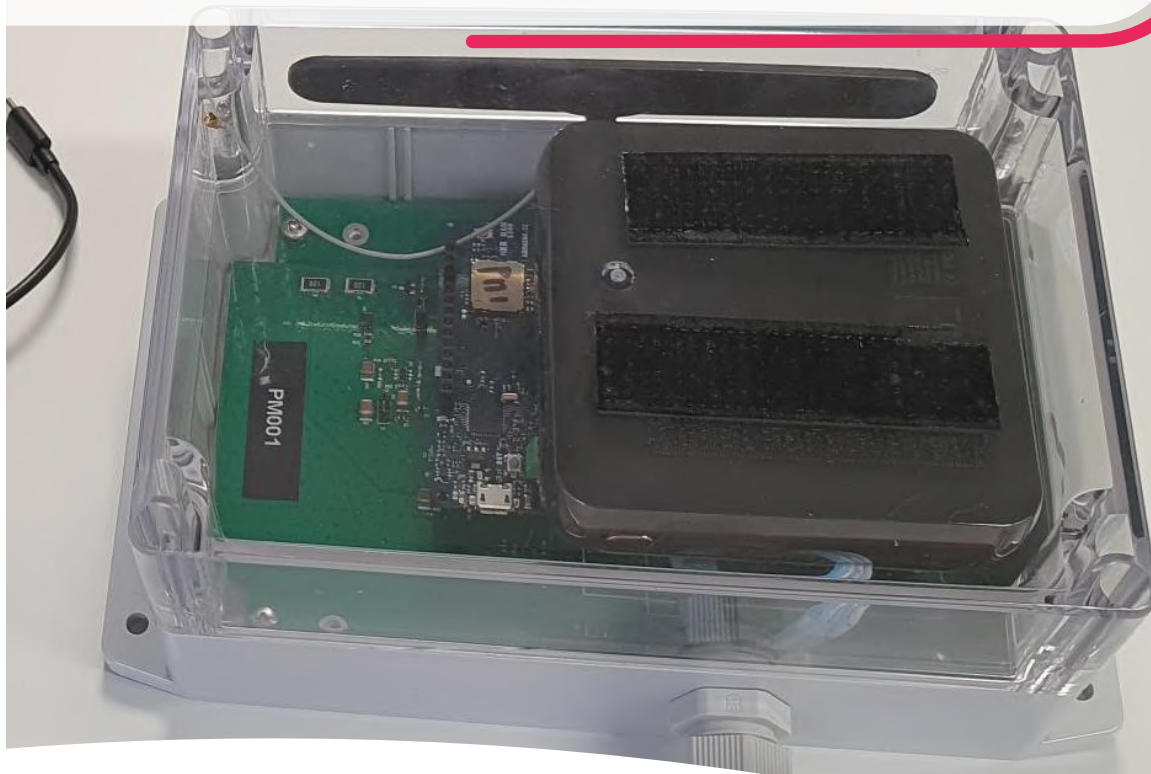


GUIDE MICRO-CAPTEURS

pour la mise en place et l'exploitation de campagnes de mesure de la qualité de l'air par micro-capteurs

Rapport n°LBAS/2021/43000007/V0

Document à destination des enseignants du secondaire



Auteur : Lucas BASTIEN

Relecteurs : Nathalie DUFOUR et Guillaume LECARPENTIER

Diffusion : 18 février 2021



Avant-propos

Atmo Hauts-de-France est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (décret 2007-397 du 22 mai 2007) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO. Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. Atmo Hauts-de-France est agréée du 1^{er} janvier 2020 au 31 décembre 2022, au titre de l'article L.221-3 du Code de l'environnement.

Atmo Hauts-de-France est également agréée par les Académies de Lille et d'Amiens en tant qu'association éducative complémentaire de l'enseignement public jusqu'en septembre 2023.

Conditions de diffusion

Atmo Hauts-de-France communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-hdf.fr.

Responsabilités

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Hauts-de-France. Ces données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure. Les résultats sont analysés selon les objectifs de l'étude, le contexte et le cadre réglementaire des différentes phases de mesures, les financements attribués à l'étude et les connaissances météorologiques disponibles.

Avertissement

Atmo Hauts-de-France n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses ou de toute œuvre utilisant ses mesures et ses rapports d'études pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © **Atmo Hauts-de-France – Rapport N°LBAS/2021/43000007/V0.**

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Hauts-de-France :

- depuis le formulaire de contact disponible à l'adresse <http://www.atmo-hdf.fr/contact.html>
- par mail : contact@atmo-hdf.fr
- par téléphone : 03 59 08 37 30

Réclamations

Les réclamations sur la non-conformité de l'étude doivent être formulées par écrit dans les huit jours de la livraison des résultats. Il appartient au partenaire de fournir toute justification quant à la réalité des vices ou anomalies constatées. Il devra laisser à Atmo Hauts-de-France toute facilité pour procéder à la constatation de ces vices pour y apporter éventuellement remède. En cas de litige, un accord amiable sera privilégié. Dans le cas où une solution n'est pas trouvée la résolution s'effectuera sous l'arbitrage des autorités compétentes.

	Nom	Qualité	Visa
Approbation	Guillaume LECARPENTIER	Responsable d'AIREKA, le lab' d'innovations pour la qualité de l'air	

Sommaire

1. Contexte et objectifs.....	6
2. Introduction à la qualité de l'air.....	6
2.1. Définition d'un polluant atmosphérique.....	6
2.2. La composition de l'air.....	7
2.3. La différence entre émissions et concentrations en polluants.....	8
2.4. Sources d'émissions.....	9
2.5. Tour d'horizon des polluants atmosphériques réglementés en France.....	10
2.6. Répartition géographique des polluants.....	20
2.7. Influence de la météorologie sur les concentrations en polluants atmosphériques.....	21
3. Organisation de la surveillance de la qualité de l'air en France	23
3.1. Une organisation à plusieurs échelles.....	23
3.2. Les acteurs de la qualité de l'air en France.....	24
3.3. Les seuils de pollution en air ambiant.....	25
4. Mesure des concentrations en particules à l'aide des micro-capteurs AIREKA..	28
4.1. Introduction à la mesure de la qualité de l'air	28
4.2. Le micro-capteur co-développé avec Kanope	28
4.3. Autonomie du micro-capteur.....	29
5. Guide pour la mise en place de campagnes de mesure par micro-capteurs.....	30
5.1. Typologie des stations et des mesures.....	30
5.2. Définir les objectifs de l'étude.....	33
5.3. Choix des polluants à mesurer.....	35
5.4. Choisir les emplacements des points de prélèvement	36
5.5. Durée des campagnes de mesure	38
5.6. Exploitation des données.....	39
6. Conclusion.....	44
Glossaire	45

Illustrations

Figure 1 : Composition moyenne de l'air sec.....	8
Figure 2 : Conceptualisation de la différence entre émissions et concentrations	8
Figure 3 : Schéma illustrant la différence entre émissions et concentrations	9
Figure 4 : Émissions de dioxyde de soufre (SO ₂) en 2015 dans la région Hauts-de-France.....	11
Figure 5 : Émissions d'oxydes d'azote (NO _x) en 2015 dans la région Hauts-de-France.....	11
Figure 6 : Profils journaliers et annuels du NO et du NO ₂	12
Figure 7 : Profils journaliers et annuels en ozone	14
Figure 8 : Émissions de monoxyde de carbone (CO) en 2015 dans la région Hauts-de-France.....	14

Figure 9 : Émissions de benzène (C ₆ H ₆) en 2015 dans la région Hauts-de-France.....	15
Figure 10 : Émissions de particules PM ₁₀ et PM _{2,5} en 2015 dans la région Hauts-de-France.....	16
Figure 11 : Profils journaliers et annuels des particules PM ₁₀ et PM _{2,5}	17
Figure 12 : Émissions de benzo(a)pyrène (C ₂₀ H ₁₂) en 2015 dans la région Hauts-de-France	18
Figure 13 : Émissions de métaux lourds en 2015 dans la région Hauts-de-France	18
Figure 14 : Moyennes annuelles modélisées pour 2018 en PM ₁₀ et NO ₂	20
Figure 15 : Hauteur de couche limite et concentrations en particules PM ₁₀	22
Figure 16 : Effet visible d'une inversion de température à Margaret Island, Budapest	22
Figure 17 : Formation d'une inversion de température par refroidissement de l'air par le sol.	23
Figure 18 : Niveaux de réglementation de l'air ambiant en France.....	24
Figure 19 : Différence entre valeur cible, valeur limite, et objectif de qualité.....	25
Figure 20 : Station de mesure « Amiens Saint-Pierre »	32
Figure 21 : Station de mesure « Roubaix Serres » dans la Métropole Européenne de Lille.....	32
Figure 22 : Station de mesures de Mardyck, dans la Communauté Urbaine de Dunkerque.....	33
Figure 23 : Étude de l'impact d'une source d'émissions sur la qualité de l'air.....	34
Figure 24 : Exemple d'installation d'un micro-capteur avec panneau solaire.....	37
Figure 25 : Rose des vents pour la station Météo-France de Valenciennes, décembre 2020.....	40
Figure 26 : Moyennes horaires en PM ₁₀ durant quelques jours en janvier 2019.	41
Figure 27 : Moyennes journalières en NO ₂ mesurées à Amiens et Salouël en 2015	41
Figure 28 : Maximum journalier de la moyenne horaire en O ₃ en 2018 autour de Béthune.....	41
Figure 29 : Profils journaliers, hebdomadaires, et annuels du dioxyde d'azote NO ₂	42
Figure 30 : Rose de pollution des PM ₁₀ à la station de Valenciennes Wallon, décembre 2020..	43

Tableaux

Tableau 1 : Emissions de polluants atmosphériques par secteurs d'activité	10
Tableau 2 : Concentrations atmosphériques typiques pour les polluants réglementés	19
Tableau 3 : Seuils de pollution en air ambiant en vigueur en France.....	27

1. Contexte et objectifs

Le laboratoire d'innovation d'Atmo Hauts-de-France, AIREKA, accompagne en 2020 et 2021 trois lycées de la région Hauts-de-France pour l'utilisation à but pédagogique de micro-capteurs de la qualité de l'air.

Ces appareils offrent en effet de multiples possibilités d'apprentissage. Ils peuvent, par exemple, être utilisés comme supports pour l'étude de notions d'électronique (assemblage de certains composants du capteur), de conception mécanique (fabrication du boîtier), de sciences environnementales, de métrologie (mesure de la qualité de l'air), de programmation informatique, etc.

Ce guide, rédigé par Atmo Hauts-de-France, présente les notions de base de qualité de l'air ainsi que des recommandations pour la conception, la réalisation, et l'exploitation de campagnes de mesures par **micro-capteurs fixes en air extérieur**. Il est adressé aux **enseignantes et enseignants de lycée**. La création de contenu destiné aux élèves reste la responsabilité du corps enseignant et de l'inspection d'académie.

Les micro-capteurs qui seront utilisés pour ce projet pilote sont co-conçus et fournis par l'entreprise Kanope sous forme de kits à assembler soi-même (DIY = Do It Yourself). Le projet est financé par le conseil régional des Hauts-de-France et l'Agence Régionale de Santé (ARS) des Hauts-de-France.

La **première partie** de ce guide introduit les **concepts de base** de la qualité de l'air : quels sont les principaux polluants atmosphériques, d'où viennent-ils, quels sont leurs effets sur la santé, comment la qualité de l'air est-elle surveillée en France, etc.

La **deuxième partie** du rapport présente des recommandations pour la conception, la réalisation, et l'exploitation de **campagnes de mesures** de la qualité de l'air par micro-capteurs.

2. Introduction à la qualité de l'air

L'étude de la qualité de l'air peut s'avérer aussi complexe que passionnante. En effet, elle mélange plusieurs disciplines scientifiques, comme la physique, la chimie, les mathématiques, les sciences informatiques et maintenant la sociologie. L'étude des effets de la pollution atmosphérique sur la santé et l'environnement sollicite également d'autres disciplines telles que la médecine. Les sections qui suivent présentent les notions de base qu'il convient d'aborder en préalable à l'utilisation de micro-capteurs.

2.1. Définition d'un polluant atmosphérique

L'article R221-1 du code de l'environnement¹ définit comme polluant atmosphérique « *toute substance présente dans l'air ambiant et pouvant avoir des effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble* ».

Le présent guide fait la distinction entre la notion de **polluant atmosphérique** et celle de **gaz à effet de serre**. Un polluant atmosphérique a des effets directs sur la santé (e.g. troubles respiratoires, maladies cardiovasculaires, cancer) et/ou sur l'environnement (e.g. pluies acides, oxydation des végétaux). Un gaz à effet de serre est une substance qui affecte le climat de la Terre via l'absorption d'une partie du rayonnement infrarouge émis par notre planète. Cette perturbation du climat peut avoir des conséquences dramatiques sur

¹ Source : <https://www.legifrance.gouv.fr/>, consulté le 26 novembre 2020.

la vie végétale et animale et donc humaine. Certains gaz à effet de serre, comme l'ozone, sont également des polluants atmosphériques. D'autres, comme le dioxyde de carbone, n'ont que peu d'impacts directs sur la santé humaine pour les concentrations atmosphériques actuelles.

Il existe plusieurs dizaines voire centaines de polluants atmosphériques. Certains sont encore probablement à découvrir. Certains polluants sont présents dans l'atmosphère sous forme **gazeuse**, alors que d'autres y sont sous forme de **particules**, c'est-à-dire de petits "grains" solides et/ou liquides en suspension dans l'air. Voici une liste non-exhaustive des polluants atmosphériques :

- **Dioxyde de soufre (SO₂)**.
- Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO₂), regroupés ensemble sous le terme **NO_x** (oxydes d'azote).
- **Ozone (O₃)**.
- **Monoxyde de carbone (CO)**.
- **Particules en suspension PM_{2.5} et PM₁₀**.
- Composés organiques volatils, dont le **benzène**.
- Autres composés organiques dont le **benzo(a)pyrène**.
- Métaux lourds, dont l'**arsenic**, le **cadmium**, le **nickel**, et le **plomb**.
- Espèces destructrices de la couche d'ozone (chlorofluorocarbones, etc.).
- Et bien d'autres (pesticides, perturbateurs endocriniens, ammoniac etc.).

La section 2.5 décrit les douze polluants réglementés en France (qui sont indiqués en gras dans la liste ci-dessus). Ici, le terme **polluant réglementé** désigne tout polluant pour lequel il existe un ou plusieurs seuils de concentrations à ne pas dépasser dans l'air ambiant.

Il existe différentes manières de classifier les polluants atmosphériques, par exemple :

- Selon s'ils sont présents dans l'atmosphère sous forme de **gaz** ou de **particules**.
- Selon s'ils sont émis directement dans l'atmosphère (on qualifie alors ces polluants de **primaires**) ou s'ils sont formés dans l'atmosphère à partir d'autres espèces, par des réactions chimiques ou physiques (on qualifie alors ces polluants de **secondaires**). Les espèces chimiques qui peuvent conduire à la formation de polluants secondaires dans l'atmosphère sont appelés **précurseurs**.

2.2. La composition de l'air

La composition moléculaire moyenne de l'air sec est représentée sur la Figure 1. Il est composé d'environ 78 % de **diazote (N₂)**, un gaz relativement neutre chimiquement et n'ayant pas d'influence directe sur la santé, le climat, et l'environnement. La teneur moyenne en **dioxygène (O₂)**, le gaz nécessaire à la respiration, est de 21 %. Des 1% restant, une grande partie est composée d'**argon (Ar)**, un gaz neutre chimiquement. La teneur moyenne en **dioxyde de carbone (CO₂)** dans l'atmosphère est de l'ordre de 0.04% en 2020.²

Il est important de remarquer que, même si les teneurs en gaz à effet de serre et polluants atmosphériques paraissent a priori faibles (une fraction de pourcent), ils peuvent néanmoins avoir des effets désastreux sur le

² Source : United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>, consultée le 26 janvier 2021.

climat, l'environnement, et la santé. Par exemple, un épisode de pollution à l'ozone en France correspond à une concentration horaire en ozone supérieure à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soit une teneur de l'air en ozone de 0.000004 % environ. La teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère est très variable et varie entre environ 1 et 4 %.

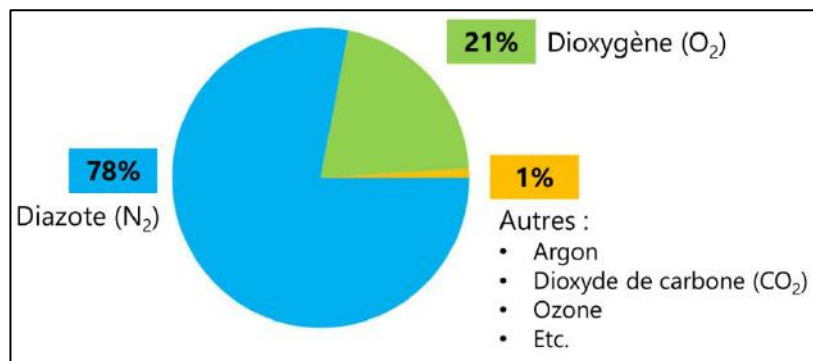


Figure 1 : Composition moyenne de l'air sec. Il s'agit de la composition molaire et non pas massique. Par exemple, 78 % des molécules (et non pas de la masse) d'un échantillon d'air sont des molécules de diazote.

2.3. La différence entre émissions et concentrations en polluants

Les notions d'**émissions** et de **concentrations** et la distinction entre ces deux termes portent souvent à confusion. La notion d'émissions se rapporte aux rejets de polluants dans l'atmosphère et la notion de concentration se réfère aux teneurs en polluants de l'air (Figure 2).

