

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**« Évaluation de la qualité de l'air dans la Région
Bruxelles-Capitale depuis 2013: Quels facteurs
influencent la concentration de PM2.5 et comment
respecter les lignes directrices d'ici 2035 ? »**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par

DEROUBAIX Augustin

En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG

Année Académique 2023-2024

Directeur : Nadine Mattielli

1. Résumé

La pollution de l'air est un défi majeur pour de nombreuses régions urbaines, y compris la Région de Bruxelles-Capitale (RBC). Depuis le 19^{ème} siècle, l'utilisation intensive du charbon a provoqué des émissions nocives, et récemment, l'attention s'est tournée vers les particules fines (PM10 et PM2.5), les oxydes d'azote (NOx) et les oxydes de soufre (SOx) en raison de leurs impacts sur la santé et l'environnement.

Le grand smog de Londres en 1952 a marqué le début des efforts sérieux pour évaluer et contrôler la pollution de l'air. Depuis, des études épidémiologiques ont établi des liens entre la pollution et la mortalité humaine, conduisant à des réglementations européennes strictes pour réduire les niveaux de polluants (European Commission, 2020). En 2021, 97 % de la population urbaine européenne était exposée à des concentrations de PM2.5 supérieures aux recommandations de l'OMS, responsables de millions de décès prématurés chaque année.

À Bruxelles, les sources de pollution incluent le transport, les procédés industriels et le chauffage des bâtiments (Bruxelles Environnement, 2023). En 2013, la RBC a adopté le Code Bruxellois de l'Air, du Climat et de la Maîtrise de l'Énergie (CoBRACE), permettant de mettre en place des plans d'action tels que le Plan régional Air-Climat-Energie (PACE) et la Zone de Basses Émissions (LEZ) (PACE, 2023). Malgré ces efforts, des mesures plus strictes sont nécessaires pour respecter les lignes directrices de l'OMS d'ici 2035.

Ce mémoire de recherche se compose de plusieurs étapes clés pour répondre à la question : « Évaluation de la qualité de l'air dans la Région Bruxelles-Capitale depuis 2013 : Quels facteurs influencent la concentration de PM2.5 et comment respecter les lignes directrices de l'OMS d'ici 2035 ? ». D'abord, une revue de la littérature a permis d'examiner l'évolution de la pollution de l'air, des directives européennes et des recommandations de l'OMS. Ensuite, une analyse des données de la Cellule Interrégionale de l'Environnement (CELINE) concernant les concentrations de PM2.5 à Bruxelles a été effectuée. Enfin, des recommandations ont été faites pour aligner la Région avec les lignes directrices de l'OMS.

L'analyse des concentrations de PM2.5 de 2013 à 2023 montre une diminution progressive, bien que les recommandations strictes de l'OMS ne soient pas encore atteintes. Les émissions de PM2.5 proviennent principalement du chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires (42%), du transport routier (21%), de la gestion des déchets (19%) et des processus et produits industriels (13%) (Bruxelles Environnement, 2023b). Les pics de pollution observés en hiver et au printemps sont souvent liés aux inversions thermiques et à la formation de particules secondaires.

Les initiatives visant à réduire les émissions de PM2.5 provenant du transport routier, comme la journée sans voiture et la LEZ, ont montré leur efficacité. Cependant, il est crucial de continuer à cibler les émissions hors-échappement, notamment celles dues à l'usure des pneus et des freins des véhicules.

La combustion résidentielle et tertiaire contribue également significativement aux émissions de PM2.5, surtout en hiver. Les mesures du PACE 2023, comme l'interdiction progressive des chaudières au charbon et au mazout, sont importantes, mais il est essentiel de renforcer la réglementation sur les installations existantes et d'encourager des alternatives moins polluantes.

Le secteur industriel, notamment à Neder-Over-Heembeek, est une source notable de PM2.5. Durant le deuxième confinement lié au COVID-19, les niveaux de PM2.5 dans cette zone sont restés stables et élevés. Il est recommandé de mettre en place des actions de surveillance spécifiques aux procédés industriels pour mieux comprendre et contrôler leurs émissions. La station de Neder-Over-Heembeek enregistre les niveaux moyens les plus élevés de PM2.5, suggérant la présence de facteurs additionnels comme les broyeurs de métaux. De plus, il est crucial de déterminer non seulement les taux d'émission des PM2.5, mais aussi à analyser leur composition (géo)chimique. Cela permettra d'identifier leur provenance précise et de différencier les impacts des divers émetteurs, dans les quartiers industriels notamment

L'utilisation de produits chimiques dans l'industrie agricole contribue également aux niveaux élevés de PM2.5. Des pics de pollution coïncident avec la période d'épandage d'engrais, suggérant que des réglementations spécifiques des pratiques agricoles sont nécessaires pour réduire cette source de pollution, notamment via une collaboration entre régions et au niveau national ainsi que des campagnes de sensibilisation sur les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

En conclusion, il est crucial de mettre en place des mesures intégrées et sectorielles pour réduire les niveaux de PM2.5 dans la RBC et se conformer aux recommandations de l'OMS, assurant ainsi une meilleure qualité de l'air pour les résidents de Bruxelles.

2. Remerciements

Ce mémoire de fin d'étude a été une étape majeure de mon Master en Gestion de l'Environnement, tant en termes de temps que de charge de travail. Je souhaite donc exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu et accompagné durant cette période.

Tout d'abord, je tiens à remercier Nadine Mattielli pour le temps consacré à nos rencontres hebdomadaires, son investissement dans la relecture et la formulation de recommandations pour ce travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers Alexander Mangold et son collègue Andy, qui ont pris de leur temps pour récupérer et me fournir les données des quatre stations de mesures bruxelloises analysées dans ce mémoire.

Je remercie également ma famille et mes amis pour leur soutien quotidien durant ces mois de travail et de questionnement, sans lequel je n'aurais pas pu aller jusqu'au bout. En particulier, je remercie chaleureusement ma maman, Véronique Leblanc, pour ses encouragements et ses remarques constructives à chaque étape de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier grandement ma marraine, Pascale Barbier, pour son aide précieuse, sa relecture attentive, ses corrections et ses conseils lors de mes moments de doute.

