PHM.

### • Post-traitement des données

Il permet de nettoyer le signal des bruits permet d’exploiter les données brutes sans erreurs.

### • Détection

C’est la différence entre le comportement attendu et le comportement actuel permet de lever une détection à partir d’analyse par consistance.

### • Diagnostic

La levée de la détection et la dégradation de l’état du système observé pouvant amener à une défaillance, (perte d’une fonction du système) est traduite par un diagnostic qui identifie le ou les composants en défaut.

- **Pronostic**

Ce processus prévoit le temps de vie restant du composant en défaut (survie).

- **Injonction de décision**

Les analyses postérieures vont amener à proposer plusieurs alternatives possibles en fonction du résultat attendu.

- **Interface**

Les décisions sont présentées à l'interface, deux cas se présentent :

- l'homme reçoit la décision et va agir sur le système (ex : maintenance) dans le cas où l'action est physiquement possible par l'homme.

- dans le cas contraire l'interface utilisera un actionneur qui agira sur le système physique.

Le PHM est une discipline proche de la surveillance de l'environnement mais au niveau principalement industriel: il observe un système physique , traite les données (détection, diagnostic et pronostic), présente des décisions et a une interface pour interagir avec un humain. C'est grâce à l'utilisation du PHM qu'il est possible d'obtenir des meilleure acquisition des données et également de fournir toute une chaîne d'acquisition afin d'évaluer la santé du système et également prédire son état de santé futur

#### **2.4.3 Acquisition des observations: augmenter le maillage**

Les AASQA fournissent trois outils tels que l'inventaire régional des émissions, la modélisation et les stations de mesure. Les stations de mesures sont la base de toutes les décisions et des modélisations, elles doivent suivre des réglementations et des normes. Cependant leur précision et leur valeur scientifique se fait au détriment de leur mobilité et de leur coût d'installation et de fonctionnement élevé. Les territoires tels que celui de la CCPVG n'ont pas de station de mesure, en conséquence, les élus peuvent difficilement se fier aux trois outils proposés par les AASQA car ce sont des résultats issus des extrapolations des stations de mesure les plus proches. Ces solutions ne sont pas satisfaisantes, notamment lorsque la topologie du territoire est complexe. Par conséquent, les phénomènes de pollution locaux ne sont pas couverts par le réseau de surveillance de la qualité de l'air et sont difficilement pris en compte dans les modèles de dispersion ou par les techniques d'assimilation de données [38]. En d'autres termes, il n'y a pas suffisamment de points de mesure pour estimer correctement l'état de la pollution sur une grande zone présentant une topologie variable. Ainsi, pour augmenter le nombre de points d'observations, deux choix s'appliquent :

- Le déploiement de stations mobiles des AASQA
- La création de son propre réseau de mesure

Le premier choix est une solution ponctuelle et ne permet pas le suivi des actions entreprises sur le territoire à long terme. Pour disposer d'un réseau de mesure sur le long terme avec un budget limité et sans avoir à installer des capteurs coûteux et exigeants, une solution alternative et complémentaire existe et consiste en la mise en réseau de capteurs bas coût (LCS). Favorisés par l'émergence de l'Internet des objets (IoT), les LCS sont