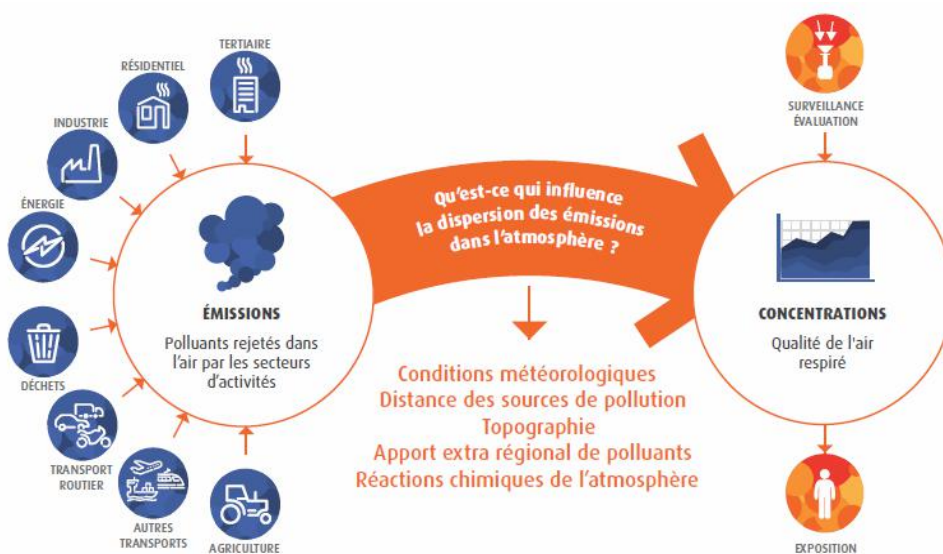


Figure 2 : Conceptualisation de la différence entre émissions et concentrations de polluants atmosphériques.

Plus précisément, le terme « émissions » décrit la quantité de polluant qui sort, par unité de temps, d'une source de pollution (cheminée, pot d'échappement, etc.) pour entrer dans l'atmosphère :

$$\text{Emissions} = \frac{\text{Quantité de polluant qui sort d'une source de pollution pour entrer dans l'atmosphère}}{\text{Unité de temps}}$$

Les unités typiquement utilisées pour les émissions sont les kilogrammes par seconde (kg/s) ou les tonnes par an (t/an).

Le terme « concentration » décrit la quantité de polluants présente dans l'air par unité de volume d'air :

$$\text{Concentration} = \frac{\text{Quantité de polluant dans l'air}}{\text{Unité de volume d'air}}$$

Les unités les plus souvent utilisées pour la surveillance de la qualité de l'air en France pour décrire les concentrations sont :

- Le **mg/m³** (milligramme de polluant présent par mètre cube d'air).
- Le **µg/m³** (microgramme de polluant présent par mètre cube d'air).
- Le **ng/m³** (nanogramme de polluant présent par mètre cube d'air).

Comme détaillé dans la section 2.7, de nombreux phénomènes atmosphériques peuvent influencer les concentrations en polluants après qu'ils ont été émis dans l'atmosphère, notamment :

- Les polluants peuvent être mélangés, dilués, et transportés d'un endroit à un autre de l'atmosphère par les mouvements de l'air.
- Les polluants peuvent être retirés de l'atmosphère en se déposant sur les sols, dans les océans, etc.
- Les réactions physiques et chimiques ayant lieu dans l'atmosphère peuvent détruire certains polluants et en créer des nouveaux.

Le schéma ci-dessous (Figure 3) illustre la différence entre émissions et concentrations. Sur cette image, trois riverains sont situés à proximité de **la même source d'émissions**, mais sont exposés à des **concentrations différentes**.

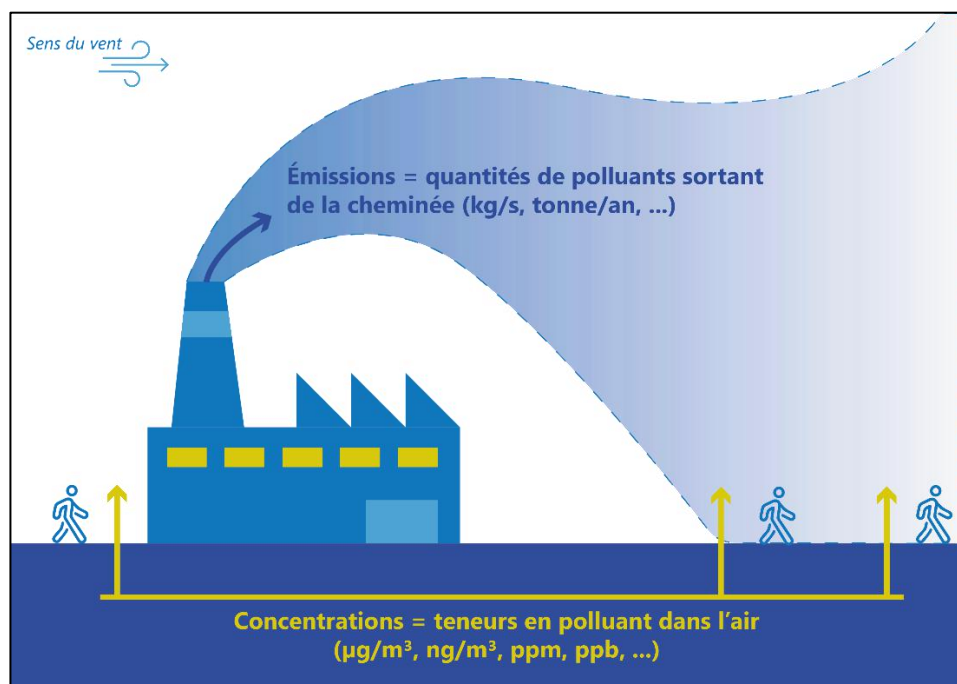


Figure 3 : Schéma illustrant la différence entre émissions et concentrations. Bien que les trois personnages représentés soient à proximité de la même source d'émissions, la concentration en polluant de l'air respiré par celui à gauche est faible, celle respirée par le personnage central est très élevée, et celle respirée par le personnage à droite représente le cas intermédiaire.

2.4. Sources d'émissions

La plupart des activités humaines émettent des polluants atmosphériques. La description des émissions de polluants se base souvent sur le regroupement des activités émettrices par secteurs d'activité, par exemple :

Tableau 1 : Classification des émissions de polluants atmosphériques par secteurs d'activité.

	Secteur	Exemples
	Transports routiers	Voitures, camions, motos
	Autres transports	Bateaux, avions, trains
	Industrie, production d'énergie, traitement des déchets	Usine, centrale électrique, centre d'incinération des déchets
	Secteur résidentiel et tertiaire	Chauffage des résidences, des écoles, des magasins
	Agriculture	Véhicules agricoles, travail du sol, utilisation de pesticides
	Sources naturelles	Éruption volcaniques, végétation, foudre

Comme indiqué dans le tableau ci-dessus, il existe également des sources naturelles de pollution atmosphérique, telles que les éruptions volcaniques qui sont sources de **dioxyde de soufre (SO₂)**, la foudre qui peut générer des **oxydes d'azote**, et la végétation qui peut émettre des **composés organiques volatils (COV)**.

2.5. Tour d'horizon des polluants atmosphériques règlementés en France

2.5.1. Le dioxyde de soufre (SO₂)

Origines : le dioxyde de soufre (SO₂) est un polluant gazeux primaire produit lors de la combustion de matière contenant du soufre et par certains procédés industriels. Le charbon, le gaz naturel, et les produits pétroliers peuvent contenir naturellement du soufre. Le gaz naturel, l'essence, et le gasoil routier sont généralement désulfurés au raffinage, si bien que le secteur routier n'est pas une source significative de SO₂ en France. Le dioxyde de soufre peut également être émis en quantité par les éruptions volcaniques quand elles se produisent.

Dans les Hauts-de-France, le SO₂ est émis en grande majorité (82 %) par le **secteur industriel**. La même tendance est observée à l'échelle nationale. Le **secteur résidentiel et tertiaire** est responsable de 16 % des émissions (combustion de bois et de fuel domestique).

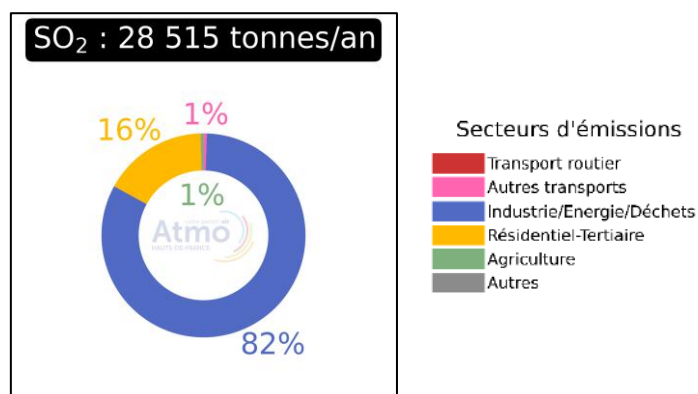


Figure 4 : Émissions de dioxyde de soufre (SO₂) en 2015 dans la région Hauts-de-France.

Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : le dioxyde de soufre est irritant pour les voies respiratoires et il participe au phénomène de pluies acides. Il peut également contribuer à la formation de particules dans l'atmosphère. Ces particules peuvent refléter la lumière du soleil ; l'effet climatique du SO₂ est donc globalement refroidissant.

Concentrations atmosphériques : les concentrations de fond en dioxyde de soufre sont devenues très faibles (quelques µg/m³) par rapport aux seuils réglementaires sur la quasi-totalité du territoire français. Cette tendance est due à l'abandon progressif de l'utilisation des combustibles soufrés et à l'amélioration des technologies de réduction des émissions sur les sites industriels. Des concentrations modérées ou élevées sont en revanche parfois observées, de manière ponctuelle, à proximité de certaines plateformes industrielles et/ou portuaires.

2.5.2. Les oxydes d'azote (NO_x)

Origines : le terme NO_x regroupe deux polluants : le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ces composés sont émis lors de la combustion, lorsque l'azote et l'oxygène de l'air se recombinent sous l'effet des fortes températures. Environ la moitié des NO_x émis dans les Hauts-de-France provient du secteur des transports, principalement routiers. Le secteur de l'industrie, de l'énergie, et des déchets participe à environ un quart des émissions de la région. Les autres secteurs représentent chacun 10 % ou moins du total des émissions.

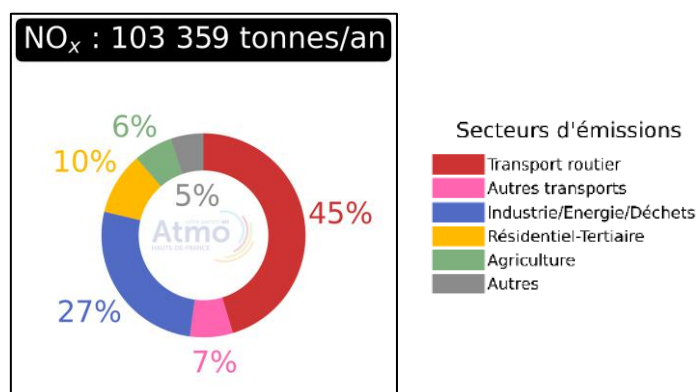


Figure 5 : Émissions d'oxydes d'azote (NO_x) en 2015 dans la région Hauts-de-France.

Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : les oxydes d'azote provoquent ou aggravent des maladies respiratoires. De plus, ils participent au phénomène de pluies acides et à la formation d'ozone et de particules dans l'atmosphère. L'influence des oxydes d'azote sur le climat est complexe. Par exemple, leur

participation à la formation d'ozone à un effet réchauffant alors que leur participation à la formation de particules réfléchissantes à un effet refroidissant. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) estime que l'effet global des oxydes d'azote sur le climat est refroidissant.³

Concentrations atmosphériques : Pour comprendre ce qui influence les concentrations d'oxydes d'azote (ou d'autres polluants) dans l'atmosphère, il est utile de classifier les mesures comme suit (davantage de détails sur cette classification sont donnés dans la Section 5.1) :

- Les **mesures de fond** représentent le mélange de pollution dans un environnement donné (**urbain, périurbain, ou rural**).
- Les **mesures de proximité automobile** sont destinées à mesurer les concentrations au voisinage proche des grands axes de circulation, là où elles sont directement influencées par les émissions de polluants du trafic routier.
- Les **mesures de proximité industrielle** sont destinées à mesurer les concentrations au voisinage proche d'émetteurs industriels, et à détecter l'influence de ces derniers sur la qualité de l'air, le cas échéant.

Les niveaux en oxydes d'azote près des grands axes routiers sont généralement plus élevés que les niveaux de fond (Figure 6). En situation de fond, les concentrations en milieu urbain sont plus élevées que les concentrations en milieu périurbain, qui sont plus élevées qu'en milieu rural. Dans une journée, les concentrations sont généralement plus élevées le matin et le soir, lorsque le trafic lié aux trajets domicile-travail est important et que les conditions de dispersion sont relativement mauvaises. De même, les concentrations hivernales sont en moyenne plus élevées que les concentrations estivales, car les conditions de dispersion sont meilleures en été qu'en hiver (c.f. section 2.7).

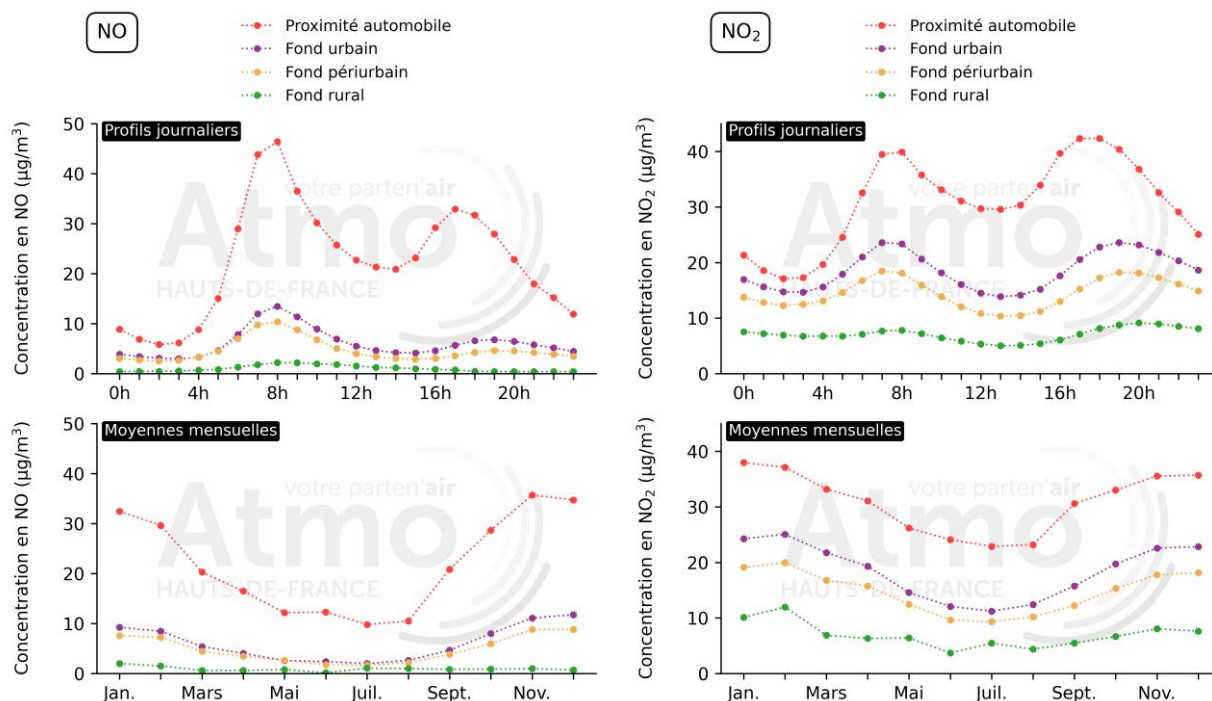


Figure 6 : Profils journaliers et annuels du monoxyde d'azote (NO, à gauche), et du dioxyde d'azote (NO₂, à droite) dans les Hauts-de-France sur la période 2015-2019. Les heures sont indiquées en TU (temps universel).

³ Source : IPCC : Summary for Policymakers, 2013. Dans : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, édité par Stocker et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

2.5.3. L’ozone (O₃)

Origines : l’ozone est un polluant gazeux secondaire⁴. Il n’existe pas d’émissions significatives d’ozone, mais celui-ci est formé directement dans l’atmosphère par réactions chimiques mettant en jeu les oxydes d’azote et des composés organiques volatils (COV). Une partie de ces réactions nécessite la participation de la lumière du soleil, qui peut séparer certaines molécules en deux (photolyse).

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : L’ozone est un irritant des voies respiratoires et peut aggraver ou favoriser l’apparition de l’asthme, entraver le bon développement du système respiratoire, et conduire à une capacité pulmonaire réduite. De plus, l’ozone est une espèce oxydante qui dégrade la végétation (forêts, productions agricoles, etc.). C’est également un gaz à effet de serre qui participe au réchauffement climatique. Il est important de distinguer :

- **L’ozone troposphérique.** Il s’agit de l’ozone situé dans la troposphère, c’est-à-dire la couche de l’atmosphère la plus près du sol (jusqu’à 10 km d’altitude environ). L’ozone troposphérique est considéré comme un polluant puisqu’il est nuisible à notre santé et à l’environnement.
- **L’ozone stratosphérique.** Il s’agit de l’ozone situé dans la stratosphère, à une altitude de 10 à 50 km environ. Cet ozone, situé hors de portée des animaux et des végétaux, forme la « couche d’ozone », qui empêche certains rayons solaires ultraviolets dangereux d’atteindre le sol. L’ozone stratosphérique est donc bénéfique pour la vie sur Terre.