3. Table des matières

1. Résumé	3
2. Remerciements	5
3. Table des matières	6
4. Table des figures	9
5. Introduction	10
6. Contexte de la pollution de l'air	12
6.1 Introduction à la pollution de l'air	12
6.1.1 Les origines	12
6.1.2 La situation mondiale	13
6.2 La pollution atmosphérique	14
6.2.1 Définition	14
6.2.2 Les sources	14
6.2.3 Les polluants	15
6.2.3.1 Particules atmosphériques en suspension	15
6.2.3.1.1 La composition chimique des PM	17
6.2.3.2 Le dioxyde d'azote	18
6.2.3.3 L'ozone	18
6.2.3.4 Le monoxyde de carbone	19
6.2.3.5 Le dioxyde de soufre	19
6.2.3.6 Les COVNM	19
6.2.3.7 Les différents polluants émis dans la Région de Bruxelles Capitale	20
6.3 Les effets sur la santé	22
7. Les échelons de gestion de la qualité de l'air	24
7.1 L'OMS	24
7.1.1 Le contexte historique	24
7.1.2 Les recommandations de l'OMS	25
7.2 L'Union Européenne	26
7.2.1 L'évolution des directives européennes	26
7.2.2 Les objectifs européens	26

7.3	La Belgique	28
7.3.1	Les obligations européennes	28
7.3.2	La responsabilité fédérale et la gestion régionale	29
7.4	La Région de Bruxelles-Capitale	29
7.4.1	L'évolution de la qualité de l'air	29
7.4.2	Gestion de la qualité de l'air dans la Région de Bruxelles-Capitale	30
7.4.2.1	Le cadre législatif	30
7.4.2.2	L'objectif de la région	30
7.4.2.3	Le Plan Régional Air-Climat-Energie	31
7.4.2.3.1	Le transport et la mobilité	32
7.4.2.3.1.1	Améliorer la mobilité avec le plan Good Move	32
7.4.2.3.1.2	La LEZ et la transition vers les véhicules sans émissions directes	32
7.4.2.3.2	Le bâtiment et la PEB	33
7.4.2.3.2.1	La PEB	33
7.4.2.3.2.2	Sortir des combustibles fossiles et polluants	34
7.4.2.3.2.3	Réduire les émissions liées au chauffage au bois	35
7.4.2.3.3	La surveillance de la qualité de l'air	35
8.	Etude de cas	36
8.1	Les données	36
8.1.1	La qualité des données	36
8.1.2	Les stations de mesures	36
8.1.3	La méthodologie	38
8.2	Compilation des résultats face aux recommandations de l'OMS	38
8.2.1	Données brutes (par heure)	39
8.2.2	Moyenne par jour	41
8.2.3	Moyenne trimestrielle	42
8.2.4	Moyenne annuelle	44
8.2.5	Graphique en boîte à moustaches	46
8.2.6	Conclusion	47
8.3	Impact des principaux secteur émetteurs	47
8.3.1	Le transport routier	48
8.3.1.1	La journée sans voiture	48
8.3.1.2	La Zone de Faible Émission	50
8.3.1.3	Les émissions hors-échappement	52

8.3.1.4	Conclusion	54
8.3.2	La combustion dans les bâtiments résidentiels et tertiaires	55
8.3.2.1	Impact du chauffage des bâtiments	55
8.3.2.2	Les réglementations PEB	56
8.3.2.3	Conclusion	58
8.3.3	Industrie et utilisation de produits	58
8.3.3.1	Activité industrielle	59
8.3.3.2	Covid	59
8.3.3.3	Conclusion	61
8.3.4	Gestion des déchets (hors valorisation énergétique)	61
8.3.5	Le secteur agricole	62
8.4	Discussion générale	64
9.	Recommandations	66
10.	Limites	68
11.	Conclusion	69
12.	Bibliographie	71
13.	Annexes	81

4. Table des figures

Figure 1 : La composition chimique des particules.....	17
Figure 2 : Le pourcentage de diminution des polluants atmosphériques dans la RBC	20
Figure 3 : Répartition de l'origine des polluants par secteur 2021	21
Figure 4 : Morts prématurés en Europe dus à la concentration en PM2.5 en 2019	23
Figure 5 : Recommandations de l'OMS.....	25
Figure 6 : Les standards de qualité de l'air dans Union Européenne	27
Figure 7 : Les certificats PEB émis par type d'habitation individuelle.....	34
Figure 8 : Carte du réseau de mesure de la Région de Bruxelles-Capitale.....	37
Figure 9 : Données par heure.....	39
Figure 10 : Moyenne par jour.....	41
Figure 11 : Moyenne trimestrielle	42
Figure 12 : Moyenne annuelle.....	44
Figure 13 : Graphique en boîte.....	46
Figure 14 : Concentration en PM2.5 durant les journées sans voiture 2016, 2017 et 2018	49
Figure 15 : Moyenne des PM2.5 par heure pour 2017 et 2023	51
Figure 16 : Répartition des émissions de PM2.5 dans les transports	52
Figure 17 : Nombre de voitures particulières par carburant, en Belgique, entre 2014 et 2023	53
Figure 18 : Moyenne par heure d'hiver et d'été 2017	55
Figure 19 : Répartition des émissions de PM2.5 dans le bâtiment.....	57
Figure 20 : Les sources de chauffage des bâtiments avec un certificat PEB.....	57
Figure 21 : Répartition des activités industrielles sur le sol bruxellois	59
Figure 22 : Moyenne par heure durant le second confinement	60
Figure 23 : Le mois moyen pour la période 2013-2023	62
Figure 24 : Moyenne par jour de l'année 2019	63

5. Introduction

La pollution de l'air constitue un défi majeur pour de nombreuses régions urbaines, notamment la Région de Bruxelles-Capitale (RBC) (EEA, 2023). Depuis le 19^{ème} siècle, les effets néfastes des émanations de soufre et des fumées noires, dus à l'utilisation intensive du charbon, ont été bien documentés (Fowler et al., 2020). Cependant, ce n'est que récemment que l'attention s'est portée sur les polluants atmosphériques, tels que les particules fines (PM10 et PM2.5), les oxydes d'azote (NOx) ou encore les oxydes de soufre (SOx), en raison de leurs impacts significatifs sur la santé humaine et l'environnement (OMS, 2022).