faciles à mettre en place et moins coûteux. En effet, il existe un réel engouement pour cette solution, notamment dans le cadre d'initiatives citoyennes [22, 30] où chaque citoyen peut posséder une station stations de mesures conventionnelles (CSt) d'Atmo Occitanie . Néanmoins, en raison de leur polyvalence et de leur abordabilité, il devient possible d'avoir une grille de mesure plus fine et, par conséquent, une meilleure précision spatiale. Ces deux solutions peuvent coexister : les réseaux de LCS apportent davantage de données (avec moins de précision) et les CSt fournissent des données de référence (avec une meilleure fiabilité) pouvant aider à l'étalonnage de l'ensemble de l'architecture. Les réseaux de LCS représentent une véritable opportunité et plusieurs améliorations ont été publiées dans la littérature scientifique [39], [31]. Pour couvrir de vastes zones géographiques, des architectures déployées basées sur la mise en réseau de LCS sont utilisées. Elles permettent par la multiplication des points de mesure de couvrir un territoire complet. Par exemple, une architecture distribuée, à plusieurs niveaux basée sur un réseau wifi (Technologie ZigBee) avec une application web et des LCS a été mise en place sur plusieurs sites en Équateur pendant 4 mois [35]. Cette preuve de concept de surveillance en temps réel démontre la possibilité de développer une plateforme de surveillance de la qualité de l'air pour comparer et vérifier la conformité avec les normes de l'OMS. Une autre étude va plus loin en proposant une prédition sur 24 heures en ajoutant un module de mémoire à court terme (LSTM) pour effectuer une analyse et une prédition sur les données mesurées [40]. Ces études fournissent des solutions pour la surveillance en temps réel de vastes zones (d'un campus à trois villes) avec des investissements modestes. Elles se concentrent notamment sur le post-traitement des données des LCS et permettent de compenser leurs inconvénients. Pour aller plus loin, les applications des LCS pour la surveillance de la qualité de l'air sont utilisées à des fins spécifiques (surveillance, ajustement fin du maillage en complément des stations conventionnelles, détection de la pollution, etc.) et sont suffisamment adaptées pour cartographier les gradients de concentration [31]. Des voies supplémentaires sont envisagées pour augmenter le potentiel de cette technologie, notamment l'utilisation de l'apprentissage automatique et/ou des techniques avancées de traitement des données pour compléter les données des stations de mesure conventionnelles [34].

La littérature scientifique montre qu'il est tout à fait possible de surveiller un territoire avec des LCS mis en réseau. Cependant, une critique qui peut être formulée à l'égard de ces travaux concerne leur durée. Ils sont axés sur des périodes courtes (d'un mois à quelques mois). Un déploiement sur le toit d'un laboratoire pendant 11 mois [41] est l'étude la plus longue actuellement enregistrée et se rapproche le plus de l'objectif de continuité des mesures définie dans l'introduction de cette thèse. De plus, les déploiements des LCS utilisent un seul dispositif par point à surveiller, ce qui est insuffisant pour évaluer la fiabilité des mesures. En effet, les LCS présentent plusieurs problèmes de fiabilités traités dans la sous-section suivante. Ainsi, la fiabilité des mesures en un point d'échantillonnage constitue le point de départ de la surveillance de la qualité de l'air.

#### **2.4.4 La fiabilisation des données en un point d'observation**

Les LCS représentent un défi en termes de robustesse et de reproductibilité des mesures. Ils fournissent des mesures approximatives et, pour améliorer leurs performances, il est nécessaire de les étalonner sur le terrain [30]. En effet, dans des environnements contrôlés, il n'est pas possible de détecter les interférences croisées des LCS mesurant les concentrations de gaz. En réalité, ils mesurent plusieurs gaz simultanément et leurs résultats corre-

spondent à l'addition des concentrations de tous les gaz réagissant avec le capteur [29]. Ces incertitudes sont d'autant plus grandes lorsque les concentrations sont faibles, c'est-à-dire lorsque les capteurs sont situés en extérieur. Pour corriger cet inconvénient, les auteurs de ces deux articles proposent de les regrouper en clusters et d'utiliser des méthodes statistiques pour augmenter leur fiabilité. Ils soulignent l'importance de l'étalonnage des LCS sur leur site de déploiement et comment augmenter leurs performances en les observant sur une période plus longue. Pour améliorer leur durée de vie et la fiabilité des mesures, des études sur le terrain révèlent que plus le déploiement est long, plus les étalonnages sont importants. Ainsi, la périodicité des étalonnages sur le terrain peut être retardée par le regroupement [33] ou en utilisant l'apprentissage automatique (ML) en post-traitement pour compenser les dérives des capteurs [32]. En fait, ils combinent les deux techniques (étalonnage et post-traitement) sur une longue période d'apprentissage pour augmenter la qualité des données et la précision des mesures. Une première piste confirme l'utilisation des techniques précédentes (regroupement et ML) sur 2,5 mois. En ce qui concerne la fiabilité, une autre étude utilise une double redondance sur les LCS [42]. Les auteurs ont validé leur prototype en comparant leurs résultats à un autre dispositif commercial (5% de différence) en utilisant des LCS pendant cinq jours. Cependant, la double redondance n'est pas suffisante pour assurer la continuité du service. En effet, en cas de défaillance, il n'y a pas de correction d'erreur et la détection du composant défectueux ne peut pas être effectuée automatiquement. Ces travaux réduisent les inconvénients des LCS en termes de performances et de fiabilité de l'équipement à court terme.