Il s’agit dans les deux cas de la même espèce chimique ; c’est sa localisation dans l’atmosphère qui définit s’il a un effet bénéfique (ozone stratosphérique) ou nocif (ozone troposphérique).

Concentrations atmosphériques : la formation de l’ozone nécessite l’action de la lumière du soleil. Les concentrations en ozone sont donc généralement plus élevées au printemps et en été qu’en hiver (Figure 7). Dans une journée typique du printemps ou de l’été, les concentrations sont généralement maximales en milieu ou fin d’après-midi et diminuent très fortement la nuit.

Pour des raisons chimiques non détaillées ici, la formation d’ozone peut être inhibée si trop de NO_x sont présents par rapport à la quantité de COV disponibles. Cette situation est souvent rencontrée dans les zones densément peuplées où les émissions de NO_x sont fortes. En s’éloignant des zones urbaines, la quantité de NO_x disponible redevient propice à la formation d’ozone. Les concentrations en ozone dans les zones rurales situées non-loin des villes sont donc, en moyenne, plus élevées qu’en milieu urbain et périurbain (Figure 7). Dans les environnements ruraux très éloignés des villes, la quantité de NO_x disponible est faible et les concentrations en ozone y sont donc faibles également (plus faibles que dans les zones rurales influencées par les agglomérations).

⁴ Un polluant secondaire n’est pas un polluant peu important, mais un polluant qui est formé dans l’atmosphère par des réactions physico-chimiques faisant intervenir d’autres composés, au lieu d’être émis directement par des activités anthropiques ou des phénomènes naturels (c.f. section 2.1).

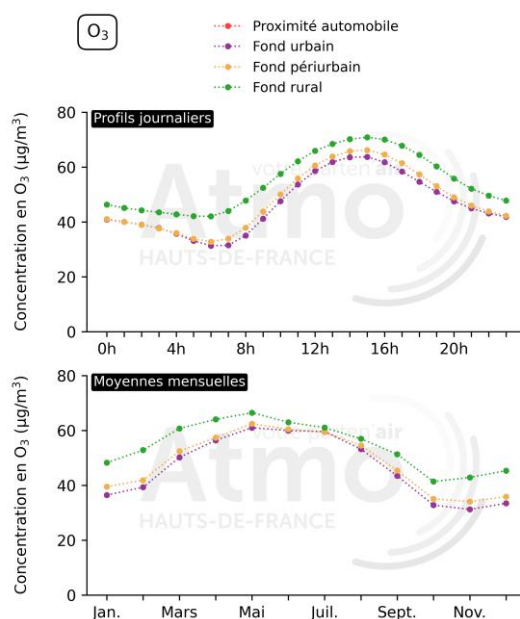


Figure 7 : Profils journaliers et annuels en ozone dans les Hauts-de-France sur la période 2015-2019. Les heures sont indiquées en TU (temps universel).

2.5.4. Le monoxyde de carbone (CO)

Origines : le monoxyde de carbone est émis lors de processus de combustion incomplète. Les concentrations atmosphériques de ce polluant ont fortement diminué ces dernières décennies grâce au développement et à l'utilisation de convertisseurs catalytiques sur les voitures à essence. Les émissions de monoxyde de carbone de la région Hauts-de-France sont maintenant dominées par les secteurs de l'industrie, de l'énergie, et des déchets (45%) et le résidentiel-tertiaire (39%). Le secteur des transports ne représente à présent que 10 % des émissions de la région.

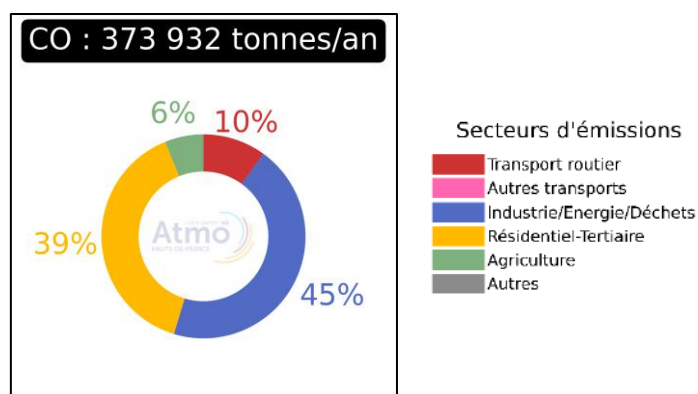


Figure 8 : Émissions de monoxyde de carbone (CO) en 2015 dans la région Hauts-de-France.

Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : Le monoxyde de carbone est très toxique car il empêche le transport de l'oxygène depuis les poumons vers les autres organes du corps. Le monoxyde de carbone n'est pas un gaz à effet de serre. Il contribue néanmoins au changement climatique de manière indirecte à travers, par exemple, sa transformation en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère et sa participation à la formation d'ozone.⁵

⁵ Source : IPCC : Summary for Policymakers, 2013. Dans : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, édité par Stocker et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Concentrations atmosphériques : depuis l'avènement des convertisseurs catalytiques sur les voitures à essence, les concentrations de fond en monoxyde de carbone sont devenues très faibles par rapport aux seuils réglementaires sur la quasi-totalité du territoire français. Des concentrations modérées restent en revanche parfois observées, de manière ponctuelle, à proximité de certaines plateformes industrielles.

2.5.5. Le benzène (C₆H₆)

Origines : Le benzène (C₆H₆) est un composé organique volatil⁶ (COV). Il est produit principalement lors des processus de combustion incomplète. L'inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France estime que la majorité (91 %) des émissions de benzène dans la région provient du secteur résidentiel-tertiaire.

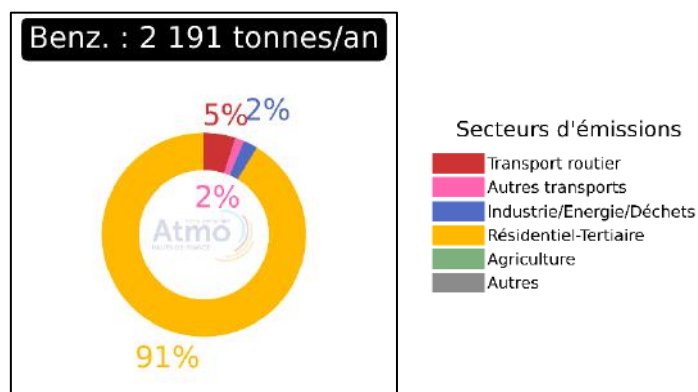


Figure 9 : Émissions de benzène (C₆H₆) en 2015 dans la région Hauts-de-France.

Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : Le benzène est un gaz toxique considéré comme cancérigène ou potentiellement cancérigène.

Concentrations atmosphériques : Les concentrations de fond en benzène dans les Hauts-de-France sont relativement faibles par rapport aux seuils réglementaires. Elles sont généralement plus élevées le matin et le soir, à l'heure des trajets domicile-travail. En moyenne, les concentrations hivernales sont plus élevées que les concentrations estivales, car il y a plus d'émissions en hiver (utilisation du chauffage) et les conditions de dispersions sont moins bonnes à cette saison.

2.5.6. Les particules en suspension PM₁₀ et PM_{2.5}

Origines : Les particules en suspension sont des petits « grains » solides et/ou liquides en suspension dans l'air. Elles sont constituées d'un mélange complexe de :

- **Composés organiques.** Ces composés peuvent être émis directement dans l'air (ils sont alors appelés composés organiques primaires) ou formés dans l'atmosphère par réactions physico-chimiques à partir d'autres molécules organiques (ils sont alors appelés composés organiques secondaires). Les composés organiques des particules proviennent principalement de la combustion incomplète de matière carbonée (véhicules à moteur, chauffage au bois et au fuel, etc.).
- **Composés inorganiques :**
 - **Carbone suie**, aussi appelé « **black carbon** ». C'est un composé primaire émis lors de la combustion incomplète de matière carbonée.
 - **Ions.** Certains sont des composés primaires, comme les sels marins qui forment des particules

⁶ Un composé volatil est un composé qui se trouve préférentiellement à l'état gazeux (et non pas liquide ou solide).

lorsque l'eau des embruns s'évapore. D'autres sont des composés secondaires. Par exemple, le nitrate d'ammonium est formé à partir d'acide nitrique et d'ammoniac gazeux.

- **Métaux.** Ce sont des composés primaires qui peuvent provenir de sources anthropiques (e.g. procédés industriels) ou naturelles (e.g. érosion des sols).

Comme indiqué ci-dessus, les particules atmosphériques sont un mélange de particules primaires et de particules secondaires. On distingue généralement :

- Les PM₁₀, c'est-à-dire les particules dont la taille est inférieure à 10 µm⁷.
- Les PM_{2.5}, c'est-à-dire les particules dont la taille est inférieure à 2.5 µm.

Les PM_{2.5} constituent donc un sous-ensemble des PM₁₀. L'acronyme PM vient de l'anglais « particulate matter ». Il est à noter que, selon les sources, le terme de « particules fines » est parfois utilisé en référence aux PM_{2.5}, et parfois en référence aux PM₁₀. L'usage de ce terme est déconseillé car il est ambigu.

Il existe de nombreuses sources de particules, et tous les secteurs d'activité participent de manière non-négligeable aux émissions de la région. Certaines particules sont émises par les processus de combustion incomplète (véhicules, chauffage au bois, utilisation du fuel ou du charbon, etc). D'autres sont émises par des processus mécaniques (abrasion des plaquettes de frein, envol ou ré-envol des particules du sol, etc.). La contribution du secteur résidentiel et tertiaire est plus importante pour les émissions de PM_{2.5} (41%) que pour les émissions de PM₁₀ (27 %), en lien notamment avec l'utilisation du chauffage au bois non performant, qui est très émetteur de particules PM_{2.5}. A contrario, la contribution du secteur agricole est plus importante pour les PM₁₀ (34 %) que pour les PM_{2.5} (18 %) car le travail et la mise à nu du sol facilite l'envol ou le ré-envol de particules de « grande taille ».

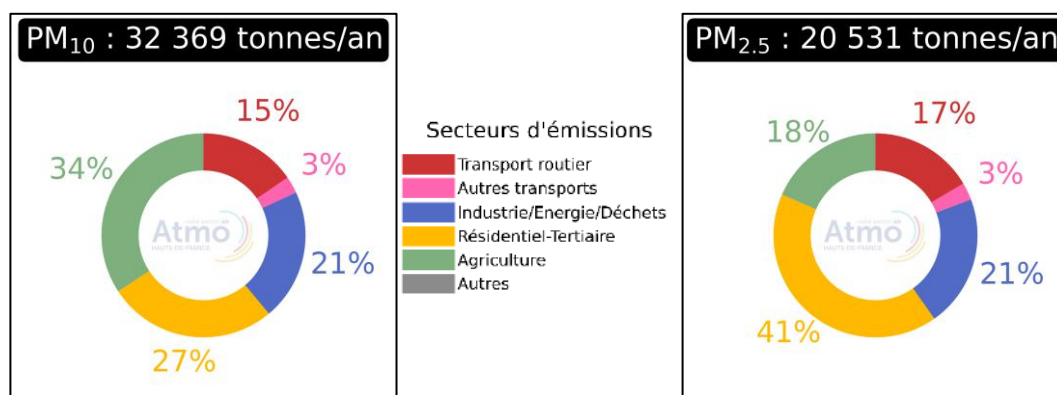


Figure 10 : Émissions de particules PM₁₀ et PM_{2.5} en 2015 dans la région Hauts-de-France.

Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : L'exposition aux particules PM₁₀ et PM_{2.5} est associée à des maladies respiratoires, des maladies cardiovasculaires, et des chances accrues de développer des cancers. À l'échelle globale, les particules ont un effet refroidissant sur le climat en reflétant la lumière du soleil pour la renvoyer dans l'espace avant qu'elle n'atteigne la Terre. En revanche, certains composés des particules, notamment le carbone suie, participent au réchauffement climatique en absorbant la lumière du soleil.⁸

Concentrations atmosphériques : les niveaux en particules en suspension près des grands axes routiers sont

⁷ 10 µm correspond à environ un 5^{ème} du diamètre d'un cheveu humain. Source : <https://www.epa.gov/>, consultée le 16/02/2021.

⁸ Source : IPCC : Summary for Policymakers, 2013. Dans : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, édité par Stocker et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

généralement plus élevés que les niveaux de fond (Figure 11). En situation de fond, les concentrations en milieu urbain sont plus élevées que les concentrations en milieu périurbain, qui sont plus élevées qu'en milieu rural. Dans une journée, les concentrations sont généralement plus élevées le matin et le soir, lorsque le trafic lié aux trajets domicile-travail est important et que les conditions de dispersion sont relativement mauvaises. Ces tendances sont similaires à celles observées pour les oxydes d'azote, mais elles sont moins marquées car la contribution des émissions du trafic routier est moins importante pour les PM_{10} et $PM_{2.5}$ que pour les NO_x .

En moyenne, les concentrations hivernales en particules sont plus élevées que les concentrations estivales, car il y a plus d'émissions en hiver (utilisation du chauffage) et les conditions de dispersions sont moins bonnes à cette saison (c.f. section 2.7).

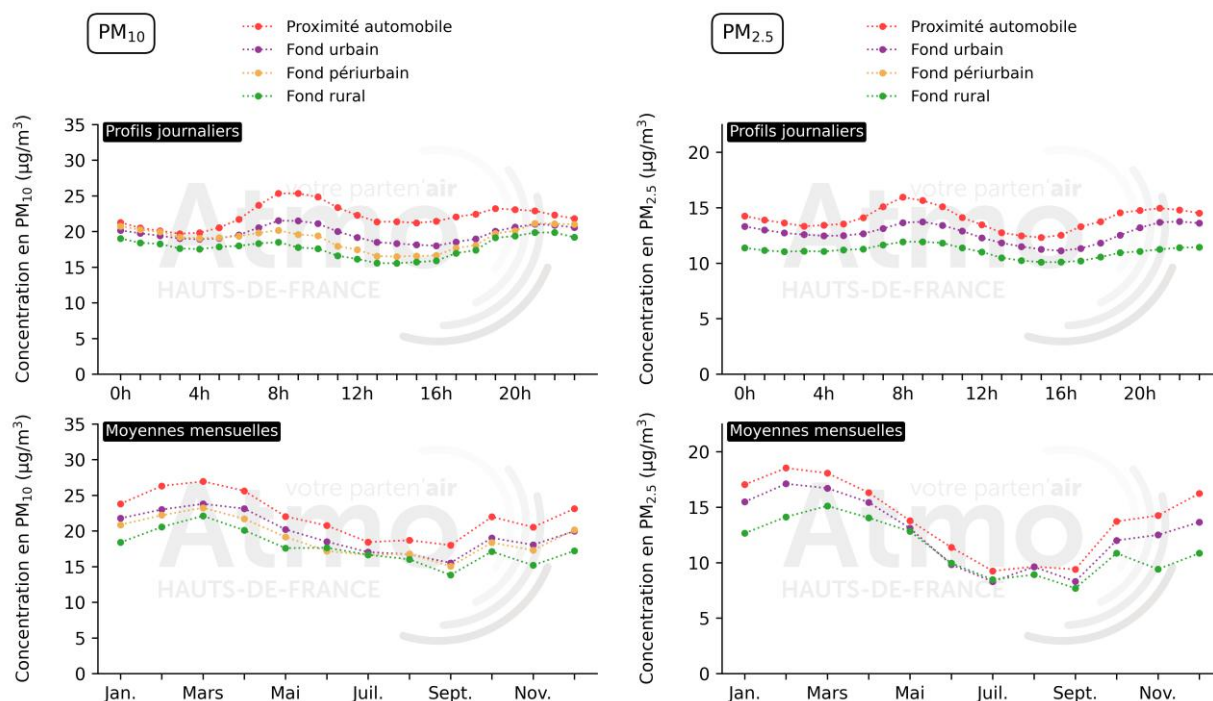


Figure 11 : Profils journaliers et annuels des particules PM_{10} (à gauche) et $PM_{2.5}$ (à droite) dans les Hauts-de-France sur la période 2015-2019. Les heures sont indiquées en TU (temps universel).

2.5.7. Le benzo(a)pyrène

Origines : Le benzo(a)pyrène ($C_{20}H_{12}$) est une espèce organique peu volatile ; il est donc mesuré dans les particules PM_{10} . Il fait partie de la famille chimique des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Tout comme les autres HAP, il est produit lors de processus de combustion incomplète. Dans la région Hauts-de-France, il est majoritairement émis par le secteur résidentiel-tertiaire (78 %, chauffage au bois notamment). La contribution des transports routiers aux émissions de benzo(a)pyrène est estimée à 16 %.

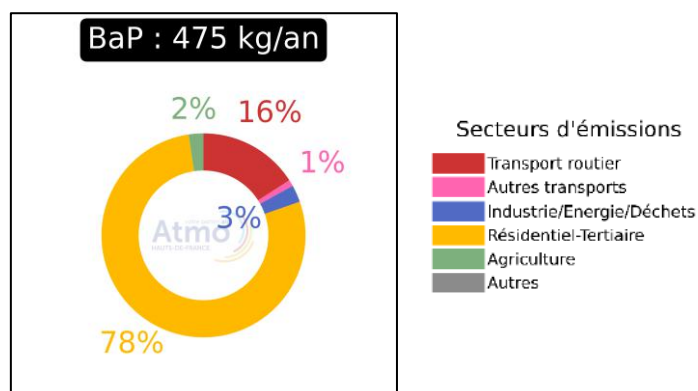


Figure 12 : Émissions de benzo(a)pyrène ($C_{20}H_{12}$) en 2015 dans la région Hauts-de-France.

Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : Le benzo(a)pyrène est considéré comme cancérigène ou potentiellement cancérigène.

Concentrations atmosphériques : les concentrations de fond en benzo(a)pyrène sont, en moyenne, relativement faibles par rapport aux seuils réglementaires. Des concentrations modérées ou élevées sont en revanche parfois observées à proximité de certaines plateformes industrielles.

2.5.8. L'arsenic, le cadmium, le plomb, et le nickel

Origines : L'arsenic (As), le cadmium (Cd), le plomb (Pb), et le nickel (Ni) sont des métaux lourds mesurés dans les particules PM_{10} . Ils sont émis dans l'atmosphère par la combustion de matière qui en contient, et par certains processus industriels. Le plomb est également un composant de certaines anciennes piles ou batteries. Celles-ci peuvent donc conduire à des émissions de plomb si elles ne sont pas traitées correctement une fois considérées comme des déchets.

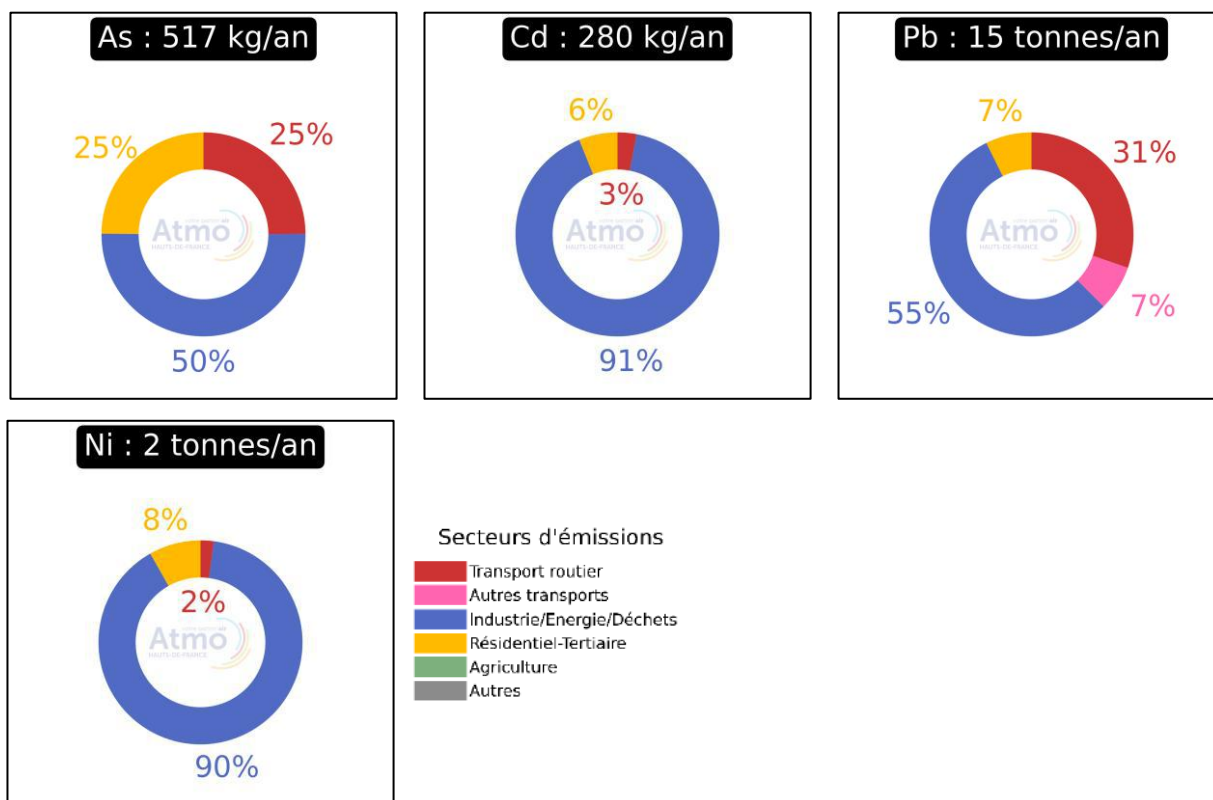


Figure 13 : Émissions d'arsenic (As), de cadmium (Cd), de plomb (Pb), et de nickel (Ni) en 2015 dans la région Hauts-de-France. Source des données : inventaire des émissions d'Atmo Hauts-de-France, version M2017_V6.

Effets sanitaires, environnementaux, et climatiques : Ces métaux lourds sont toxiques et associés à diverses maladies, notamment des cancers. Le plomb peut endommager le système nerveux et provoque le saturnisme.

Concentrations atmosphériques : les concentrations atmosphériques de fond en plomb ont fortement diminué depuis l'interdiction de son utilisation comme additif antidétonant dans l'essence. De manière plus générale, les concentrations de fond pour ces quatre métaux lourds sont relativement faibles par rapport aux seuils réglementaires sur la quasi-totalité du territoire. Des concentrations modérées ou élevées sont en revanche parfois observées à proximité de certaines plateformes industrielles.

2.5.9. Résumé des concentrations typiques

Le Tableau 2 présente un résumé des concentrations atmosphérique typiques dans les Hauts-de-France pour les polluants réglementés. Il est à noter que certaines de ces valeurs correspondent à un dépassement de seuil réglementaire (c.f. Section 3.3 pour plus de détails sur ces seuils).

Tableau 2 : Concentrations atmosphériques typiques dans les Hauts-de-France pour les polluants réglementés. Certains polluants sont mesurés avec un pas de temps d'une heure (ou plus fin). D'autres sont mesurés avec un pas de temps d'une journée ou d'une semaine.

	Court terme	Moyennes annuelles
SO ₂	Moyennes horaires : Quelques µg/m ³ presque partout et tout le temps. Pics jusqu'à quelques centaines de µg/m ³ pendant quelques heures en proximité industrielle.	1 ou 2 µg/m ³ en situation de fond. Jusqu'à quelques µg/m ³ en proximité industrielle
O ₃	Moyennes horaires : Généralement faibles la nuit. Quelques dizaines de µg/m ³ en journée l'hiver. De 80 à 200 µg/m ³ au maximum en milieu/fin d'après-midi l'été.	40 à 60 µg/m ³ .
CO	Moyennes horaires : Quelques fractions de mg/m ³ presque partout et tout le temps. Jusqu'à quelques mg/m ³ à proximité de grands axes routiers ou de sites industriels.	Quelques fractions de mg/m ³ .
PM _{2.5} et PM ₁₀	Moyennes horaires : Quelques µg/m ³ à 10 µg/m ³ quand les conditions de dispersion sont bonnes (pluie, vents). De plusieurs dizaines à une centaine de µg/m ³ en épisode de pollution aux particules.	PM _{2.5} : de 10 à 15 µg/m ³ . PM ₁₀ : de 15 à 25 µg/m ³ .
NO	Moyennes horaires : De quelques µg/m ³ à quelques dizaines de µg/m ³ . Exceptionnellement de 100 à 200 µg/m ³ . Proche de zéro la nuit.	De 1 µg/m ³ (fond rural) à 25 µg/m ³ (proximité automobile). Quelques µg/m ³ en fond urbain et périurbain.
NO ₂	Moyennes horaires : Quelques dizaines de µg/m ³ .	De 10 µg/m ³ (fond rural) à 30 µg/m ³ (proximité automobile).
Benzène	Moyennes horaires : Généralement moins de 1 µg/m ³ , avec des pics jusqu'à quelques µg/m ³ (voire quelques dizaines en proximité industrielle)	0.5 à 2 µg/m ³ .
Benzo(a)pyrène	Moyennes journalières : le plus souvent quelques fractions de ng/m ³ . Jusqu'à 1 ou 2 ng/m ³ ponctuellement en situation de fond. Jusqu'à quelques ng/m ³ ponctuellement en proximité industrielle.	0.1 ng/m ³ en situation de fond, jusqu'à 1.5 ng/m ³ en proximité industrielle.
Arsenic	Moyennes hebdomadaires : le plus souvent quelques fractions de ng/m ³ . Jusqu'à 1 ou 2 ng/m ³ en proximité industrielle.	Quelques fractions de ng/m ³ .
Cadmium	Moyennes hebdomadaires : le plus souvent quelques fractions de ng/m ³ . Jusqu'à quelques ng/m ³ en proximité industrielle.	Quelques fractions de ng/m ³ . Jusqu'à quelques ng/m ³ en proximité industrielle.
Plomb	Moyennes hebdomadaires : Quelques unités ou quelques dizaines de ng/m ³ , voire quelques centaines en proximité industrielle.	De quelques ng/m ³ à une dizaine de ng/m ³ en situation de fond. Jusqu'à quelques dizaines de ng/m ³ en proximité industrielle.
Nickel	Moyennes hebdomadaires : le plus souvent quelques fractions de ng/m ³ . Jusqu'à quelques ng/m ³ en situation de fond et quelques dizaines voire centaines de ng/m ³ en proximité industrielle.	Quelques ng/m ³ ou moins en situation de fond. Jusqu'à quelques dizaines de ng/m ³ en proximité industrielle.

2.6. Répartition géographique des polluants

Le monoxyde d'azote (NO) est parfois qualifié de polluant « local », car ses concentrations peuvent varier brusquement entre deux localisations proches l'une de l'autre ; les concentrations de ce polluant dépendent donc fortement des sources d'émissions situées à proximité du point de mesure. Le NO est un polluant primaire et sa durée de vie dans l'atmosphère est courte. Les concentrations en NO sont donc fortes près des points d'émissions et diminuent rapidement lorsque l'on s'éloigne de la source.

À l'inverse, les particules en suspension et l'ozone soit parfois qualifiés de polluants « régionaux », ce qui signifie que leurs concentrations peuvent être relativement homogènes sur une large zone, et ce qui implique que leurs concentrations sont influencées par de nombreuses sources, potentiellement situées loin du point de mesure. En effet, ces polluants ont une durée de vie dans l'atmosphère qui est relativement longue (19 jours pour l'ozone⁹ et jusqu'à environ deux semaines pour les particules), ce qui favorise leur mélange et leur dilution dans l'atmosphère par les mouvements de l'air. De plus, l'ozone est un polluant secondaire ; ses précurseurs¹⁰ peuvent également être dilués et mélangés dans l'atmosphère avant de conduire à la formation d'ozone. Il en est de même pour certains composants des particules.

Le dioxyde d'azote (NO₂) est un cas intermédiaire. La Figure 14 illustre cette différence de répartition géographique : les moyennes annuelles 2018 en PM₁₀ sont plus homogènes dans la région Hauts-de-France que celles du NO₂. Cette répartition des polluants a une implication pour la conception et l'exploitation de campagnes de mesures. Par exemple, il est attendu que deux mesures de fond en particules PM₁₀ dans une même zone urbaine soient plus comparables entre elles que deux mesures de fond de monoxyde d'azote ou de dioxyde d'azote. De plus, il est généralement plus facile d'identifier les sources de pollution primaire et locale à l'aide de mesures que d'identifier les sources de pollution secondaire et régionale.¹¹

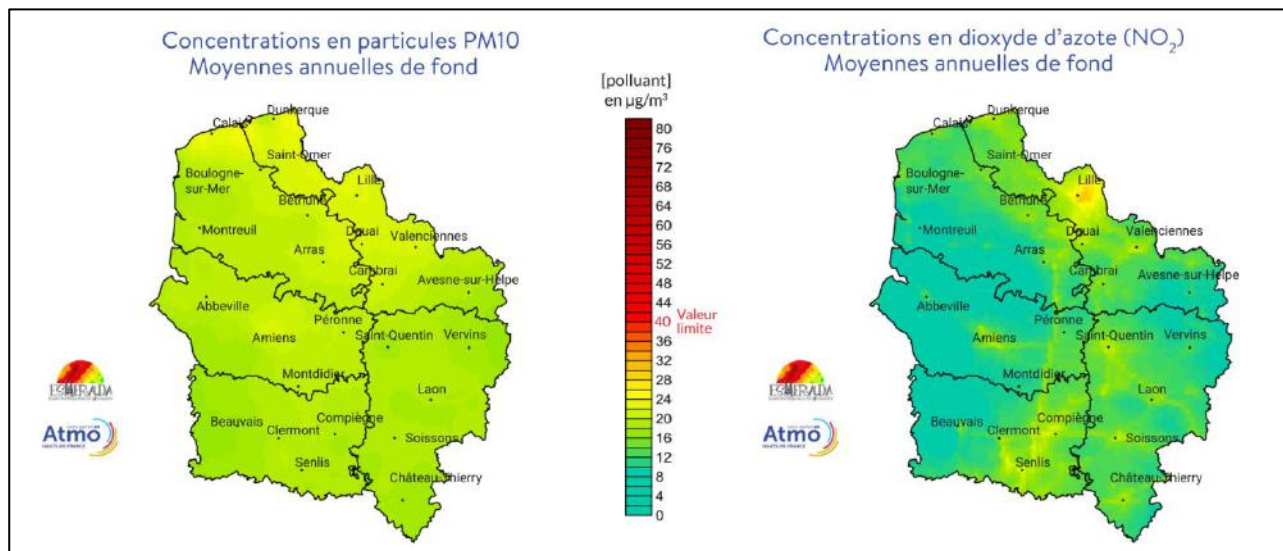


Figure 14 : Moyennes annuelles 2018 en PM₁₀ (à gauche) et NO₂ (à droite) modélisées pour la région Hauts-de-France.

Les polluants dont les émissions sont dominées par le secteur de l'industrie (notamment le SO₂, le

⁹ Source : J. H. Seinfeld et S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*, 3^{ème} édition, John Wiley & Sons, Inc., 2016, page 195, citant L. T. Murray *et al.* Factors controlling variability in the oxidative capacity of the troposphere since the Last Glacial Maximum, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 3589–3622, 2014.

¹⁰ Il est rappelé qu'un précurseur est une espèce chimique qui peut conduire, à l'aide de réactions physico-chimiques, à la formation d'un polluant directement dans l'atmosphère. Par exemple, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils sont des précurseurs de l'ozone.

¹¹ Source : <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/how-use-air-sensors-air-sensor-guidebook>, consulté le 28/01/2021.

benzo(a)pyrène, et certains métaux lourds) sont également des polluants locaux ; les concentrations sont élevées seulement à proximité des industries qui les rejettent en quantité dans l'air.

Pour résumer, les concentrations d'un polluant dans l'atmosphère sont d'autant plus uniformes géographiquement que :

- Le polluant a une longue durée de vie dans l'atmosphère.
- Le polluant est un polluant secondaire.
- Les sources de ce polluant et/ou de ses précurseurs sont réparties de manière homogène sur le territoire.

2.7. Influence de la météorologie sur les concentrations en polluants atmosphériques

Les concentrations atmosphériques en polluants dépendent bien évidemment des quantités de polluants émises, mais également des conditions météorologiques. Par exemple :

- Les **vents forts** (e.g. **conditions cycloniques**) dispersent mieux les polluants que les vents faibles. À l'inverse, les **conditions anticycloniques** peuvent conduire à une accumulation des polluants.
- Les **mouvements convectifs** favorisent la dispersion des polluants.
- Les **brises de mer** peuvent amener soudainement de l'air peu pollué ou très pollué depuis la mer vers les zones côtières habitées.
- Un fort **ensoleillement** et des **températures élevées** favorisent la formation de certains polluants dans l'atmosphère car ces paramètres rendent la chimie plus active (ozone, particules secondaires organiques, etc.). Inversement, des **températures faibles** peuvent favoriser la formation d'autres composants des particules (composants inorganiques, etc.).
- L'**humidité**, la **brume**, et le **brouillard** peuvent favoriser la formation de particules et d'autres polluants.
- Les **précipitations** nettoient l'atmosphère de certains polluants (particules, polluants gazeux solubles, etc.).

La **hauteur de couche limite** détermine la hauteur de l'atmosphère sur laquelle les polluants sont bien mélangés. Plus cette hauteur est élevée, plus les polluants sont dilués verticalement. La hauteur de la couche limite dépend, entre autres, de l'ensoleillement, si bien qu'elle est typiquement faible la nuit, augmente en journée, et est maximale l'après-midi. La Figure 15 illustre l'influence de la hauteur de couche limite sur les concentrations en particules PM₁₀ mesurées à la station de Lille Fives du 26 au 29 août 2017. La nuit, la hauteur de couche limite est faible, donc les particules sont réparties sur une faible épaisseur de l'atmosphère, et les concentrations sont élevées. Dès le début de la journée, la hauteur de couche limite augmente. Par conséquent, les particules deviennent diluées sur une plus grande hauteur et leur concentration diminue. En fin de journée, la hauteur de la couche limite diminue et les concentrations en particules augmentent à nouveau. Comme la hauteur de couche limite dépend beaucoup de l'ensoleillement, les conditions de dispersion sont, en moyenne, meilleures en été qu'en hiver.