Le grand smog de Londres en 1952, responsable de milliers de décès, a marqué le début des efforts sérieux pour évaluer et contrôler la pollution atmosphérique. Depuis lors, des études épidémiologiques ont établi des liens solides entre la pollution de l'air et la mortalité humaine, révélant que même de faibles concentrations de polluants peuvent être extrêmement nocives (Ung, 2003). En conséquence, des réglementations européennes de plus en plus strictes ont été mises en place pour réduire les niveaux de polluants ambiants et limiter les émissions à la source (European Commission, 2020).

Malgré des progrès significatifs, la qualité de l'air en Europe, et particulièrement à Bruxelles, demeure une préoccupation importante. En 2021, 97 % de la population urbaine européenne étaient exposés à des concentrations de PM2.5 supérieures aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (Conseil européen, 2021). Ces concentrations élevées sont responsables de millions de décès prématurés chaque année, soulignant l'importance d'une action continue et renforcée (OMS, 2022).

Vu les sources de pollution variées incluant le transport, les procédés industriels, et le chauffage des bâtiments (Bruxelles environnement, 2023b), la situation à Bruxelles est complexe. En 2013, la Région de Bruxelles-Capitale a adopté le Code Bruxellois de l'Air, du Climat et de la Maîtrise de l'Énergie (CoBRACE) qui s'inscrit dans le cadre des efforts de la Région pour répondre aux enjeux environnementaux et climatiques actuels (Bruxelles Environnement, 2023b). Ce cadre législatif a permis de mettre en place plusieurs plans d'action pour améliorer la qualité de l'air, comme le Plan régional Air-Climat-Energie (PACE), qui a notamment mené à l'instauration de la Zone de Basses Émissions (LEZ) (PACE, 2023). Ces actions ont permis à Bruxelles de respecter les normes imposées par l'Union Européenne (UE). Toutefois, il reste nécessaire de développer et d'appliquer des mesures encore plus strictes si la Région de Bruxelles-Capitale veut mettre en place son engagement de respecter les lignes directrices de l'OMS d'ici 2035 (DPG, 2019). C'est ce contexte particulier qui a mené à l'élaboration de la question de recherche suivante : « Évaluation de la qualité de l'air dans la Région Bruxelles-Capitale

depuis 2013 : Quels facteurs influencent la concentration de PM2.5 et comment respecter les lignes directrices de l'OMS d'ici 2035 ? ».

Pour répondre à cette question, ce travail de recherche se composera de plusieurs étapes clés. Tout d'abord, une revue de la littérature sera menée pour examiner l'évolution de la pollution de l'air au fil du temps et à différents niveaux de gestion de la qualité de l'air à l'échelle mondiale. Cette revue comprendra un état des lieux des directives européennes à respecter ainsi que des recommandations de l'OMS.

Ensuite, une analyse des données fournies par la Cellule Interrégionale de l'Environnement (CELINE) concernant les concentrations de PM2.5 dans la Région de Bruxelles-Capitale sera faite. Cette analyse permettra de mettre en évidence les tendances de pollution et d'identifier les principales sources locales de PM2.5.

Enfin, des recommandations d'actions seront proposées pour aligner la Région de Bruxelles-Capitale avec les lignes directrices de l'OMS. Ces recommandations incluront des actions visant à réduire les émissions de PM2.5 provenant des secteurs identifiés dans l'analyse des résultats.

6. Contexte de la pollution de l'air

6.1 Introduction à la pollution de l'air

6.1.1 Les origines

Depuis le 19^{ème} siècle, plusieurs régions urbaines industrialisées, tant en Europe que dans diverses localités mondiales, ont été confrontées à des défis majeurs liés à la dégradation de la qualité de l'air. Ces problématiques découlaient principalement des émanations de soufre et de fumées noires, engendrées par l'utilisation répandue du charbon dans les habitations et les secteurs industriels. A cette époque, les impacts sur la santé étaient reconnus, mais la découverte des effets des pluies acides en Scandinavie dans les années 1960 avait détourné l'attention vers les effets environnementaux (Fowler et al., 2020).

Décembre 1952 est considéré comme un moment clé de la question de la qualité de l'air. En effet, à cette époque, le grand smog de Londres a perduré pendant cinq jours et aurait entraîné 3500 à 4000 décès. Ce phénomène est considéré comme le commencement de démarches sérieuses pour évaluer la contamination de l'atmosphère. Depuis lors, l'étude sur la pollution atmosphérique a connu un développement important dans l'objectif afin de mieux appréhender ce phénomène et d'apporter des réponses performantes (Ung, 2003). Dans les années 1990, des études épidémiologiques ont montré des liens entre la pollution de l'air, notamment les PM2.5, et la mortalité humaine, soulignant que même de faibles concentrations de polluants pouvaient être extrêmement nocives (Fowler et al., 2020). En conséquence, la législation sur la qualité de l'air a évolué pour prioriser la santé humaine, avec des réglementations ciblant les niveaux ambiants et les sources d'émissions.

Aujourd'hui, les estimations indiquent que les PM2.5 extérieures sont responsables de millions de décès prématurés chaque année. Les protocoles internationaux restent cruciaux en raison des impacts multiples des polluants sur la santé humaine et les écosystèmes. Cela implique la collaboration d'experts provenant de différentes spécialités comme l'épidémiologie, l'étude des déplacements, la gestion des émissions et le traitement des substances polluantes. Ces experts travaillent conjointement avec les autorités locales et les acteurs de l'industrie (Ung, 2003).

6.1.2 La situation mondiale

La qualité de l'air ambiant, déterminée par le niveau de concentration des polluants, résulte d'interactions complexes entre les conditions environnementales naturelles et humaines. Outre l'importance des émissions de polluants, il est crucial de considérer leur transport, leur transformation et leur dispersion dans l'atmosphère. Même si la pollution de l'air n'est pas exclusivement un problème urbain, elle se manifeste de manière particulièrement marquée dans les milieux urbains. En effet, nous y retrouvons diverses sources de pollution (transport, industries, chauffage, ...) et constatons que la santé des populations est impactée (Da Schio et al., 2018).