En raison de l'objectif de continuité des mesures, il est important d'augmenter la disponibilité du point de mesure, a savoir d'une station de mesure composée de LCS. Afin de répondre, à la clustérisation des LCS, la fiabilisation des observation des LCS par la mise en parallèle des LCS afin de palier aux problème de répétabilité, il est intéressant de suivre la piste de la redondance modulaire triple.

#### 2.4.5 La triple redondance modulaire et les algorithmes de vote

Pour répondre aux objectifs de surveillance de la qualité de l'air (continuité du service et fiabilité des mesures), chacune des études précédentes apporte un élément de réponse mais est individuellement insuffisante pour combler les lacunes des LCS. Par conséquent, l'architecture proposée surmonte les lacunes suivantes : la fiabilité des mesures, la continuité du service et l'horizon de mesure. De plus, elle va plus loin en regroupant les LCS en clusters, inspirée de l'utilisation de la redondance modulaire triple active (TMR) pour rendre le système tolérant aux pannes, et en mettant en place une plateforme de surveillance inspirée des déploiements précédents. La TMR augmente les coûts matériels, mais ceux-ci sont maîtrisés grâce à l'utilisation des LCS et à leur intégration dans la conception. L'architecture basée sur les LCS permet de contrôler les coûts et multiplie ainsi le nombre de points d'échantillonnage. De plus, elle présente les caractéristiques suivantes : redondante, tolérante aux pannes, incrémentale et avec un horizon de surveillance évolutif. Sa résilience permet de collecter des données complètes et fiables pour des tâches de traitement ultérieur et de prise de décision.

L'architecture de la station de mesure s'inspire de la redondance modulaire triple (TMR) qui est largement utilisée dans l'industrie pour assurer une disponibilité élevée et une fiabilité des applications critiques. Le principe repose sur trois modules identiques et indépendants fonctionnant en parallèle et ayant les mêmes entrées. La sortie de ces modules est soumise à une unité de vote pour créer une sortie et générer une synthèse.

Les agrégations effectuées par l'unité de vote sont généralement le vote à la majorité, le vote médian et le vote pondéré moyen [43].

Les algorithmes de vote à la majorité rendent le système tolérant aux pannes en sélectionnant la sortie correspondant à la majorité des sorties des modules. Sinon, la sortie est un code de sécurité pour arrêter le système en toute sécurité. Les derniers développements de l'algorithme de vote à la majorité utilisent les données historiques pour optimiser le choix et rendre ainsi le système plus fiable. Cependant, ce type d'algorithme de vote à la majorité présente deux inconvénients majeurs. Le premier inconvénient est que lorsque les sorties des modules ne sont pas proches (ce qui est le cas pour les LCS), un seuil doit être défini afin de regrouper les valeurs proches de sorte que l'algorithme les considère identiques et, lorsque la majorité n'est pas atteinte, le système est arrêté. Le deuxième inconvénient vient du fait que les défaillances sont masquées. En effet, la sortie correspond à la valeur la plus fréquente, mais les valeurs rejetées ne sont pas exploitées.

Les algorithmes de vote pondéré moyen effectuent la moyenne des sorties des modules avec des poids attribués à chaque sortie. Ces poids sont calculés à partir de leurs écarts respectifs. Plus l'écart est grand, plus le poids est petit. De nouveaux algorithmes sont proposés [44] et sont plus fiables selon leurs auteurs que le vote à la majorité en présence d'erreurs. Leur principal avantage est de fournir une sortie quel que soit le nombre de modules présents (contrairement aux algorithmes de vote). Cependant, lorsque les erreurs sont importantes, le nombre de sorties incorrectes de l'algorithme augmente. Cette observation provient de l'utilisation de la moyenne. En effet, la moyenne est influencée par les extrêmes, et plus il y a de valeurs aberrantes dans les entrées, plus la moyenne sera influencée [45]. De plus, les performances de ces algorithmes dépendent du choix des poids.