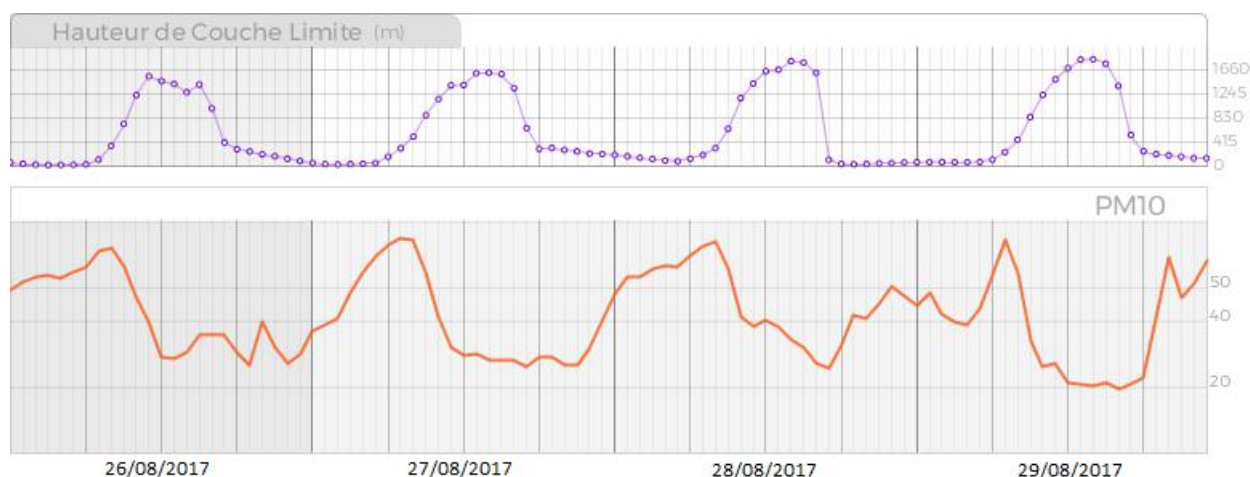


Figure 15 : Hauteur de couche limite (en haut ; en mètres) à Lille modélisée par la plateforme Esmeralda et concentrations en particules PM₁₀ (en bas ; en µg/m³) mesurées à la station de Lille Fives du 26 au 29 août 2017. Les données affichées sont des moyennes horaires. Graphique produit par le logiciel CMM (comparaison modèles-mesures).

- Une **inversion de température** ou **couche d'inversion** est une couche de l'atmosphère où la température de l'air augmente avec l'altitude¹². Une telle couche est très stable, et il est très difficile pour les polluants situés sous cette inversion de pénétrer dans l'inversion. Par conséquent, une inversion de température agit comme un couvercle qui empêche la dilution verticale des polluants (ainsi que des brumes et des brouillards), ce qui favorise leur accumulation. Par exemple, sur la photo ci-dessous (Figure 16), une inversion de température emprisonne la brume en dessous d'une certaine hauteur.

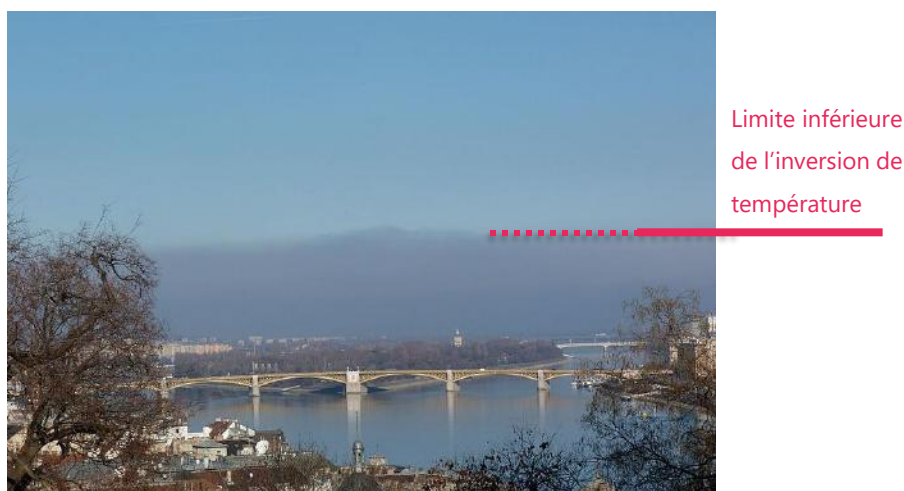


Figure 16 : Effet visible d'une inversion de température à Margaret Island, Budapest.
Photo par : Derzsi Elekes Andor. License : Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Source : <https://en.wikipedia.org>, consulté le 05/09/2019.

Les inversions de température peuvent se former de diverses façons. Elles sont couramment formées la nuit en période hivernale lorsque le sol, perdant rapidement l'énergie emmagasinée pendant la journée, se refroidit. L'air près du sol est alors refroidi à son tour (plus rapidement que l'air situé un peu plus haut), ce qui conduit à la formation d'une inversion de température près du sol (Figure 17). Le matin, sous l'effet du soleil, le sol se réchauffe, puis transfère sa chaleur à l'air situé près du sol. L'inversion de température s'élève alors et peut disparaître plus tard dans la journée si l'ensoleillement

¹² En moyenne, dans la troposphère (c'est-à-dire la couche de l'atmosphère située près du sol jusqu'à environ 10 km d'altitude), la température diminue avec la hauteur.

est suffisant. D'autres phénomènes de formation d'inversion de température existent, par exemple lorsqu'une brise marine fraîche se glisse sous une couche d'air continental plus chaud.

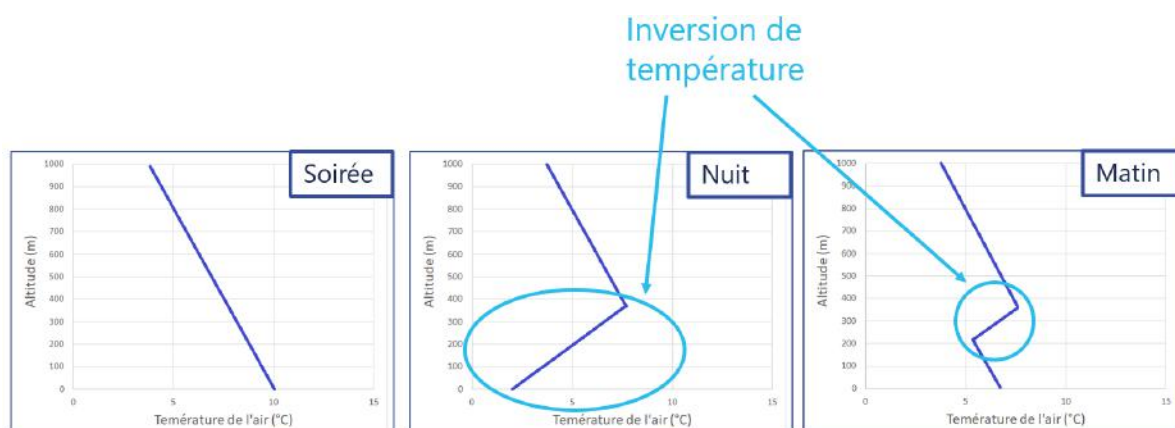


Figure 17 : Représentation schématisée de la formation d'une inversion de température par refroidissement de l'air par le sol. Sur chaque graphique est représentée la température de l'air sur l'axe des abscisses et l'altitude sur l'axe des ordonnées.

Comme indiqué ci-dessus, certains paramètres météorologiques peuvent avoir des effets multiples sur les polluants. Par exemple, un fort ensoleillement en été favorise la formation chimique d'ozone dans l'atmosphère (augmentation des concentrations), mais favorise également l'augmentation de la hauteur de la couche limite (diminution des concentrations). La détermination de l'effet combiné de tous les paramètres météorologiques sur les concentrations en polluants est donc complexe et nécessite souvent l'analyse d'un grand nombre de données.

3. Organisation de la surveillance de la qualité de l'air en France

3.1. Une organisation à plusieurs échelles

L'organisation de la surveillance de la qualité de l'air en France découle de législations à plusieurs échelles (Figure 18). La législation de l'Union Européenne régit notamment, à travers les directives 2008/50/CE et 2004/107/CE :

- Les seuils annuels réglementaires en air ambiant, c'est-à-dire les concentrations de polluants à ne pas dépasser en air extérieur (ces seuils sont repris dans l'article R221-1 du code de l'environnement).
- Les principes généraux de la surveillance, par exemple le nombre de points de prélèvements à mettre en place pour la surveillance de chaque polluant.

Cette réglementation européenne est déclinée dans la législation française par l'arrêté ministériel du 19 avril 2017 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant (modifié le 17 juillet 2019). La gestion des épisodes de pollution est décentralisée : elle est gérée par les préfetures. Dans la région Hauts-de-France, cette gestion est régie par un arrêté interdépartemental datant du 5 juillet 2017.



Figure 18 : Les niveaux de réglementation de l'air ambiant en France.

3.2. Les acteurs de la qualité de l'air en France

À l'échelle nationale :

- Le **Ministère de la Transition Écologique** « *élabore et met en œuvre la politique de lutte contre [...] la pollution atmosphérique* ». ¹³ Cette politique établit les règles de la surveillance de la qualité de l'air, ainsi que l'information du public et la prévention des risques liés à la pollution atmosphérique.
- Le **Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA)** assure, entre autres, la coordination technique et scientifique de la surveillance et de l'amélioration des connaissances, garantit la qualité des données produites, et organise le rapportage des résultats de la surveillance auprès de l'Union Européenne. Le LCSQA est composé de membres provenant de trois institutions :
 - **L'INERIS** (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques),
 - **Le LNE** (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais), et
 - **L'IMT** de Lille-Douai (École Nationale Supérieure Mines-Telecom Lille-Douai).
- La fédération **Atmo France** est une association de type loi 1901 qui fédère l'activité des associations de surveillance de la qualité de l'air et mène des actions de communication et de sensibilisation à l'échelle nationale sur le sujet de l'air.

À l'échelle régionale, les **Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA)**, surveillent la qualité de l'air sur leur territoire, en informent le public, le LCSQA, et les autorités, et accompagnent les acteurs locaux (industries, collectivités, etc.) dans le but d'améliorer la qualité de l'air. Il existe une AASQA pour chaque région administrative en France y compris en outremer. Les AASQA sont des associations de type loi 1901. Leur conseil d'administration est réparti à parts égales entre 4 collèges :

- Les citoyens (universitaires, médecins, association de protection de l'environnement, etc.),
- Les élus (municipalités, inter-municipalités, conseils départementaux et régional),

¹³ Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/organisation-generale-bulletin-officiel-et-projet-loi-finances>, consultée le 3 décembre 2020.

- Les acteurs économiques (industries), et
- Les représentants des services de l'État (membres de la DREAL, etc.).

Atmo Hauts-de-France est l'AASQA de la région des Hauts-de-France.

Outre les AASQA, les acteurs de la qualité de l'air à l'échelle locale incluent : les mairies et les collectivités, les acteurs de la santé dont l'Agence Régionale de Santé (ARS), les acteurs économiques, les universités et centres de recherche, la Direction Régionale de l'Aménagement et du Territoire (DREAL), la presse, les associations de protection de l'environnement et des citoyens, etc.

3.3. Les seuils de pollution en air ambiant

Les seuils de pollution en air ambiant en vigueur en France sont présentés dans le Tableau 3. Il est important de distinguer :

- Les **seuils annuels** : valeurs limites, valeurs cibles, et objectifs de qualité. Ces seuils sont des statistiques portant sur les mesures d'une année entière et qui sont typiquement **calculées en différé, c'est-à-dire au début de l'année N+1 pour l'année N**. Par exemple, pour chaque station qui mesure les particules PM₁₀, le nombre de jours où la moyenne journalière a dépassé 50 µg/m³ est comptabilisé. La valeur limite pour ce polluant est dépassée à chaque station où ce nombre de jour est strictement supérieur à 35. De même, la valeur limite en PM₁₀ est dépassée à chaque station où la moyenne annuelle est strictement supérieure à 40 µg/m³. Pour un polluant donné, la valeur cible est plus difficile à respecter que la valeur limite, mais la pression réglementaire de respecter la valeur limite est plus forte ; de même entre l'objectif de qualité et la valeur cible, respectivement (Figure 19). Ainsi, l'Union Européenne a déjà mis en demeure la France pour l'insuffisance des actions mises en place pour assurer le respect des valeurs limites, dépassées pour les PM₁₀ ou le NO₂ par endroits. Les valeurs cibles et objectifs de qualité, plus difficiles à respecter, n'ont pas fait l'objet de telles mises en demeure de la France à l'heure actuelle. Certains polluants n'ont pas de valeur limite, valeur cible, ou objectif de qualité, mais au moins l'un de ces trois seuils est défini pour chaque polluant réglementé.

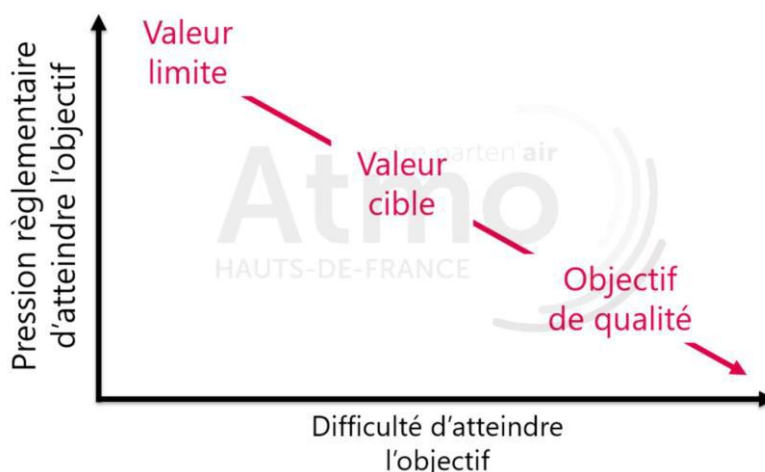


Figure 19 : Conceptualisation de la différence entre valeur cible, valeur limite, et objectif de qualité.

- Les **seuils définis pour la gestion des épisodes de pollution en temps réel** (au jour-le-jour) : seuil d'information et de recommandation et seuil d'alerte. Ces seuils n'existent que pour 4 polluants (dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, ozone, et particules PM₁₀). Chaque jour, les AASQA contrôlent si l'un de ces seuils a été dépassé la veille, et, dans le cas des PM₁₀ et de l'ozone, prévoient si l'un de ces

seuils risque d'être dépassé le jour même et/ou le lendemain.

Un dépassement du seuil d'information et de recommandation, même de courte durée, « *présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population* ». ¹⁴ Lorsqu'un dépassement de ce seuil est prévu, les services préfectoraux émettent des informations « *à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions* ». ¹⁴ Ces informations permettent notamment aux personnes sensibles d'adapter leurs activités pour se protéger de la pollution.

Un dépassement du seuil d'alerte, même de courte durée, « *présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement* » ¹⁴. Lorsqu'un dépassement de ce seuil est prévu, les services préfectoraux peuvent mettre en place des mesures d'urgence pour réduire les émissions. Ces mesures peuvent inclure, par exemple, des réductions obligatoires de vitesse sur les routes, la circulation différenciée ¹⁵, ainsi que des restrictions sur l'activité industrielle et agricole. Des mesures contraignantes peuvent également être mises en œuvre lorsqu'un dépassement du seuil d'information et de recommandation est prévu pour le jour même et le lendemain (le terme « alerte sur persistance » est employé dans ce cas).

¹⁴ Source : Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air, par le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat.

¹⁵ La circulation différenciée est l'interdiction temporaire de circulation, sur une zone définie, pour les véhicules les plus émetteurs. Le niveau d'émissions d'un véhicule est représenté par la vignette Crit'Air qui porte un chiffre de 1 (véhicules les moins polluants) à 5 (véhicules les plus polluants). La circulation différenciée peut, par exemple, interdire temporairement la circulation des véhicules ayant un numéro Crit'Air de 4 ou plus.

Tableau 3 : Seuils de pollution en air ambiant en vigueur en France.

Polluant	Normes				
	Valeur limite	Valeur cible	Objectif de qualité / Objectif à long terme	Seuil d'information et de recommandation	Seuil d'alerte
Dioxyde de soufre (SO ₂)	125 µg/m³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 3 jours/an		50 µg/m³ en moyenne annuelle	300 µg/m³ en moyenne horaire	500 µg/m³ en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
	350 µg/m³ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 24 heures/an				
Dioxyde d'azote (NO ₂)	40 µg/m³ en moyenne annuelle			200 µg/m³ en moyenne horaire	400 µg/m³ en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives ou 200 µg/m³ en moyenne horaire ***
	200 µg/m³ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures/an				
Ozone (O ₃)		Protection de la santé 120 µg/m³ en moyenne sur 8 heures glissantes à ne pas dépasser plus de 25 jours/an (moyenne calculée sur 3 ans)	Protection de la santé 120 µg/m³ en moyenne sur 8 heures glissantes	180 µg/m³ en moyenne horaire	Seuil 1 : 240 µg/m³ en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
		Protection de la végétation 18 000 µg/m³.h pour l'AOT40** (moyenne calculée sur 5 ans)	Protection de la végétation 6 000 µg/m³.h pour l'AOT40**		Seuil 2 : 300 µg/m³ en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
					Seuil 3 : 360 µg/m³ en moyenne horaire
Particules en suspension (PM10)*	40 µg/m³ en moyenne annuelle		30 µg/m³ en moyenne annuelle	50 µg/m³ en moyenne journalière sur 24 heures ****	80 µg/m³ en moyenne journalière sur 24 heures
	50 µg/m³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours/an				
Particules en suspension (PM2,5)*	25 µg/m³ en moyenne annuelle	20 µg/m³ en moyenne annuelle	10 µg/m³ en moyenne annuelle		
Monoxyde de carbone (CO)	10 mg/m³ en moyenne sur 8 heures glissantes				
Benzène (C ₆ H ₆)	5 µg/m³ en moyenne annuelle		2 µg/m³ en moyenne annuelle		
Plomb (Pb)	0,5 µg/m³ en moyenne annuelle		0,25 µg/m³ en moyenne annuelle		
Arsenic (As)		6 ng/m³ en moyenne annuelle			
Cadmium (Cd)		5 ng/m³ en moyenne annuelle			
Nickel (Ni)		20 ng/m³ en moyenne annuelle			
Benzo(a)pyrène (C ₂₀ H ₁₂)		1 ng/m³ en moyenne annuelle			

4. Mesure des concentrations en particules à l'aide des micro-capteurs AIREKA

4.1. Introduction à la mesure de la qualité de l'air

Comme évoqué dans la section 2 de ce guide, l'étude de l'atmosphère et de sa pollution est un sujet complexe. Il existe en effet de nombreux polluants de l'air. Certains se trouvent sous forme gazeuse, d'autres sous forme de particules. De plus, les sources d'émissions et la durée de vie des polluants dans l'atmosphère sont différentes d'un polluant à un autre.