Au cours des dernières décennies, la qualité de l'air en Europe s'est améliorée mais des problèmes importants subsistent, en particulier, au niveau des concentrations de particules fines (PM_{2.5}) qui sont parmi les polluants les plus dangereux pour la santé. En effet, elles sont encore trop élevées dans de nombreuses régions d'Europe (EEA, 2023). Cependant, entre 2010 et 2020, les émissions de nombreux polluants primaires ont significativement baissé en Europe, en Amérique du Nord et au Japon, avec des réductions particulièrement marquées pour le SO₂, le NO₂ et les COV, souvent de plus de 50% par rapport aux niveaux des années précédentes. En revanche, en Asie de l'Est et du Sud, ces émissions ont augmenté, atténuant les baisses globales et limitant la réduction des émissions mondiales de SO₂ à seulement 15% depuis 1990. Les grandes villes asiatiques, notamment Pékin en 2012, connaissent des niveaux de pollution rappelant ceux des épisodes de smog de Londres dans les années 1950, avec des concentrations élevées de PM, de SO₂ et de NO₂ (Fowler et al., 2020).

En 2021, 97 % de la population urbaine européenne étaient exposés à des concentrations de PM_{2.5} supérieures aux recommandations de l'OMS (Conseil européen, 2021). Ces concentrations élevées de PM_{2.5} sont responsables de millions de décès prématurés chaque année. Similairement, les émissions mondiales de NO_x ont continué de croître ; les réductions enregistrées en Europe et en Amérique du Nord étant contrebalancées par des augmentations en Asie.

Ainsi, la charge mondiale de la pollution de l'air continue de croître malgré l'attention politique persistante sur les effets sanitaires du PM et du NO₂ dans les zones urbaines des pays développés et en développement. La répartition des concentrations de PM_{2.5} montre que les pays d'Asie de l'Est et du Sud supportent une part disproportionnée de cette charge sanitaire bien que la majorité de la population mondiale vive dans des zones où les niveaux de PM_{2.5} dépassent les recommandations de l'OMS (Fowler et al., 2020).

6.2 La pollution atmosphérique

6.2.1 Définition

La pollution de l'air désigne une combinaison de gaz et de particules en suspension dans l'atmosphère avec des concentrations changeantes en fonction des émissions et des conditions climatiques. Ces substances nocives ont des effets préjudiciables sur la santé et sur les écosystèmes (Santé Publique France, 2019).

La loi française sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 1996 en fait la définition suivante : "Constitue une pollution atmosphérique [...] l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives." (Santé Publique France, 2019)

De manière similaire, en 2016, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) définit la pollution de l'air comme étant "la présence de substances contaminantes ou polluantes dans l'air qui ne se dispersent pas correctement et qui interfèrent avec la santé ou le bien-être humain, ou qui produisent d'autres effets environnementaux néfastes" (PNUE, 2016).

6.2.2 Les sources

Les sources d'émissions de polluants atmosphériques sont diverses et peuvent être regroupées sous différentes catégories.

En premier lieu, il y a les aérosols d'origine naturelles, incluant d'une part les aérosols d'origine marine dont les embruns marins, entraînant des émissions de particules de sel dans l'atmosphère. Les particules atmosphériques naturelles peuvent également correspondre à une pollution d'origine végétale provoquée par exemple par les pollens et les champignons (Dikuta, 2019). Outre les apports extraterrestres, les météorites, les éruptions volcaniques peuvent également introduire dans l'atmosphère des quantités très importantes de gaz et de particules (Pénard-Morand & Annesi-Maesano, 2004). Enfin, l'érosion des zones désertiques, la saltation, la mise en suspension et le transport des particules ainsi formées constitue le processus majeur de production de particules atmosphériques minérales naturelles.

Ensuite, la pollution peut également être attribuée à la combustion. Au fil des années, l'humanité a exploité les ressources naturelles à ses propres fins, mais parfois au détriment de son environnement

(Dikuta, 2019). Initialement utilisées pour répondre aux besoins vitaux, puis pour construire des habitats, les ressources naturelles ont été exploitées pour accroître les biens matériels, le confort et la vie sociale des populations. Les différents modes de transport après la seconde révolution industrielle, tels que les véhicules automobiles, les chemins de fer, la navigation et l'aviation, ont été des sources formatrices d'aérosols de pollution (Pénard-Morand & Annesi-Maesano, 2004). Les ménages contribuent également à la pollution de l'air par l'utilisation de systèmes de chauffage, de centrales thermiques et de l'incinération des déchets urbains, ainsi que par l'utilisation de charbon et de bois pour cuisiner ou se chauffer (Dikuta, 2019).

A cela s'ajoute, la pollution d'origine industrielle qui émane des industries métallurgiques, du ciment et de la construction, de la chimie, ainsi que des industries pétrolières et des usines à gaz (Popescu & Ionel, 2010).

Enfin, outre les sources de pollution locales, la qualité de l'air dans un endroit spécifique peut être fortement altérée par le transport d'aérosols atmosphériques de pollution en provenance de sources éloignées, y compris d'autres continents. Ce phénomène de transport de la pollution indique que la mortalité prématurée liée à la pollution atmosphérique, c'est-à-dire le décès d'un individu avant l'espérance de vie normale en raison de l'exposition à la pollution atmosphérique, ne se limite pas aux problèmes locaux. De plus, le commerce international aggrave cette situation en dissociant les lieux de consommation des biens et les sites de production où les émissions, la pollution et la mortalité associées se produisent (Zhang et al., 2017).

Cette pollution chimique d'origine humaine ne connaît donc pas de limites géographiques, et peu importe où les polluants sont libérés dans l'atmosphère, ils auront un impact sur l'environnement mondial (Popescu & Ionel, 2010). On parle alors de pollution transfrontalière, touchant chacun sans exception. Les polluants se dispersent sous l'influence de divers facteurs météorologiques tels que le vent et la température. Des réactions chimiques dans l'air peuvent ensuite conduire à la formation de nouveaux produits nocifs. Par exemple, en Asie, le smog produit par les industries en Chine, en particulier à Pékin, peut se déplacer au-dessus du Japon et, étant poussée par les vents, cette pollution peut traverser l'océan et atteindre les Etats-Unis (Dikuta, 2019).