Les algorithmes de vote médian sont plus efficaces que ceux basés sur la moyenne pondérée. En effet, l'utilisation de la médiane permet de se débarrasser de l'influence des valeurs aberrantes. Cependant, la fiabilité d'un tel algorithme est diminuée lorsque la majorité des valeurs sont des valeurs aberrantes [46].

Chaque type d'algorithme de vote fonctionne bien lorsque les erreurs d'entrée représentent une minorité de la sortie totale. Ils sont optimisés pour fournir une sortie avec le moins d'erreurs possible. La combinaison d'algorithmes et l'utilisation de la classification pour trouver la meilleure sortie augmentent la fiabilité, mais également la complexité de calcul et le temps de traitement [47]. Cependant, pour le traitement en temps réel, le temps de calcul doit être pris en compte. Quoi qu'il en soit, quelle que soit la combinaison d'algorithmes, ils conservent leurs faiblesses et restent influencés par les erreurs des entrées. Enfin, le point commun de ces algorithmes est le masquage des erreurs. C'est pourquoi, afin d'augmenter les performances des algorithmes, une étape de détection des erreurs basée sur les données est proposée et mise en œuvre en amont de l'agrégation dans l'unité de vote. En effet, selon les auteurs de cette étude [48], cette configuration permet de rendre un système TMR plus fiable.

A partir d'un configuration en TMR, les détections de défaillances peuvent être détectée grâce à des algorithmes spécialisés.

#### **2.4.6 Les algorithmes de détection des défaillances (santé du système)**

Dans les méthodes de détections des défauts, le domaine le plus proche de l'application abordée dans cette thèse est celui des réseaux de capteurs sans fil (WSN). Il existe

différentes techniques de détection de défauts et une comparaison qualitative des derniers algorithmes de détection de défauts pour le déploiement de WSN est répertoriée dans cette référence [49]. Parmi toutes les techniques possibles, le choix est motivé par un diagnostic distribué d'auto-détection des nœuds capteurs, qui sont les SmS dans cet article. Pour un déploiement à grande échelle, chaque station de mesure doit identifier ses défauts afin de ne pas augmenter la complexité informatique au niveau du réseau global. Ainsi, dans [50], un algorithme est proposé utilisant l'écart-type médian normalisé pour détecter et éliminer les valeurs aberrantes. Composé de deux phases, la première phase de l'algorithme vise à collecter les mesures pendant une durée d'estimation et à les associer à l'identification des SmS. La deuxième phase élimine les valeurs aberrantes à l'aide d'une méthode statistique utilisant l'écart absolu médian normalisé (MADN). Cependant, bien que la première phase soit inspirante pour l'étape de détection, le calcul du MADN suppose que la distribution des mesures est normale, ce qui n'est pas le cas des mesures liées aux phénomènes naturels.

## 2.5 État de l'art des architectures à triple redondance sur la qualité de l'air

il manque, de mon point de vue, une section sur la synthèse des travaux ayant proposé des architectures comme la tienne.

### 2.5.1 Les incertitudes de mesures

Petit biblio sur les écart relatif et les incertitudes de mesures

## 2.6 Les algorithmes prédictifs pour la qualité de l'air

mesure du territoire = meteo (data assimilation ) plus on a de point plus le modèle est simple car pas assez de puissance mesure des paramètres physiques et normes description de l'architecture et la focalisation sur des points application à la CCPVG perspectives =  
1) point into curves prédiction de la QA 2) nd de point illimité déploiement sur un large territoire avec décomposition hiérarchique