Cette complexité se retrouve également dans les techniques de mesure de la pollution atmosphérique. Puisque tous les polluants ont des propriétés physiques et chimiques différentes, des techniques de mesure propres à chaque composé doivent être développées. Par exemple, les concentrations en ozone sont généralement mesurées en analysant l'interaction de l'échantillon pollué avec un rayonnement ultra-violet, et deux méthodes sont actuellement utilisées de manière opérationnelle par Atmo Hauts-de-France pour mesurer les concentrations en particules dans l'air :

- L'une de ces méthodes consiste à accumuler les particules sur une bande de papier puis à mesurer l'interaction de ces particules avec un rayonnement radioactif (rayonnement bêta).
- L'autre consiste à accumuler les particules sur un filtre fixé à un composant en quartz qui est mis en oscillation. La fréquence d'oscillation de ce quartz varie en fonction de la masse de particules accumulée sur le filtre, ce qui permet d'en déduire la concentration en particules dans l'air.

Les appareils de mesures utilisés par Atmo Hauts-de-France et les autres AASQA pour la surveillance réglementaire de la qualité de l'air en France répondent à des critères de qualité très stricts. Ces appareils sont en revanche généralement coûteux (plusieurs dizaines de milliers d'euros), encombrants, et nécessitent une maintenance technique pointue. Les micro-capteurs sont plus économiques, plus portatifs, nécessitent moins de maintenance, et consomment moins d'énergie. Les mesures qu'ils produisent sont néanmoins de moindre qualité. Les technologies de mesure mises en œuvre dans les micro-capteurs peuvent différer des technologies employées pour la surveillance réglementaire.

4.2. Le micro-capteur co-développé avec Kanope

Le micro-capteur développé avec Kanope résulte de l'assemblage de plusieurs composants, entre autres :

- Un circuit électronique imprimé.
- Une cellule de mesure des concentrations en particules PM_{2.5} et PM₁₀.
- Une ligne de prélèvement en plastique.
- Un capteur de température et un capteur d'humidité relative.
- Un microcontrôleur programmable (≈ ordinateur miniature).

- Un module de communication (pour transférer les données mesurées), qui comprend une antenne LoRa.¹⁶
- Un boîtier suffisamment étanche (indice de protection : IP65) pour permettre le déploiement du micro-capteur en milieu extérieur.

La cellule de mesure (modèle : Nova Fitness¹⁷ SDS011) détermine les concentrations en particules en faisant passer l'air au travers d'un faisceau LASER. L'analyse de l'interaction entre l'air pollué et le faisceau permet de déterminer le nombre et la taille des particules contenues dans l'air. Une hypothèse est ensuite faite sur la densité des particules pour en déduire la concentration en PM₁₀ et PM_{2.5} (en µg/m³ ou ng/m³). Le fabricant indique les caractéristiques suivantes pour la cellule :

Tableau 4 : caractéristiques techniques indiquées par le fabricant pour la cellule de mesure Nova Fitness SDS011.

Source : <http://inovafitness.com/en/a/chanpinzhongxin/95.html>, consultée le 15/02/2021.

Caractéristique technique	Valeur
Paramètres mesurés	Concentrations en PM _{2.5} et PM ₁₀
Plage de mesure	De 0.0 à 999.9 µg/m ³
Voltage	5 V
Courant	70 ± 10 mA
Courant en mode veille	< 4 mA
Plage de température	Stockage : -20 à +60 °C Utilisation : -10 à +50 °C
Plage d'humidité relative	Stockage : 90 % au maximum Utilisation : 70 % au maximum
Plage de pression atmosphérique	86 à 110 kPa
Taille minimale de détection des particules	0.3 µm
Taux de détection des particules	70 % pour les particules de 0.3 µm 98 % pour les particules de 0.5 µm
Incertitude sur la mesure pour une température de 25 °C et une humidité relative de 50 %	Incertitude relative : jusqu'à ± 15 % Incertitude absolue : jusqu'à ± 10 µg/m ³

La qualité des données produites peut dépendre des conditions atmosphériques au moment de la mesure (température, humidité relative, pression atmosphérique).

L'acquisition des mesures et la transmission des données est gérée par un microcontrôleur (modèle : *Arduino*¹⁸ *mkr 1300*). Celui-ci peut être programmé afin d'ajuster la fréquence et la durée d'acquisition des mesures. La transmission des données s'effectue via un réseau LoRaWAN vers une passerelle (aussi appelée « Gateway ») LoRa. Cette dernière transfère ensuite, via Internet, les données mesurées vers un serveur géré par Kanope. Une fois stockées sur ce serveur, les données sont consultables depuis un navigateur web à l'aide d'une interface graphique développée par Kanope. Elles peuvent également être téléchargées au format CSV (comma-separated values) depuis ladite interface. Un compte avec mot de passe est nécessaire pour l'accès aux données.

4.3. Autonomie du micro-capteur

Le micro-capteur peut être branché sur le secteur à l'aide d'un adaptateur de courant similaire à ceux utilisés pour la plupart des téléphones portables actuels (sortie 5 V). Il peut également être alimenté par une batterie

¹⁶ LoRa (long range) est une technologie de transmission sans fil de données. Selon les besoins, les futures versions du micro-capteur pourraient inclure d'autres modes de transmission des données (Bluetooth, Wifi, 3G, 4G, etc.).

¹⁷ Site Internet du fabricant : <http://inovafitness.com/en/a/index.html>.

¹⁸ Site Internet du fabricant : <https://www.arduino.cc>.

ou un powerbank. Dans ce cas, l'autonomie du micro-capteur dépend de :

- La capacité de la batterie ou du powerbank utilisé.
- La fréquence de la prise de mesures (par exemple : une prise de mesure toutes les 30 minutes).
- La durée de chaque prise de mesure (exemple : prise de mesures pendant deux minutes).

Certains powerbanks se mettent en veille si aucun appel de courant n'est effectué pendant un certain temps. Dans ce cas, si l'intervalle entre deux prises de mesures est supérieur au délai de mise en veille du powerbank, il est nécessaire de configurer le microcontrôleur pour qu'il effectue un appel de courant régulièrement entre les prises de mesure afin d'empêcher la mise en veille du powerbank. Cette contrainte réduit l'autonomie du micro-capteur. Il est néanmoins possible de recharger la batterie ou le powerbank pendant l'utilisation du capteur à l'aide de panneaux solaires. Dans ce cas, une puissance nominale de 20 W environ est recommandée.

Les guides de montage¹⁹ et de configuration des micro-capteurs rédigés par Kanope expliquent plus en détail comment configurer l'appareil pour en contrôler l'autonomie.

5. Guide pour la mise en place de campagnes de mesure par micro-capteurs

Les étapes principales pour la mise en place de campagnes de mesures de la qualité de l'air sont :

1. **Définir les objectifs de l'étude**, c'est-à-dire définir une ou des questions auxquelles la campagne de mesures peut apporter des réponses.
2. **Concevoir une campagne de mesures** qui permet d'atteindre les objectifs de l'étude (liste des polluants à mesurer, choix des capteurs à utiliser, choix du nombre et de l'emplacement des points de mesures, choix de la durée de la campagne, etc.).
3. **Réaliser les mesures.**
4. **Exploiter et communiquer les données.**

Les sections qui suivent détaillent ces différentes étapes, après avoir présenté du vocabulaire utile pour la classification des points de mesures en fonction de leurs objectifs.

5.1. Typologie des stations et des mesures

Il existe une classification définie par le LCSQA et applicable par les AASQA pour décrire chaque point de mesure en fonction de son environnement d'implantation et les sources d'émissions qui peuvent influencer la mesure. L'utilisation de cette classification et du vocabulaire qu'elle définit peut s'avérer utile pour la description et la mise en place d'une campagne de mesure. Une synthèse de cette classification est présentée ci-dessous.²⁰

L'emplacement d'un point de mesure est décrit par son environnement d'implantation :

¹⁹ Ces guides sont consultables par le lien suivant : https://github.com/Kanope/DIY_PM.

²⁰ La méthode de classification est définie en détail par le LCSQA. Le guide en vigueur à ce sujet en date de décembre 2020 s'intitule « Conception, implantation et suivi des stations françaises de surveillance de la qualité de l'air (février 2017) ». Il a été rédigé par LCSQA et est disponible sur <https://www.lcsqa.org/fr>.

- Milieu urbain,
- Milieu périurbain, ou
- Milieu rural.

Chaque mesure de polluant à un emplacement donné est ensuite classifiée selon le type d'influence prédominante :

- Mesure de **fond** : les concentrations mesurées ne sont pas dominées par une source précise, mais représentent l'**exposition moyenne** de la population de la zone située autour de la station. En d'autres termes, ces mesures représentent le mélange de pollution, et non pas l'influence d'une source spécifique.

Selon l'environnement d'implantation de la station, la mesure peut être une mesure de fond urbain, périurbain, ou rural. Par exemple, la station « Amiens Saint-Pierre » mesure les niveaux de fond urbain à Amiens (Figure 20).

- Mesure **sous influence trafic** (ou mesure de **proximité automobile**) : les mesures sont influencées de manière significative par un ou plusieurs axes routiers situés à proximité de la station. Par exemple, la station de « Roubaix Serres » dans la Métropole Européenne de Lille (MEL) mesure des concentrations fortement influencées par le Boulevard de la Laine (Figure 21).
- Mesure **sous influence industrielle** (ou mesure de **proximité industrielle**) : les mesures sont influencées de manière significative par une ou plusieurs sources industrielles situées à proximité de la station. Par exemple, la station de Mardyck dans le dunkerquois mesure des concentrations fortement influencées par les activités industrielles environnantes (Figure 22).

Il est important de noter que les mesures sous influence industrielle ou trafic ne sont généralement pas représentatives des niveaux de pollution sur une large zone géographique, mais sur une zone restreinte autour du point de mesure. Il est possible que plusieurs polluants mesurés au même endroit aient des influences prédominantes différentes. Ce cas est rare cependant.



Figure 20 : Station « Amiens Saint-Pierre », qui mesure la pollution de fond urbain à Amiens.
Fond de carte © OpenStreetMap.

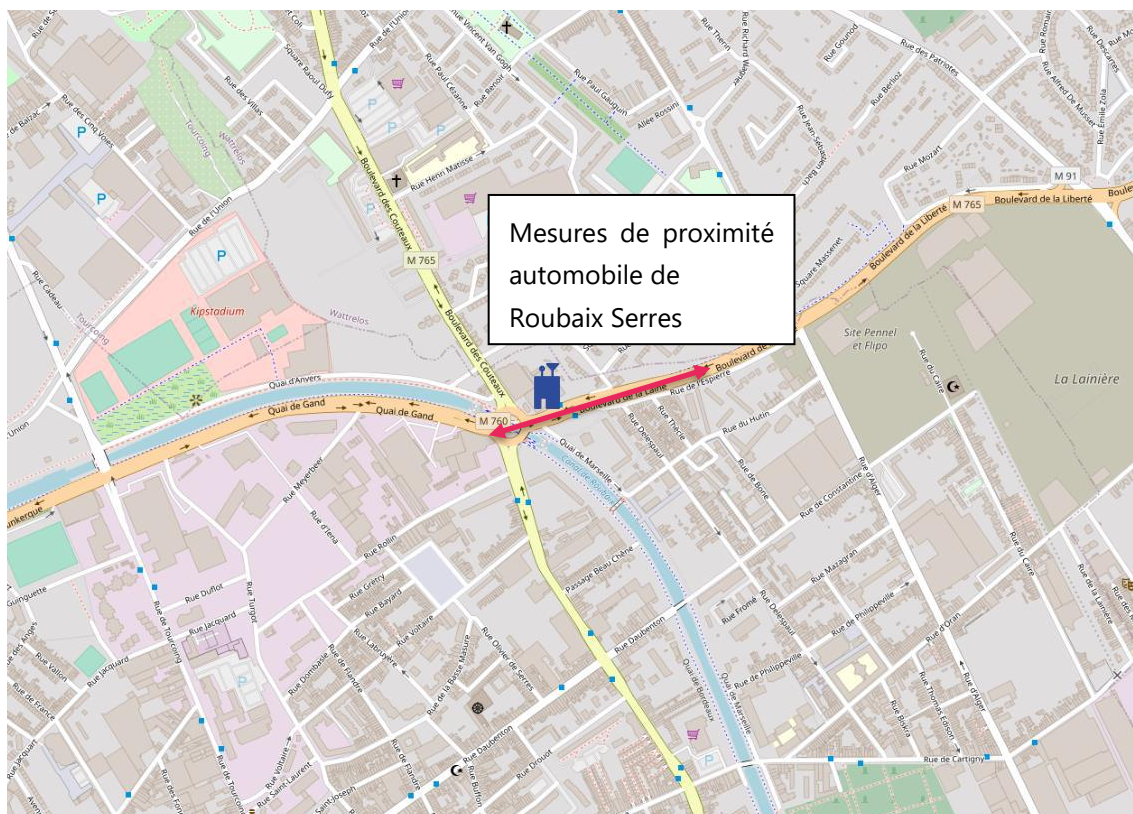


Figure 21 : Station de mesure « Roubaix Serres » dans la Métropole Européenne de Lille (MEL), qui mesure les concentrations en proximité automobile. Fond de carte © OpenStreetMap.



Figure 22 : Station de mesures de Mardyck, dans la Communauté Urbaine de Dunkerque (CUD). Cette station mesure les concentrations en proximité industrielle.

5.2. Définir les objectifs de l'étude

La conception d'une campagne de mesures dépend fortement des objectifs visés. Cette section présente des exemples d'objectifs, et explique comment définir une stratégie permettant de les atteindre.

5.2.1. Déterminer les niveaux moyens de fond

Afin de déterminer les niveaux moyens de fond pour une zone donnée, un point de mesure suffit généralement. En effet, par définition, les niveaux de fond représentent le mélange de pollution et non pas l'influence d'une source en particulier. Ils peuvent ainsi être représentatifs des concentrations sur une zone de quelques centaines de mètres de rayon (voire plus), si certaines caractéristiques de ladite zone varient peu :

- Densité de population.
- Densité du réseau routier.
- Type d'activité de la zone (zone résidentielle, zone commerciale, etc.).
- Absence de sources influençant fortement les concentrations localement (usines, autoroutes, etc.).

Si les ressources allouées à l'étude le permettent, d'autres points de mesure des niveaux de fond pour la même zone peuvent être ajoutés. Les concentrations (principalement pour l'ozone O_3 , les $PM_{2.5}$, les PM_{10} , et dans une certaine mesure le NO_2) mesurées à ces différentes localisations devraient alors être comparables et corrélées entre elles si les points de prélèvements sont en effet représentatifs des niveaux de fond.

5.2.2. Déterminer l'impact d'une source d'émissions sur la qualité de l'air

L'influence d'une source d'émissions sur la qualité de l'air peut être étudiée en plaçant des capteurs de part et d'autre de ladite source (Figure 23). Si, pour une direction de vent, les mesures en aval de la source sont systématiquement plus élevées que les mesures effectuées en amont, alors il est vraisemblable que la différence soit due à l'influence de la source (et/ou à l'influence des autres sources situées entre les points de mesures). Plus le nombre de capteurs repartis autour de la source est grand, plus il est possible de faire la différence entre l'impact de cette source et l'impact des autres sources situées entre les capteurs.

Un minimum de deux capteurs est nécessaire. Dans ce cas, il est préférable d'aligner la source et les points de prélèvement avec la direction des vents dominants, afin de maximiser le nombre de concentrations mesurées quand l'un des deux capteurs est en amont de la source et l'autre en aval. Dans les Hauts-de-France, les vents dominants soufflent du sud-ouest vers le nord-est.

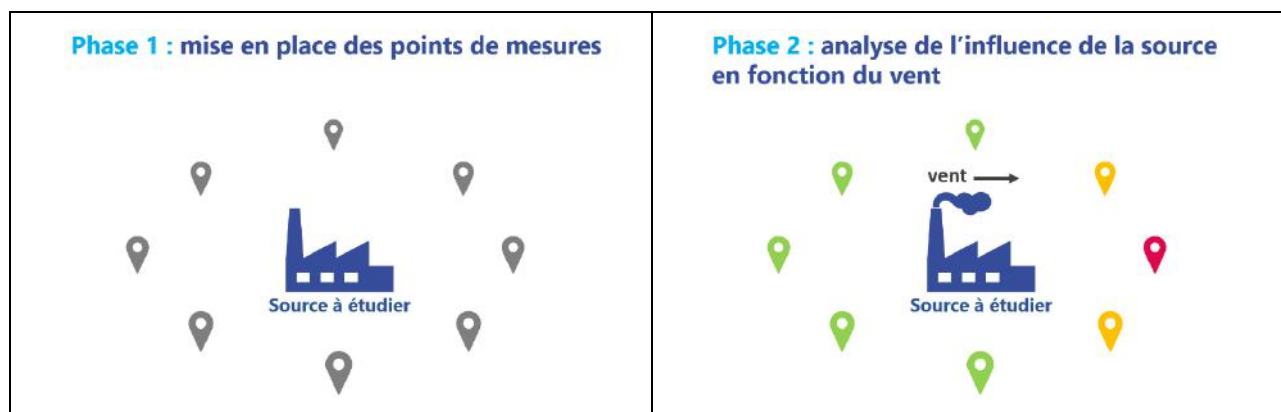


Figure 23 : Étude de l'impact d'une source d'émissions sur la qualité de l'air. Dans la partie gauche, les balises grises schématisent l'emplacement des capteurs. Dans la partie droite, les balises vertes indiquent que les concentrations mesurées sont faibles et la balise rouge indique que les concentrations mesurées sont élevées. Les balises orange représentent le cas intermédiaire.