6.2.3 Les polluants

6.2.3.1 *Particules atmosphériques en suspension*

Les matières particulaires (PM), correspondent à des particules ou encore des aérosols atmosphériques en suspension dans l'air, solides ou liquides (Colbeck & Lazaridis, 2010). Ce sont des particules

inhalables qui peuvent notamment être composées de sulfate, de nitrates, d'ammoniac, de chlorure de sodium, de Black Carbon, de poussières minérales ou d'eau. Les PM peuvent avoir des dimensions variées et sont généralement définies par leur diamètre moyen ; les PM_{2.5} et PM₁₀ étant les plus fréquentes dans le cadre réglementaire mais aussi les plus pertinentes en ce qui concerne la santé (OMS, 2024).

Dans des environnements extérieurs, les principales origines sont spécifiques à chaque emplacement et peuvent être constituées de différentes origines mais comprennent généralement la circulation routière, les activités industrielles, les centrales électriques, les chantiers de construction, la combustion de déchets, les incendies ou les champs. De plus, la combustion de biomasse, incluant le bois, les feuilles, les cultures et les forêts, est la principale source de particules dans de nombreuses régions du monde (Curtis et al., 2006).

Les origines des particules les plus grandes, appelées particules grossières proviennent principalement des pollens, embruns marins et poussières provenant de l'érosion transportées par le vent, mais aussi des espaces agricoles, des routes et des opérations minières. Les particules plus fines (par exemple, PM_{2.5}) émanent de sources primaires comme, par exemple, la combustion de carburants dans des installations de production d'électricité, du chauffage à domicile, des industries ou des véhicules, et de réactions secondaires, comme par exemple, les réactions chimiques gaz et particules. La principale source de particules fines autour du domicile est généralement due à la combustion de carburants polluants dans des foyers ouverts ou des poêles inefficaces et mal ventilés (OMS, 2024).

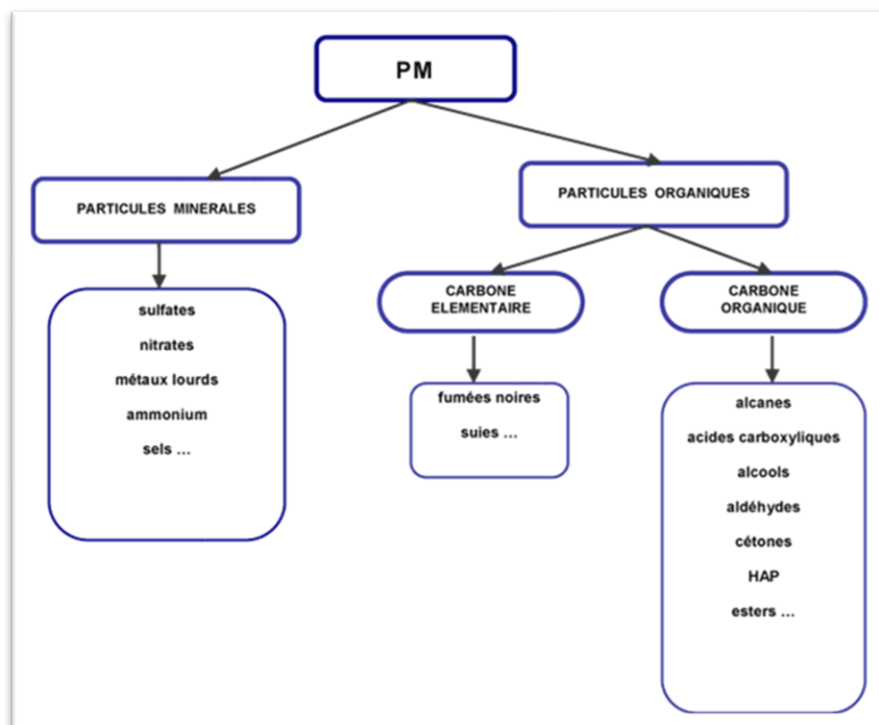
Les risques pour la santé liés aux particules en suspension de moins de 2,5 microns de diamètre (PM_{2.5}) sont particulièrement bien documentés. Les PM_{2.5} peuvent pénétrer profondément dans les poumons et entrer dans la circulation sanguine, provoquant des impacts cardiovasculaires, cérébrovasculaires (AVC) et respiratoires, entraînant parfois la mort. Il a été également confirmé qu'une exposition à long terme peut entraîner des problèmes périnataux et, en 2013, la pollution atmosphérique a été classée comme une cause certaine de cancer du poumon par l'OMS. Les PM_{2.5} sont également les polluants les plus largement utilisés pour évaluer les effets sur la santé de l'exposition à la pollution de l'air (OMS, 2024). De plus, la toxicité des particules varie selon leur composition chimique, certaines substances étant particulièrement préoccupantes, notamment les métaux toxiques tels que le plomb et le mercure, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les substances organiques toxiques persistantes comme les dioxines. Les principales sources extérieures de HAP sont les véhicules automobiles, les centrales électriques au charbon ou au pétrole et la combustion de la biomasse (Curtis et al., 2006).

6.2.3.1.1 La composition chimique des PM

Les particules présentes dans l'air varient beaucoup en termes de composition chimique, selon leur provenance et leur façon d'interagir avec des gaz, des liquides, d'autres solides, dans l'atmosphère (CELINE, 2023b).

Il y a deux grandes catégories de particules : la fraction minérale, qui provient souvent de sources naturelles comme les volcans, et la fraction organique. En général, les particules en suspension dans l'air sont une combinaison de ces deux fractions. La fraction minérale est principalement constituée de sulfates, de nitrates et d'ammonium, ainsi que d'autres éléments en quantités moindres. Quant à la fraction organique, elle comprend deux types de carbone : le carbone élémentaire, qui est essentiellement du carbone pur émis lors de la combustion, et le carbone organique, qui englobe une grande variété de composés organiques émis directement dans l'air ou formés à partir de réactions chimiques. La fraction organique est très complexe et comprend différents composés (Figure 1).