## Nomenclature

$PM_{10}$	particules de 10 micromètres
$T$	température
$H$	humidité
$Pe$	pression
$P$	nombre de zones d'intérêt, $P \in \mathbb{N}$
$Z_j$	zone d'intérêt numéro $j$ , $j \in \{1, \dots, P\}, j \in \mathbb{N}$
$N$	nombre de paramètres physiques surveillés, $N \in \mathbb{N}$
$\varphi_i$	paramètre physique numéro $i$ , $i \in \{1, \dots, N\}, i \in \mathbb{N}$
$Q$	nombre de station dans $Z_j$ , $Q \in \mathbb{N}$
$S_k$	station numéro $k$ , $k \in \{1, \dots, Q\}, k \in \mathbb{N}$
$R$	nombre de SmS dans $S_k$ , $R \in \mathbb{N}$
$x$	SmS numéro $x$ avec $x \in \{1, \dots, R\}, x \in \mathbb{N}$
$Te_x$	période d'échantillonnage du SmS n° $x$
$\tau$	période d'échantillonnage de la station tel quel $\tau > 2Te_x$
$\tau$	taille de la fenêtre d'observation
$k$	$k^{eme}$ période d'échantillonnage avec $t = k * Te_x$
$M_x$	nombre d'observations du SmS $x$
$Y_x$	matrice temporelle d'observations du SmS $x$ , $(M_x * N)$
$y_x^{\varphi_i}(k)$	paramètre $\varphi_i$ observé par le SmS n° $x$ at time $k$
$y_{x,k}$	observations du SmS $x$ à l'instant $k$
$q_x$	nombre d'observations du SmS $x$ pendant $\tau$
$y_{x,k}^\tau$	sous-matrice $Y_x$ de taille $(q_x * N)$ à l'instant $k$ pendant $\tau$
$\varphi_{i,x}^\tau$	colonne de $y_{x,k}^\tau$ contenant les observations de $\varphi_i$
$\varphi_{i,S}^\tau$	concaténation de $\varphi_{i,x}^\tau$ de tous les SmS
$S_{s,k}^\tau$	synthèse des observations des SmS entre $t$ et $t + \tau$
$D_{s,k}^\tau$	matrice de détection entre $t$ et $t + \tau$
$R\varepsilon_i$	erreur relative autorisée pour le LCS observant $\varphi_i$
$R\varepsilon_S$	vecteur d'erreurs relatives autorisées (PREV)
$ThM_i$	seuil maximum pour l'observation de $\varphi_i$
$Thm_i$	seuil minimum pour l'observation de $\varphi_i$
$Th_{s,k}^\tau$	matrice de seuils
$R_{i,x}^\tau$	vecteur Reliable du SmS $x$ pour $\varphi_i$
$O_{i,x}^\tau$	vecteur Outlier du SmS $x$ pour $\varphi_i$
$R_{i,S}^\tau$	concaténation de tous les $R_{i,x}^\tau$
$O_{i,S}^\tau$	concaténation de tous les $O_{i,x}^\tau$
$I_{s,k}^\tau$	matrice d'indicateurs
$Id_{i,x}^\tau$	indice de défaillance du SmS $x$ pour $\varphi_i$
$Ih_{i,x}^\tau$	indice de santé du SmS $x$ pour $\varphi_i$
$Ict_{i,S}^\tau$	indice de confiance pour $\varphi_i$ au niveau de la station
$P_c$	ratio de confiance permis
$\mathcal{H}$	fonction échelon de Heaviside
$S_{s,k}^\tau$	synthèse de toutes les observations pendant $\tau$
$Y_{S_k}$	matrice temporelle d'observations de la station $S_k$
$S.I.D.$	Matrices Synthèse, Indices et Détection en sortie de l'aggrégateur