5.2.3. Recherche de sources

Si l'objectif de la campagne de mesures est d'identifier des sources de pollution jusqu'alors inconnues, alors il est préférable d'utiliser autant de capteurs que possible. Il est judicieux dans ce cas de réserver un ou deux capteurs pour effectuer des mesures en situation de fond. Ces mesures pourront servir de référence et être comparées aux concentrations relevées par les autres capteurs.

Comme indiqué dans la section 2.6, il est généralement plus facile d'identifier des sources de pollution pour les polluants primaires que pour les polluants secondaires.

5.2.4. Comparer deux points de mesure ou plus

L'objectif d'une campagne peut être de comparer les concentrations relevées à deux localisations différentes afin de déterminer si la qualité de l'air est similaire entre ces deux points ou pas. Dans ce cas, il peut être judicieux de déployer un troisième capteur afin d'effectuer des mesures « de référence », en situation de fond.

5.2.5. Comprendre l'importance relative de différentes sources

Afin de comparer l'importance relative de plusieurs sources d'émission, il convient de procéder, pour chaque source, comme décrit dans la section « 5.2.2 Déterminer l'impact d'une source d'émissions sur la qualité de l'air » et de comparer les résultats entre eux.

5.2.6. Faire une cartographie de la qualité de l'air

Si l'objectif de la campagne de mesures est de cartographier la qualité de l'air sur une zone définie, alors il est préférable d'utiliser autant de capteurs que possible. L'approche la moins complexe pour choisir les points de prélèvements est alors de répartir uniformément les capteurs sur la zone d'étude (par exemple : un capteur tous les 250 m). Il est cependant possible d'augmenter la pertinence de la cartographie en :

- Réduisant le nombre de capteurs dans les zones homogènes en termes de densité de population, densité du réseau routier, types d'activités commerciales, etc.
- Densifiant le nombre de capteurs près des sources importantes (grands axes routiers, activités industrielles émettrices, etc.).

Dans tous les cas, il est important que certaines des mesures soient effectuées en situation de fond, afin qu'elles puissent servir de référence pour le reste des mesures.

5.2.7. Mesures embarquées et mesures en air intérieur

Le présent guide porte sur les campagnes de mesures en **air extérieur** par des micro-capteurs **fixes**. Des recommandations différentes ou complémentaires seraient nécessaires pour la conception et l'exploitation de campagnes de mesures par micro-capteurs embarqués (e.g. sur des personnes ou des véhicules) ou pour la mesure en environnement intérieur. Par exemple, pour des mesures embarquées, la performance des micro-capteurs peut dépendre de la vitesse à laquelle se déplace le porteur. Pour des campagnes en air intérieur, les polluants qu'il est pertinent de surveiller peuvent être très différents des polluants à surveiller en air ambiant. Une connaissance spécifique des sources de pollution en air intérieur est requise dans ce cas.

5.3. Choix des polluants à mesurer

Le choix des polluants à surveiller dépend des objectifs de la campagne de mesures et de l'environnement d'implantation des mesures. Les particules PM_{2.5} et PM₁₀ sont d'importance en tout point du territoire des Hauts-de-France. Les oxydes d'azote sont un enjeu principalement à proximité des grands axes routiers. L'ozone est pertinent à surveiller en situation de fond. En proximité automobile, les concentrations en ozone sont généralement plus faibles qu'aux alentours, car les fortes émissions d'oxydes d'azote issues du trafic réagissent très localement avec l'ozone (O₃) pour le transformer en dioxygène (O₂). Les polluants à forte dominance industrielle (SO₂, métaux lourds, CO, etc.) sont généralement pertinents à mesurer seulement à proximité de larges sources industrielles, qu'elles soient supposées ou avérées.

Pour chaque polluant mesuré, il est important, lors de la conception de la campagne de mesures, de prendre en considération les caractéristiques suivantes :

- Est-ce un polluant primaire ou secondaire ?
- Si c'est un polluant secondaire, quels sont ses précurseurs ?
- Quelles sont les sources de ce polluant (potentielles ou avérées) et de ses précurseurs dans la zone d'étude ?
- Est-ce que ces sources sont réparties de manière homogène sur le territoire ? Est-ce qu'il existe des sources notables ?
- Est-ce que des sources situées hors de la zone d'étude peuvent influencer les concentrations mesurées ? Si oui, lesquelles ?

- Est-ce un polluant local ou régional ? Quelle est la durée de vie de ce polluant dans l'atmosphère ?
- Est-ce que ce polluant peut réagir avec d'autres espèces chimiques dans l'atmosphère ?
- Comment ce polluant et ses concentrations sont-ils affectés par les conditions météorologiques ?
- Comment les concentrations de ce polluant varient en fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine, de la saison ?

5.4. Choisir les emplacements des points de prélèvement

5.4.1. Comment choisir un emplacement pour mesurer les concentrations de fond ?

Pour toute campagne de mesure de la qualité de l'air, quels qu'en soient les objectifs, il est important de disposer de mesures en situation de fond afin de pouvoir contextualiser les autres mesures (par exemple : « est-ce que les mesures effectuées à proximité de cette autoroute sont très supérieures aux concentrations de fond ou pas ? »). Il est donc essentiel de bien choisir le ou les emplacements des mesures de fond.

Les critères que les Associations de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) telles qu'Atmo Hauts-de-France doivent respecter lors du choix de la localisation de leurs mesures sont décrits dans le guide de « Conception, implantation et suivi des stations françaises de surveillance de la qualité de l'air (février 2017) » rédigé par le LCSQA.²¹ Les recommandations données ci-dessous sont adaptées de ce guide.

Afin d'effectuer des mesures en situation de fond :

- Il convient de s'éloigner de toute source pouvant influencer directement les mesures. Ces sources incluent : les grands axes routiers, les évacuations de chaufferie (par exemple sur le toit des bâtiments commerciaux ou des écoles), les activités industrielles, les routes non-bitumées, les parkings (car les voitures pourraient rester, moteur allumé, près des mesures et les influencer), etc.
- Il convient de choisir un emplacement dégagé où l'écoulement de l'air n'est pas impacté directement par des objets ou des bâtiments situés à proximité. Il convient donc de s'éloigner des bâtiments le plus possible, de ne pas effectuer de mesures directement sous un arbre, sous un abri de bus, au fond d'une ruelle, etc. Le point de mesure devrait se trouver à au moins 1 mètre de tout mur ou obstacle à l'écoulement d'air (une distance d'au moins quelques mètres est préférable), avec un dégagement d'au moins 270 ° (180 ° si le point de prélèvement est installé sur un mur).
- Si le capteur est monté sur un mur, alors il convient de choisir un mur exposé aux vents dominants, et d'éviter les façades sud car les fortes variations de températures peuvent affecter les mesures.
- Le capteur devrait être installé, dans la mesure du possible, à une hauteur comprise entre 1.5 et 4 mètres, afin que les concentrations mesurées soient représentatives de celles respirées par les personnes. Pour minimiser le risque de dégradations ou de vols des micro-capteurs, une hauteur d'au moins quelques mètres est à privilégier (Figure 24).

²¹ Ce guide est disponible sur <https://www.lcsqa.org/fr>.

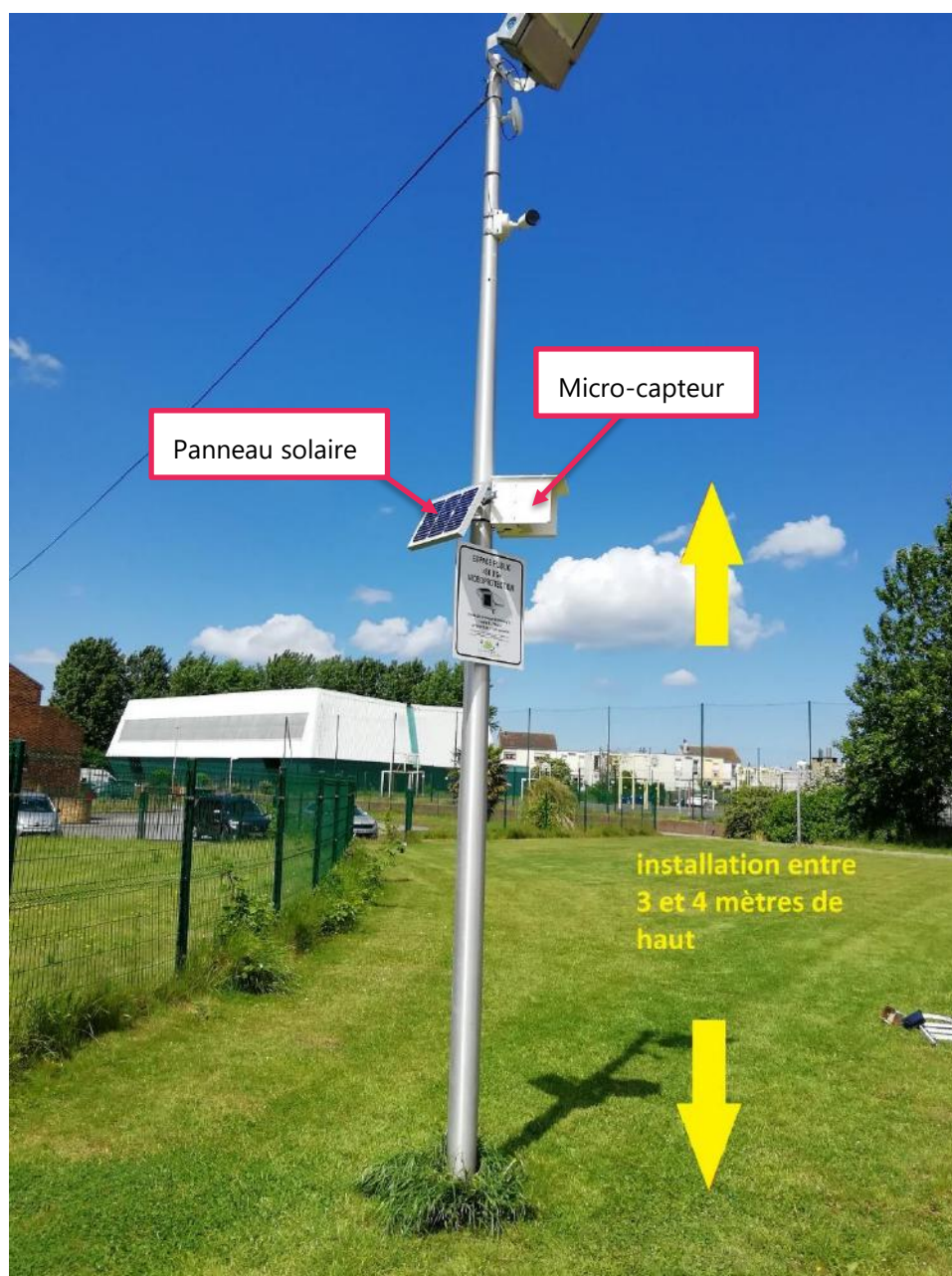


Figure 24 : Exemple d'installation d'un micro-capteur avec panneau solaire. Photo prise à l'école maternelle Les Kakerneches à Coudekerque-Branche (département du Nord).

5.4.2. Comment choisir un emplacement pour mesurer les concentrations en proximité automobile ?

Les recommandations mentionnées ci-dessus pour le choix d'un emplacement de mesure en situation de fond s'appliquent également pour les mesures en proximité automobile, à l'exception de la distance aux sources d'influence. En effet, l'objectif de la mesure est ici de mesurer les concentrations directement influencées par un axe routier donné. Le point de mesure doit donc se trouver à une distance maximale de 10 m par rapport à la bordure de la partie carrossable de la route à étudier et à une distance suffisante (au moins 25 m) de tout carrefour pouvant influencer la fluidité du trafic sur ladite route. En d'autres termes, les mesures de proximité automobile doivent en principe être effectuées le long d'une section de route où les véhicules circulent le plus souvent à vitesse de croisière, et non pas le long d'une section où les véhicules ralentissent, s'arrêtent, redémarrent, et/ou accélèrent fréquemment.

5.4.3. Comment choisir un emplacement pour mesurer les concentrations en proximité industrielle ?

Ce guide n'est pas destiné à la surveillance de la qualité de l'air en proximité de larges émetteurs industriels. Aucune recommandation n'est donc donnée ici à ce sujet.

5.4.4. Contraintes techniques et administratives pour l'emplacement des capteurs

Le choix d'un emplacement de mesure peut être contraint par des considérations techniques et administratives. Si le capteur est alimenté par des batteries et si ces dernières doivent être changées ou rechargées régulièrement, alors il convient de placer le capteur dans un endroit accessible par la personne chargée de cette opération. Si le capteur est alimenté par un panneau solaire, alors ce dernier devrait être orienté vers le sud, avec une inclinaison de 30 à 45 ° par rapport à la verticale. Pour les capteurs branchés sur le secteur, l'accès au réseau électrique est évidemment une contrainte forte.

L'installation de micro-capteurs dans l'espace public est soumise à l'autorisation de l'autorité compétente. Souvent, l'autorisation est délivrée par la mairie qui prendra en compte, dans sa décision, des considérations variées (sécurité, esthétique, objectif des mesures, etc.). Il est à noter que certains espaces publics appartiennent non pas à la municipalité mais à un autre organisme public (communauté de communes, conseil départemental ou régional, état, etc.). Dans le cas de mesures effectuées sur un terrain privé, la demande d'autorisation est à adresser au propriétaire du terrain.

5.5. Durée des campagnes de mesure

Il va sans dire que plus les campagnes de mesures sont longues, plus les résultats pourront être représentatifs des conditions moyennes. Les moyens (financiers, humains, etc.) limitent en revanche la durée possible d'une campagne de mesures.

Si l'objectif de la campagne est de caractériser les concentrations moyennes annuelles, alors une durée minimale de 8 semaines est recommandée. Ces semaines devront, dans la mesure du possible, être réparties de manière uniforme dans l'année (2 semaines à chaque saison ou 4 semaines en été + 4 semaines en hiver). En effet, comme discuté précédemment, les concentrations en polluants sont affectées par les conditions météorologiques et varient fortement d'un moment de l'année à l'autre.

Si l'objectif des mesures est plus spécifique, alors la durée de la campagne pourra être adaptée en conséquence. Par exemple, si l'objectif est d'étudier l'impact de travaux sur la qualité de l'air, alors la campagne pourra être limitée à la durée des travaux.

De manière plus générale, il est important de garder en tête que les conditions météorologiques, qui peuvent varier brusquement d'un jour à l'autre, ont une influence forte sur les concentrations en polluants atmosphériques. Quelques jours de mesures sont donc généralement insuffisants pour exploiter les mesures de concentrations indépendamment des conditions météorologiques. Quelques semaines au minimum sont, dans tous les cas, recommandées.

5.6. Exploitation des données

Cette section présente des recommandations pour l'exploitation des données ainsi que pour leur présentation.

5.6.1. Agrégation temporelle des données

Il est souvent pertinent, au cours de l'exploitation, d'agréger les données sur différentes échelles de temps (calcul de moyennes horaires, journalières, mensuelles, annuelles, etc.). Il n'est en revanche pas rare que les données ne soient pas disponibles en continu, par exemple lorsqu'un capteur tombe en panne. Il est recommandé de considérer qu'une moyenne peut être calculée seulement si au moins 75 % des données sont disponibles sur la période d'agrégation. Par exemple, il est recommandé de considérer une moyenne horaire valide seulement si des données sont disponibles pendant au moins 45 minutes sur 60. De même, il est recommandé de considérer une moyenne journalière valide seulement si des données sont disponibles pendant au moins 18 heures sur 24. Ce critère peut néanmoins être relâché, dans une certaine mesure, si l'objectif des mesures est pédagogique.

5.6.2. Comparaison aux valeurs réglementaires

La comparaison des concentrations mesurées par des micro-capteurs avec les seuils réglementaires de la qualité de l'air ne peut être réalisée qu'à **titre indicatif**. En effet, le contrôle du respect des seuils réglementaires répond à des exigences de qualité qui ne sont pas atteintes par les micro-capteurs. Les seuils réglementaires en vigueur en France sont présentés sur le Tableau 3 de la page 27. La méthode de calcul de ces statistiques est définie dans le *Guide méthodologique pour le calcul des statistiques relatives à la qualité de l'air* (juin 2016) par le LCSQA.²²

5.6.3. Analyse des conditions météorologiques

L'exploitation des résultats doit tenir compte des conditions météorologiques car celles-ci ont une influence importante sur les concentrations. L'analyse doit comporter un examen, entre autres, des températures, des précipitations, et des vents. Il est particulièrement utile de tracer une rose des vents pour la période et la zone d'étude. Celle-ci représente la distribution de la vitesse et de la direction des vents mesurés. Pour une direction donnée :

- L'orientation de la branche indique la provenance du vent. Une branche orientée vers le bas indique des vents provenant du sud.
- La longueur de la branche indique la fréquence avec laquelle des vents provenant de cette direction ont été observés.
- L'échelle de couleur indique la vitesse des vents.