Figure 1 : La composition chimique des particules



Source : CELINE, 2023b.

6.2.3.2 *Le dioxyde d'azote*

Le dioxyde d'azote (NO₂) est un gaz brun rougeâtre soluble dans l'eau et un oxydant puissant. Les sources ambiantes de NO₂ résultent de la combustion à haute température de carburants dans des processus tels que le chauffage, les transports, l'industrie et la production d'électricité. Les sources domestiques d'oxydes d'azote (NO_x) comprennent les équipements qui brûlent des carburants tels que les fours, les cheminées et les cuisinières à gaz. L'exposition au dioxyde d'azote peut irriter les voies respiratoires et aggraver les maladies respiratoires (OMS, 2024).

Plusieurs études ont démontré de fortes corrélations entre les fluctuations quotidiennes du NO₂ et les variations/évolutions des maladies respiratoires, et des admissions hospitalières – mortalité associées. Ces corrélations ont été observées tant dans des études à court terme que dans des études à long terme, même à des concentrations égales ou inférieures aux valeurs limites de qualité de l'air européennes de l'époque (Costa et al., 2014). De plus, le NO₂, ainsi que d'autres oxydes d'azote (NO_x), réagit avec des produits chimiques présents dans l'air pour former à la fois des particules en suspension et de l'ozone. Ces deux composés sont également nocifs lorsqu'ils sont inhalés, entraînant des effets néfastes sur le système respiratoire (EPA, 2023).

6.2.3.3 *L'ozone*

L'ozone (O₃) est un composant majeur du smog. Il se forme à partir de réactions photochimiques avec des polluants tels que les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote émis par les véhicules et l'industrie. En raison de sa nature photochimique, les niveaux les plus élevés d'ozone sont observés pendant les périodes ensoleillées. Il est à noter que l'ozone peut également être généré par des équipements domestiques tels que les conditionneurs d'air (OMS, 2024).

La pollution de l'air par l'ozone peut présenter plusieurs risques pour la santé. L'ozone, présent à des niveaux élevés près du sol, peut provoquer des problèmes respiratoires tels que l'irritation des voies respiratoires, la toux, la gorge irritée et des difficultés à respirer, en particulier chez les personnes souffrant d'asthme ou de maladies pulmonaires. De plus, une exposition prolongée à des niveaux élevés d'ozone peut entraîner une diminution de la fonction pulmonaire, une aggravation des maladies respiratoires chroniques et des crises d'asthme plus fréquentes, en particulier chez les enfants (EPA, 2024a).

6.2.3.4 *Le monoxyde de carbone*

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore et inodore produit par la combustion incomplète de carburants carbonés tels que le bois, l'essence, le charbon, le gaz naturel et le kérosène dans des poêles simples, des foyers ouverts, des lampes à mèche, des fours, des cheminées. La source prédominante de monoxyde de carbone (CO) dans l'air ambiant provient des véhicules automobiles (OMS, 2024).

Le monoxyde de carbone se diffuse à travers les tissus pulmonaires et dans la circulation sanguine, rendant difficile pour les cellules du corps de se lier à l'oxygène. Ce manque d'oxygène endommage les tissus et les cellules et l'exposition au monoxyde de carbone peut provoquer des difficultés respiratoires, de la fatigue, des étourdissements, et d'autres symptômes grippaux. Dès lors, une exposition à des niveaux élevés de monoxyde de carbone peut être mortelle (OMS, 2024).

6.2.3.5 *Le dioxyde de soufre*

Le dioxyde de soufre (SO₂) est un gaz incolore soluble dans l'eau. Il est principalement issu de la combustion de combustibles fossiles pour le chauffage domestique, l'industrie et la production d'électricité (OMS, 2024).

Des expositions à court terme au SO₂ peuvent nuire au système respiratoire humain et rendre la respiration difficile entraînant parfois des admissions à l'hôpital dues à l'asthme (OMS, 2024). Les émissions qui génèrent des concentrations très élevées de SO₂ dans l'air sont également à l'origine de la formation d'autres oxydes de soufre (SO_x). Ces SO_x peuvent interagir avec d'autres composés présents dans l'atmosphère pour créer de petites particules. Ces particules contribuent à la pollution par les matières en suspension (PM) (EPA, 2024b).

6.2.3.6 *Les COVNM*

Les COVNM, ou Composés Organiques Volatils Non Méthaniques, font référence à un groupe de composés organiques qui s'évaporent facilement dans l'air à température ambiante. Ils sont émis à partir de diverses sources telles que les véhicules à moteur, les industries, les solvants et les produits de consommation courante tels que les peintures, les vernis et les produits de nettoyage (Bruxelles Environnement, 2014).

Ces composés jouent un rôle important dans la formation de la pollution atmosphérique, contribuant à la formation d'ozone troposphérique et des aérosols organiques secondaires, ce qui entraîne des effets sur le système respiratoire et cardiovasculaire. En plus de ces effets indirects, certains des COVNM sont

également des substances toxiques qui ont une incidence directe sur des maladies aiguës et chroniques et qui ont potentiellement des effets cancérigènes (Laurent & Hauschild, 2014 ; Bruxelles environnement, 2023c).

6.2.3.7 Les différents polluants émis dans la Région de Bruxelles Capitale

Les principaux polluants atmosphériques de la Région de Bruxelles-Capitale comprennent les NOx, les SOx, les PM2.5 et les COVNM. En 2021, les émissions de ces polluants se sont élevées respectivement à 3,35 ktonnes pour les NOx, 0,36 ktonnes pour les PM2.5, 0,36 ktonnes pour les SOx, et 4,87 ktonnes pour les COVNM (Bruxelles Environnement, 2023b).