## **A**nnexes A

## **A**nnexes

# Bibliography

- [1] Robert Delmas and Gérard Mégie. *Physique et chimie de l'atmosphère: 2e édition.* fr. Google-Books-ID: 6ROWDgAAQBAJ. Humensis, July 2015. ISBN: 978-2-7011-8555-2.
- [2] C. Elichegaray et al. “État et évolution de la pollution atmosphérique”. en. In: *Revue des Maladies Respiratoires* 26.2 (Feb. 2009), pp. 191–206. ISSN: 0761-8425. DOI: 10.1016/S0761-8425(09)71596-7. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0761842509715967> (visited on 02/03/2021).
- [3] ACNUSA. *Pollution aéroport — Pollution atmosphérique et qualité de l'air aéroport.* fr. 2021. URL: <https://www.acnusa.fr/fr/la-pollution-de-lair/definitions/16> (visited on 02/10/2021).
- [4] B. Sportisse. “Atmospheric pollution. From processes to modelling; Pollution atmosphérique. Des processus a la modelisation”. French. In: (July 2008). URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21048157> (visited on 02/05/2021).
- [5] National Research Council. *The Atmospheric Sciences: Entering the Twenty-First Century.* en. Dec. 1969. ISBN: 978-0-309-06415-6. DOI: 10.17226/6021. URL: <https://www.nap.edu/catalog/6021/the-atmospheric-sciences-entering-the-twenty-first-century> (visited on 02/05/2021).
- [6] Marie Camredon and Aumont Bernard. “I – L'ozone troposphérique : production/consommation et régimes chimiques”. In: *Pollution atmosphérique* (Jan. 2007). DOI: 10.4267/pollution-atmospherique.1404.
- [7] Roland B. Stull. “Mean Boundary Layer Characteristics”. en. In: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Ed. by Roland B. Stull. Atmospheric Sciences Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988, pp. 1–27. ISBN: 978-94-009-3027-8. DOI: 10.1007/978-94-009-3027-8\_1. URL: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8_1) (visited on 02/08/2021).
- [8] Jean-Jacques Thillet. *La météo de montagne - Jean-Jacques Thillet.* fr. guides du club alpin français. EAN 9782020205788. Seuil, Jan. 1997. ISBN: 2-02-020578-5. URL: <https://www.decitre.fr/livres/la-meteo-de-montagne-9782020205788.html> (visited on 02/10/2021).
- [9] Hanna Yang et al. *Air pollution and NCDs.* English. Apr. 2019. URL: [https://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/397787/Air-Pollution-and-NCDs.pdf](https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/397787/Air-Pollution-and-NCDs.pdf) (visited on 10/01/2021).
- [10] WHO. *Ambient (outdoor) air pollution.* en. organisation. July 2021. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (visited on 10/01/2021).

- [11] World Health Organization and Occupational and Environmental Health Team. *New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution.* en. 2021. URL: <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> (visited on 05/18/2022).
- [12] World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team. *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : global update 2005 : summary of risk assessment.* ar. Tech. rep. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02 number-of-pages: 20. World Health Organization, 2006. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69477> (visited on 05/18/2022).
- [13] IQAir. *Live Animated Air Quality Map (AQI, PM2.5...)* — IQAir. en. URL: <https://www.iqair.com/air-quality-map> (visited on 05/18/2022).
- [14] Tatiana Macé, Eva Léoz, and François Mathé. *Garantir la qualité des mesures en air ambiant de polluants atmosphériques réglementés : le modèle français.* fr. text. Publisher: Association pour la prévention de la pollution atmosphérique. Apr. 2013. URL: <http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=991> (visited on 01/15/2021).
- [15] *Loi de transition énergétique pour la croissance verte.* fr. URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte> (visited on 01/18/2021).
- [16] *Réglementation et Normes QA version finale.* fr. URL: [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/01\\_Tableau-Normes-Seuils%20r%C3%A9glementaires.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/01_Tableau-Normes-Seuils%20r%C3%A9glementaires.pdf) (visited on 01/18/2021).
- [17] *L'indice de la qualité de l'air ATMO.* fr-FR. Dec. 2020. URL: <https://atmo-france.org/lindice-atmo/> (visited on 02/17/2021).
- [18] *contribution ATMO assise tranistion-energie 2018.* fr-FR. URL: [https://atmo-france.org/wp-content/uploads/2018/09/contribution\\_ATMO\\_assise\\_transtion\\_energie\\_2018.pdf](https://atmo-france.org/wp-content/uploads/2018/09/contribution_ATMO_assise_transtion_energie_2018.pdf) (visited on 01/18/2021).
- [19] *Atmo France - Réseau national des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air.* fr-FR. URL: <https://atmo-france.org/> (visited on 01/15/2021).
- [20] *Liste des stations.* URL: <https://www.atmo-occitanie.org/sites/default/files/publications/2020-10/Liste%5C%20des%5C%20stations.pdf> (visited on 02/16/2021).
- [21] Tatiana Macé, François Mathé, and Eva Léoz-Garziandia. “Surveillance de la qualité de l'air : Description du système français d'assurance qualité”. fr. In: (2010), p. 97.
- [22] Prashant Kumar et al. “The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities”. en. In: *Environment International* 75 (Feb. 2015), pp. 199–205. ISSN: 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2014.11.019. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014003547> (visited on 01/22/2021).
- [23] *Protocole de détermination des caractéristiques de performance métrologique des micro-capteurs - étude comparative des performances en laboratoire de micro-capteurs de NO<sub>2</sub> — LCSQA.* URL: <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2016/mines-douai/protocole-determination-caracteristiques-performance-metrologique-micro-cap> (visited on 01/22/2021).