Par exemple, d'après la rose des vents présentée sur la Figure 25, 20 % des vents du mois de décembre 2020 à Valenciennes provenaient de la direction sud.

²² Ce guide est disponible sur <https://www.lcsqa.org/fr>.

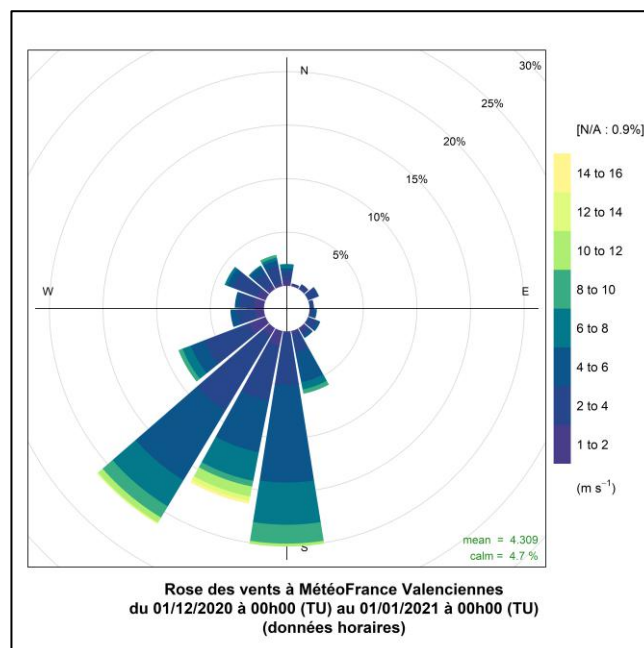


Figure 25 : Rose des vents pour la station Météo-France de Valenciennes pour le mois de décembre 2020.

5.6.4. Présentation des données

Cette section contient des exemples de graphiques qui peuvent être utilisés pour présenter les données de qualité de l'air, en fonction du phénomène à mettre en évidence.

Séries chronologiques

Les séries chronologiques sont une représentation des valeurs mesurées en fonction du temps. Les données peuvent être agrégées temporellement de différentes manières. Par exemple :

- La Figure 26 présente les moyennes horaires en PM₁₀ à quatre stations des Hauts-de-France durant l'épisode de pollution du 21 janvier 2019 qui a touché 4 des 5 départements de la région.
- Les moyennes journalières de la Figure 27 indiquent qu'il y a plus de dioxyde d'azote (NO₂) en hiver qu'en été.
- La Figure 28 présente, pour chaque jour de l'année 2018, le maximum de la moyenne horaire en ozone (O₃) dans la région de Béthune. Cette figure indique que les épisodes de pollution à l'ozone cette année-là ont eu lieu principalement en juillet (en France, un épisode de pollution à l'ozone correspond à un dépassement de 180 µg/m³ en moyenne horaire).

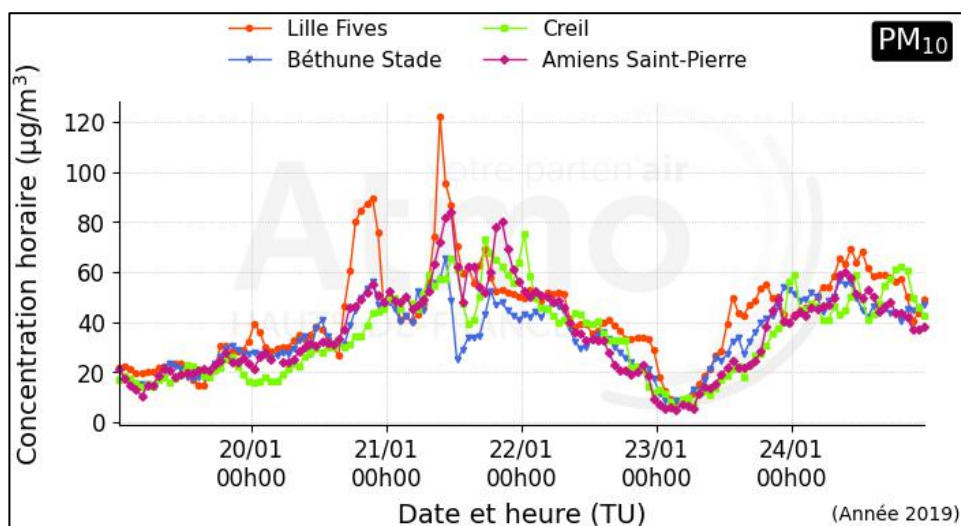


Figure 26 : Moyennes horaires en PM_{10} durant quelques jours en janvier 2019.

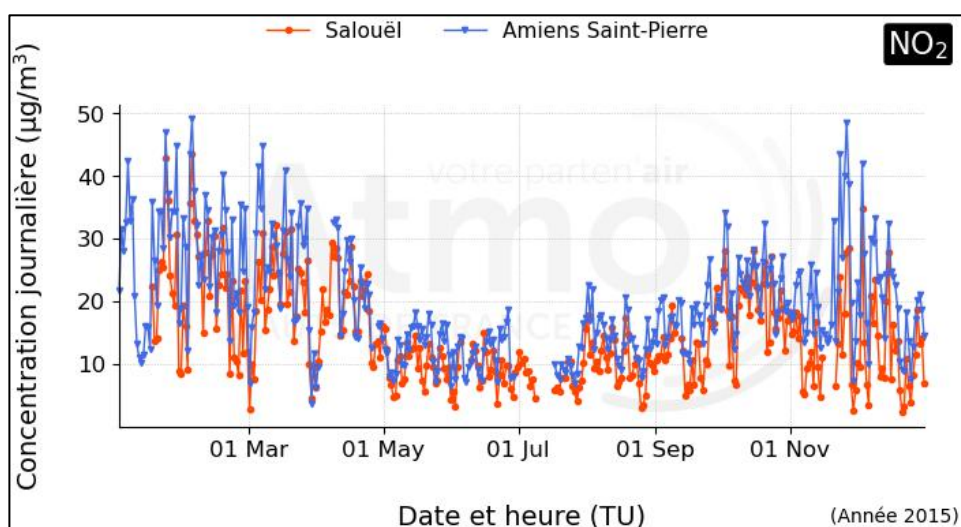


Figure 27 : Moyennes journalières en dioxyde d'azote (NO_2) mesurées à Amiens et Salouël en 2015.

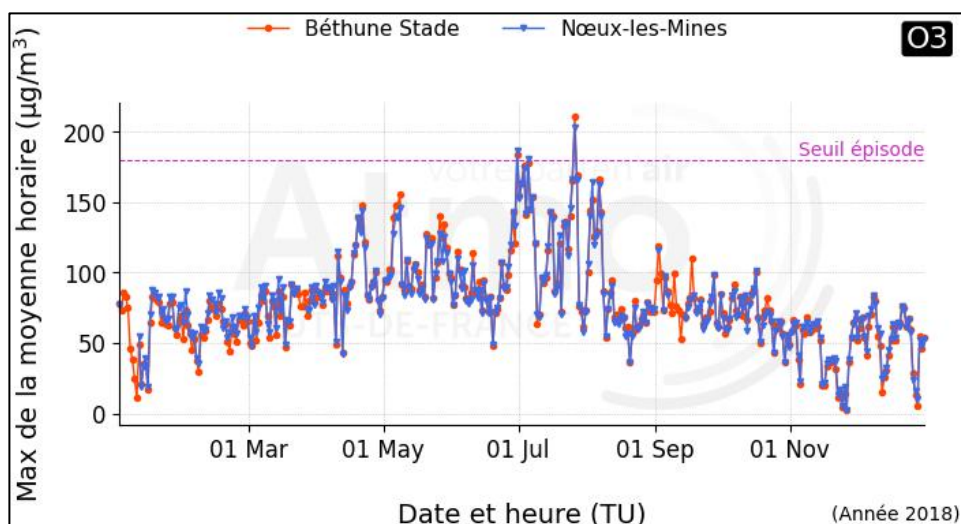


Figure 28 : Maximum journalier de la moyenne horaire en ozone (O_3) en 2018 à Béthune et N  eux-les-Mines.

Profils moyens

Les profils moyens (profils journaliers, hebdomadaire, annuels, etc.) peuvent mettre en évidence certaines tendances. Par exemple, les profils journaliers, hebdomadaires, et annuels du dioxyde d'azote (NO_2 , Figure 29) montrent que :

- Les concentrations en NO_2 sont plus élevées en proximité automobile qu'en fond urbain, puis qu'en fond périurbain, puis qu'en fond rural.
- Elles sont plus élevées en début de matinée et en début de soirée que dans le reste de la journée.
- Elles sont plus faibles le weekend par rapport aux autres jours de la semaine.
- Elles sont plus élevées en hiver qu'en été.

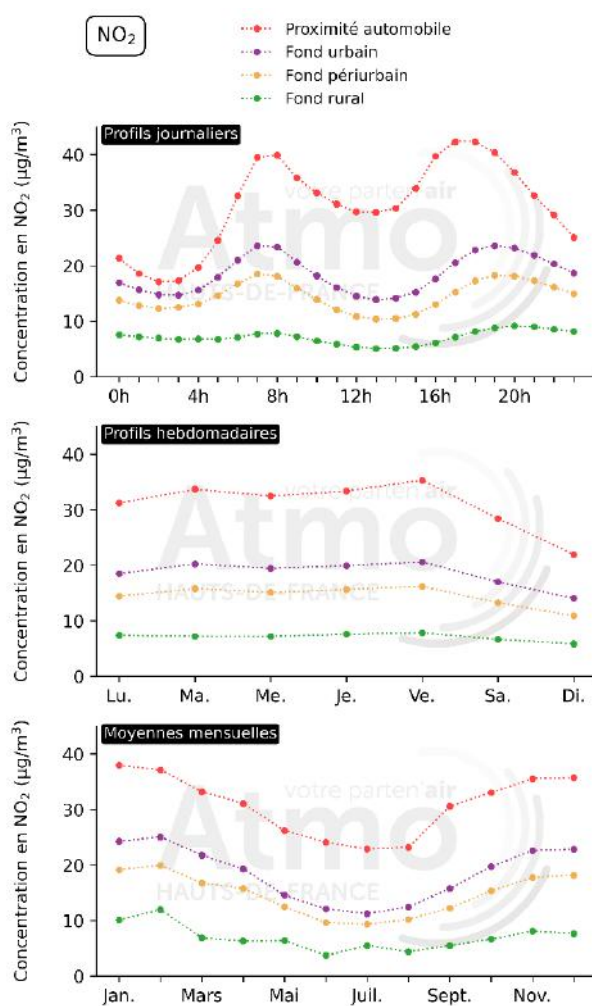


Figure 29 : Profils journaliers, hebdomadaires, et annuels du dioxyde d'azote (NO_2) dans les Hauts-de-France sur la période 2015-2019. Les heures sont indiquées en TU (temps universel).

Roses de pollution

Les roses de pollution mettent en évidence les directions et vitesses de vents associées à des concentrations élevées. Chaque case correspond à une direction (d'où vient le vent) et une vitesse de vent. Les cases éloignées du centre représentent les vitesses de vent élevées. La couleur de la case indique la concentration horaire maximale mesurée pour cette catégorie de vent. Par exemple, la rose de pollution de la Figure 30 indique qu'en décembre 2020, les concentrations élevées en particules PM_{10} à la station de Valenciennes Wallon étaient

principalement associées à des vents provenant du secteur ouest et à des vitesses inférieures ou égales à 3 mètres par seconde.

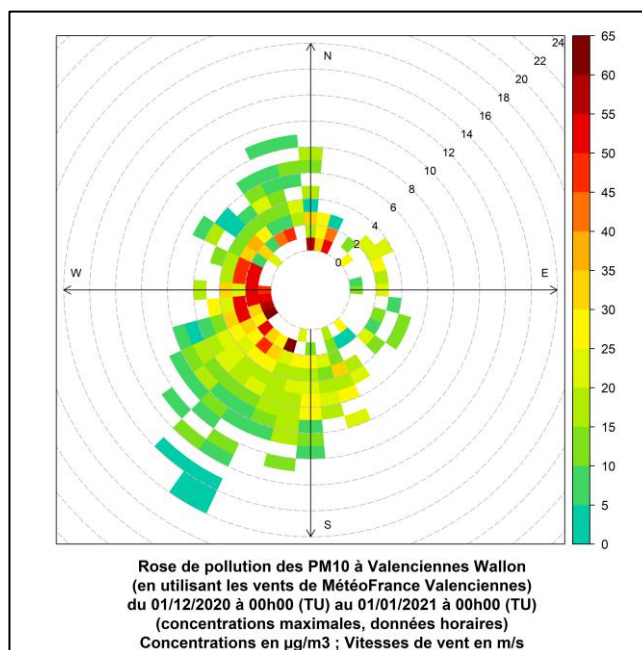


Figure 30 : Rose de pollution des particules PM₁₀ mesurées à la station de Valenciennes Wallon pour le mois de décembre 2020. Données non validées.

6. Conclusion

Ce guide, à destination des enseignants du secondaire, a pour objectif de fournir les connaissances nécessaires à la création de contenu pédagogique basé sur l'assemblage et l'utilisation de micro-capteurs de la qualité de l'air. Les connaissances enseignées à l'aide de cette démarche peuvent couvrir plusieurs domaines : électronique, programmation information, conception mécanique, sciences environnementales, sociologie, etc.

Ce guide présente, dans un premier temps, des connaissances générales en qualité de l'air. Le succès d'une campagne de mesures dépend entre autres d'une bonne compréhension des comportements des polluants présents dans l'atmosphère, et des paramètres qui influencent ces comportements.

La deuxième partie du guide décrit les principales étapes à suivre pour la conception et la mise en place d'une campagne de mesure de la qualité de l'air. Ces étapes sont :

- Définition des objectifs de l'étude.
- Choix des polluants à mesurer.
- Choix du nombre et de la localisation des points de prélèvement.
- Définition du planning des mesures (quand et pendant combien de temps).
- Réalisation des mesures.
- Exploitation des résultats.
- Communication des résultats.

L'objectif de l'utilisation des micro-capteurs étant ici exclusivement pédagogique, des concessions peuvent être faites sur certains des aspects de la conception de campagnes de mesures tels qu'ils sont présentés dans ce guide. Il est déjà intéressant, par exemple, de « simplement » prouver l'existence d'un polluant par la mesure, de mettre en évidence la variation des concentrations de ce polluant sur une même journée, une même semaine, un même mois, ou une même année. Il peut également être intéressant de mettre en évidence comment les concentrations de ce polluant peuvent varier d'un point à un autre (à côté d'une route versus 100 m plus loin ; dans la cour intérieure du lycée versus à l'extérieur du lycée ; préau fumeur versus préau non-fumeur ; etc.).

Glossaire

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Microgramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,001$ milligramme de polluant par mètre cube d'air.

μm : Micromètre. $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm} = 0,001$ millimètre.

AASQA : Association Agréée pour la Surveillance de la Qualité de l'Air.

Anthropique : Relatif à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoqué directement ou indirectement par l'action de l'humain.

As : Arsenic.

B(a)P : Benzo(a)pyrène.

Cd : Cadmium.

Concentration : la concentration d'un polluant représente la quantité du composé présent dans l'air et s'exprime en masse par mètre cube d'air. Les concentrations des polluants caractérisent la qualité de l'air que l'on respire.

Conditions de dispersion : Ensemble de conditions atmosphériques permettant la dilution des polluants dans l'atmosphère et donc une diminution de leurs concentrations.

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

Emissions : Rejets d'effluents gazeux ou particulaires dans l'atmosphère issus d'une source anthropique ou naturelle (exemples : cheminée d'usine, pot d'échappement, feu de bioamasse).

Episode de pollution : Période pendant laquelle la procédure d'information et de recommandation ou la procédure d'alerte a été déclenchée pour l'un ou plusieurs des polluants suivants : SO_2 , NO_2 , O_3 , PM_{10} .

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air.

mg/m^3 : Milligramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,001 \text{ g}/\text{m}^3 = 0,001$ gramme de polluant par mètre cube d'air.

Moyenne glissante sur 8 heures : Moyenne calculée toutes les heures avec les 8 dernières moyennes horaires.

ng/m^3 : Nanogramme de polluant par mètre cube d'air. $1 \text{ ng}/\text{m}^3 = 0,000001 \text{ mg}/\text{m}^3 = 0,000001$ milligramme de polluant par mètre cube d'air.

Ni : Nickel.

NH_3 : Ammoniac

NO : Monoxyde d'azote.

NO_2 : Dioxyde d'azote.

NO_x : Oxydes d'azote.

O_3 : Ozone.

Objectif à long terme (= objectif de qualité) : « Niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble ». ²³

Pb : Plomb.

PM₁₀ : Particules en suspension de taille inférieure ou égale à 10 µm.

PM_{2,5} : Particules en suspension de taille inférieure ou égale à 2,5 µm.

Polluant primaire : polluant directement émis par une source donnée.

Polluant secondaire : polluant non émis directement, mais créé dans l'atmosphère par des réactions physico-chimiques impliquant un ou plusieurs autres composés.

Seuil d'information et de recommandation : « niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine de groupes particulièrement sensibles au sein de la population et qui rend nécessaires l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions ». ²⁴

Seuil d'alerte : « niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence ». ²⁴

SO₂ : Dioxyde de soufre.

Valeur cible : « Niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble ». ²³

Valeur limite : « Niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble ». ²³

²³ Source : Article R221-1 du code de l'environnement, modifié par décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010, article 1.

²⁴ Source : Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air, par le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat.

RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-hdf.fr

Atmo Hauts-de-France

Observatoire de l'Air

199, rue Colbert – Bâtiment Douai

59000 Lille