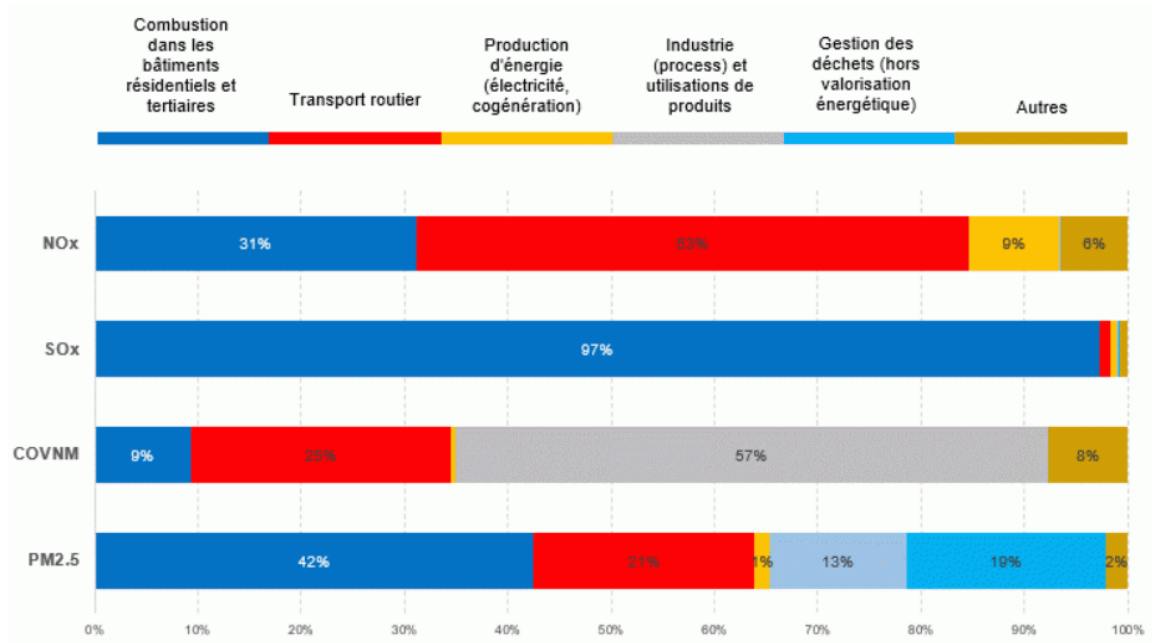
Figure 2 : Le pourcentage de diminution des polluants atmosphériques dans la RBC



Source : Bruxelles Environnement, 2023b

Entre 1990 et 2021, les émissions de divers polluants dans la Région de Bruxelles-Capitale ont considérablement diminué. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre que les émissions de NOx ont mis plus de temps à diminuer, finissant par être réduites de 67%. Les SOx ont enregistré la plus grande réduction avec 88%, marquant une amélioration significative. Les COVNM ont diminué de 63%, avec une hausse en 2020 due aux gels hydroalcooliques. Enfin, les émissions de PM2.5 ont été réduites de 75%, bien que leur diminution ait ralenti entre 2013 et 2021.

Figure 3 : Répartition de l'origine des polluants par secteur 2021



Source : Bruxelles Environnement, 2023b

La Figure 3 illustre la répartition sectorielle des émissions de différents polluants atmosphériques à Bruxelles en 2021, mettant en évidence la diversité des sources pour les PM2.5 comparativement aux autres polluants tels que les NOx et les SOx, qui tendent à être dominés par moins de sources. Les SOx, par exemple, proviennent principalement de la combustion dans les bâtiments, représentant 97% de leur total. De même, les COVNM sont fortement influencés par les processus industriels et l'utilisation de produits (57%). Les NOx, bien que légèrement plus diversifiés, sont surtout émis par le transport routier (53%) et la combustion dans les bâtiments (31%), montrant une concentration de sources moins variée que pour les PM2.5.

Concernant les PM2.5, la combustion dans les bâtiments résidentiels et tertiaires est la principale source, avec 42% des émissions, indiquant que le chauffage des bâtiments est la source majeure de ces particules fines dans l'air urbain de la Région de Bruxelles-Capitale. De manière plus précise la combustion résidentielle compte pour 35% et celle du tertiaire 7% (Bruxelles environnement, 2023b). Le transport routier contribue également de manière significative aux émissions de PM2.5, avec 21% des émissions. Par ailleurs, les processus industriels et l'utilisation de divers produits représentent 13% des émissions de PM2.5. Les déchets non valorisés énergétiquement ajoutent 19% aux émissions. Enfin, 3% des émissions proviennent d'autres sources non spécifiées, soulignant des contributions mineures ou non

catégorisées. Dès lors, cette distribution illustre l'importance de cibler différents secteurs dans l'optique de réduire efficacement les niveaux de PM2.5 dans la RBC.

6.3 Les effets sur la santé

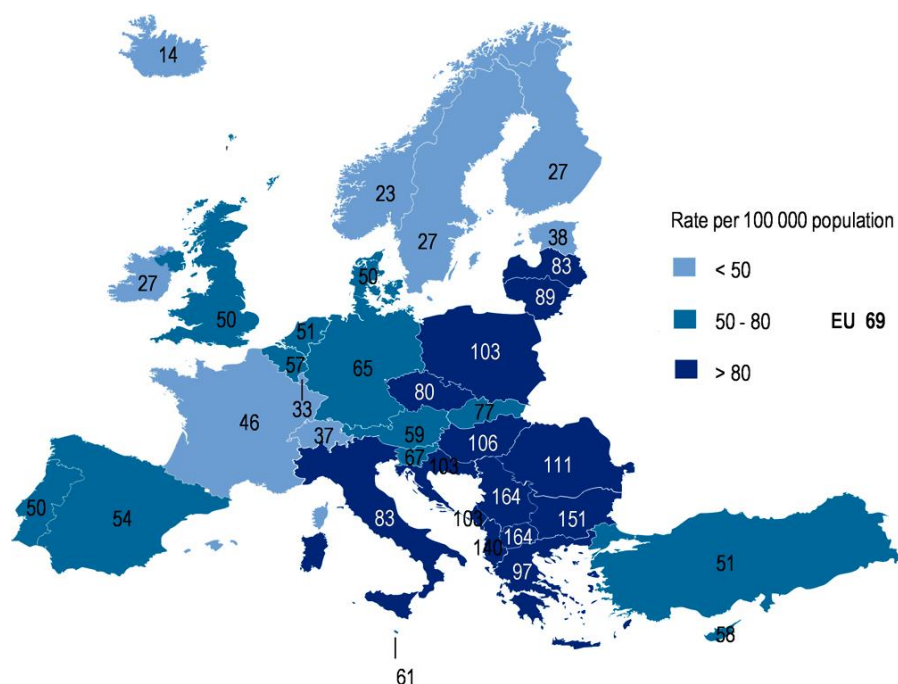
La pollution atmosphérique constitue un risque sanitaires significatif lié à l'environnement. En agissant sur les niveaux de pollution de l'air, les nations peuvent diminuer l'impact sur la santé, réduisant ainsi de manière conséquente les accidents vasculaires cérébraux, les maladies cardiaques, le cancer du poumon et les troubles respiratoires, comme l'asthme. En effet, en 2019, près de 99 % de la population mondiale résidait dans des zones où les normes recommandées par les directives de l'OMS en matière de qualité de l'air n'étaient pas respectées (OMS, 2022).