- [24] *Figure.2 : Constitution du capteur de gaz MOX.* en. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Constitution-du-capteur-de-gaz-MOX\\_fig3\\_45636412](https://www.researchgate.net/figure/Constitution-du-capteur-de-gaz-MOX_fig3_45636412) (visited on 01/22/2021).
- [25] *Electrochemical Gas Sensors – Membrapor.* URL: <https://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/> (visited on 01/22/2021).
- [26] Pamela Yoboue. “Etude technologique pour l'amélioration des performances d'un capteur de gaz à oxyde métallique: développement d'une plateforme chauffante haute température et intégration de couche sensible nanostructurée”. In: (May 2010).
- [27] *Capteur électrochimique: les caractéristiques.* URL: [https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRA\\_76\\_0MEGA\\_22\\_B2\\_web.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRA_76_0MEGA_22_B2_web.pdf). (visited on 01/22/2021).
- [28] *Photoionization Detector - an overview — ScienceDirect Topics.* URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/photoionization-detector> (visited on 01/22/2021).
- [29] Alastair C. Lewis et al. “Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research”. en. In: *Faraday Discuss.* 189.0 (July 2016). Publisher: The Royal Society of Chemistry, pp. 85–103. ISSN: 1364-5498. DOI: 10.1039/C5FD00201J. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/fd/c5fd00201j> (visited on 01/20/2021).
- [30] Nuria Castell et al. “Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?” en. In: *Environment International* 99 (Feb. 2017), pp. 293–302. ISSN: 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2016.12.007. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412016309989> (visited on 01/20/2021).
- [31] Lidia Morawska et al. “Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?” en. In: *Environment International* 116 (July 2018), pp. 286–299. ISSN: 0160-4120. DOI: 10.1016/j.envint.2018.04.018. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018302460> (visited on 11/10/2020).
- [32] Kate R. Smith et al. *An improved low power measurement of ambient NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> combining electrochemical sensor clusters and machine learning.* en. preprint. Gases/In Situ Measurement/Validation and Intercomparisons, Sept. 2018. DOI: 10.5194/amt-2018-285. URL: <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2018-285/amt-2018-285.pdf> (visited on 01/20/2021).
- [33] M. I. Mead et al. “The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks”. en. In: *Atmospheric Environment* 70 (May 2013), pp. 186–203. ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.11.060. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012011284> (visited on 01/20/2021).
- [34] Zaher Al Barakeh et al. “Development of a normalized multi-sensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection”. en. In: *Sensors and Actuators B: Chemical* 241 (Mar. 2017), pp. 1235–1243. ISSN: 0925-4005. DOI: 10.1016/j.snb.2016.10.006. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092540051631632X> (visited on 01/20/2021).

- [35] Walter Fuertes et al. “Distributed System as Internet of Things for a New Low-Cost, Air Pollution Wireless Monitoring on Real Time”. In: *2015 IEEE/ACM 19th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. ISSN: 1550-6525. Oct. 2015, pp. 58–67. DOI: 10.1109/DS-RT.2015.28.
- [36] Chen Xiaojun, Liu Xianpeng, and Xu Peng. “IOT-based air pollution monitoring and forecasting system”. In: *2015 international conference on computer and computational sciences (ICCCS)*. IEEE. 2015, pp. 257–260.
- [37] Rafael Gouriveau et al. “PHM – Prognostics and health management - De la surveillance au pronostic de défaillances de systèmes complexes”. fr. In: (2013), p. 21.
- [38] The World Air Quality Index project. *World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index*. en. URL: <https://waqi.info/> (visited on 05/18/2022).
- [39] Aakash C. Rai et al. “End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring”. en. In: *Science of The Total Environment* 607-608 (Dec. 2017), pp. 691–705. ISSN: 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717316935> (visited on 10/01/2021).
- [40] Wenhua Li, Lili Yi, and Xiang Yin. “Real Time Air Monitoring, Analysis and Prediction System Based on Internet of Things and LSTM”. In: *2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. ISSN: 2472-7628. Oct. 2020, pp. 188–194. DOI: 10.1109/WCSP49889.2020.9299738.
- [41] Petra Bauerová et al. “Low-Cost Air Quality Sensors: One-Year Field Comparative Measurement of Different Gas Sensors and Particle Counters with Reference Monitors at Tušimice Observatory”. en. In: *Atmosphere* 11.5 (May 2020). Number: 5 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 492. DOI: 10.3390/atmos11050492. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/5/492> (visited on 10/06/2021).
- [42] Meo Vincent C. Caya et al. “Air Quality Monitoring Platform with the Integration of Dual Sensor Redundancy Mechanism through Internet of Things”. In: *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. Nov. 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/HNICEM.2018.8666428.
- [43] P.R. Lorcak, A.K. Caglayan, and D.E. Eckhardt. “A theoretical investigation of generalized voters for redundant systems”. In: *[1989] The Nineteenth International Symposium on Fault-Tolerant Computing. Digest of Papers*. June 1989, pp. 444–451. DOI: 10.1109/FTCS.1989.105617.
- [44] G. R Latif-Shabgahi. “A novel algorithm for weighted average voting used in fault tolerant computing systems”. en. In: *Microprocessors and Microsystems* 28.7 (Sept. 2004), pp. 357–361. ISSN: 0141-9331. DOI: 10.1016/j.micpro.2004.02.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141933104000134> (visited on 01/20/2022).
- [45] Christophe Leys et al. “Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median”. en. In: *Journal of Experimental Social Psychology* 49.4 (July 2013), pp. 764–766. ISSN: 0022-1031. DOI: 10.1016/j.jesp.2013.03.013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022103113000668> (visited on 03/21/2022).

- [46] Julian Bass, Gholam Reza Latif-Shabgahi, and Stuart Bennett. *Experimental comparison of voting algorithms in cases of disagreement*. Pages: 523. Oct. 1997. ISBN: 978-0-8186-8129-5. DOI: 10.1109/EURMIC.1997.617368.
- [47] M. Kassab et al. “A Novel Voting Algorithm Based on Weighted Average Voting with a Classification Technique”. en. In: *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology* 15.AEROSPACE SCIENCES (May 2013), pp. 1–8. ISSN: 2636-364X. DOI: 10.21608/asat.2013.22266. URL: [http://asat.journals.ekb.eg/article\\_22266.html](http://asat.journals.ekb.eg/article_22266.html) (visited on 01/20/2022).
- [48] P. Kucera et al. “Reliability model of TMR system with fault detection”. en. In: *IFAC Proceedings Volumes*. IFAC Workshop on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2006, Brno, Czech Republic, February 14-16, 2006 39.21 (Feb. 2006), pp. 468–472. ISSN: 1474-6670. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)30233-1. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017302331> (visited on 03/03/2022).
- [49] Thaha Muhammed and Riaz Ahmed Shaikh. “An analysis of fault detection strategies in wireless sensor networks”. en. In: *Journal of Network and Computer Applications* 78 (Jan. 2017), pp. 267–287. ISSN: 1084-8045. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.10.019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516302545> (visited on 03/21/2022).
- [50] Meenakshi Panda and P. M. Khilar. “Distributed self fault diagnosis algorithm for large scale wireless sensor networks using modified three sigma edit test”. en. In: *Ad Hoc Networks* 25 (Feb. 2015), pp. 170–184. ISSN: 1570-8705. DOI: 10.1016/j.adhoc.2014.10.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870514002224> (visited on 03/23/2022).