Les conséquences conjointes de la pollution de l'air extérieur et intérieur sont responsables de 6,7 millions de décès prématurés annuellement, et, en 2019, on évaluait à 4,2 millions le nombre de décès prématurés imputables à la pollution de l'air extérieur à l'échelle mondiale (OMS, 2022). De plus, une proportion considérable, soit 89 % de ces décès prématurés, s'est produite dans des nations à faible ou moyen revenu, dont les régions de l'Asie du Sud-Est et du Pacifique occidental étant les plus touchées.

De la même manière, en 2020, la pollution atmosphérique a causé un nombre important de décès prématurés dans les États membres de l'Union européenne. Une exposition aux concentrations élevées de particules fines, dépassant les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé pour l'année 2021, a été responsable de 238 000 décès prématurés (Figure 4). De même, une exposition au dioxyde d'azote dépassant les niveaux recommandés a conduit à 49 000 décès prématurés, tandis qu'une exposition aiguë à l'ozone a été à l'origine de 24 000 décès prématurés (EEA, 2022).

Les effets des polluants atmosphériques sur la santé en Europe sont significatifs, comme le montrent les résultats de plusieurs études. En particulier, l'exposition aux particules fines et au dioxyde d'azote est associée à une augmentation des décès prématurés et des problèmes de santé respiratoire. Selon l'OMS, le respect des lignes directrices sur la pollution de l'air pourrait prévenir jusqu'à 50 000 décès par an dus à l'exposition aux PM2.5 et jusqu'à 900 décès pour le NO₂. De plus, une réduction de la pollution de l'air aux niveaux les plus bas mesurés pourrait permettre d'épargner jusqu'à 125 000 vies par an au niveau des PM2.5 et jusqu'à 80 000 au niveau du NO₂. Ces chiffres soulignent l'importance de prendre des mesures pour réduire les émissions de polluants atmosphériques en Europe afin de protéger la santé des populations (Khomeenko et al., 2021).

Figure 4 : Morts prématurés en Europe dus à la concentration en PM2.5 en 2019



Source : González Ortiz et al., 2021

En plus des décès prématurés, la pollution atmosphérique entraîne également des problèmes de santé. Les personnes vivent avec des maladies causées par l'exposition à la pollution atmosphérique, ce qui constitue à la fois un fardeau personnel et entraîne des coûts importants pour le secteur de la santé. En 2019, l'exposition aux PM2.5 a entraîné environ 175 000 années vécues avec un handicap en raison de la maladie pulmonaire obstructive chronique dans l'ensemble des pays européens. Pendant la même période, l'exposition au NO₂ a conduit à près de 175 000 années vécues avec un handicap en raison du diabète. En outre, 12 253 personnes ont été admises à l'hôpital pour des infections des voies respiratoires causées par une exposition à l'ozone (EEA, 2022).

7. Les échelons de gestion de la qualité de l'air

7.1 L'OMS

7.1.1 Le contexte historique

Depuis 1987, l'OMS émet régulièrement des recommandations basées sur la santé pour guider les gouvernements et la société civile dans la réduction de l'exposition humaine à la pollution de l'air et de ses effets néfastes. C'est en 2005 que les premières lignes directrices sur la qualité de l'air sont appues dans un rapport, intitulé "Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide" (OMS, 2006). Ce rapport fournit des limites basées sur la santé pour les principaux polluants atmosphériques préjudiciables, tels que les PM, l'O₃, le NO₂ et le SO₂. Cette mise à jour mondiale a influencé de manière significative les politiques de lutte contre la pollution dans le monde entier, créant le premier cadre de référence universel (OMS, 2021).

Ces lignes directrices ont stimulé, de diverses manières, les autorités et la société civile à intensifier leurs efforts pour contrôler et étudier les expositions nuisibles à la pollution de l'air. Par ailleurs, la résolution WHA68.8, adoptée lors de la 68e Assemblée mondiale de la santé en 2015, fait suite aux recommandations de l'OMS et vise à renforcer la qualité de l'air intérieur et extérieur afin de protéger la santé publique. Cette résolution reconnaît les effets néfastes de la pollution de l'air sur la santé humaine et appelle les 194 États Membres à prendre des mesures pour réduire les émissions de polluants atmosphériques et améliorer la qualité de l'air (OMS, 2016). Cette résolution souligne la nécessité de redoubler d'efforts pour protéger les populations des risques sanitaires liés à la pollution de l'air.

De plus, les Objectifs de Développement Durable (ODD) des Nations Unies ont été conçus pour répondre à la menace pour la santé publique posée par la pollution de l'air, fixant des objectifs spécifiques pour réduire l'exposition à la pollution de l'air et la charge de morbidité qui en découle. L'ODD 3 se concentre sur la santé et vise spécifiquement à réduire les décès et les maladies liés à la pollution de l'air. L'ODD 11, quant à lui, met l'accent sur les villes durables et inclusives et cherche à réduire l'impact négatif de la pollution de l'air urbain (ONU, 2015).

En 2021, l'OMS a publié de nouvelles recommandations concernant la qualité de l'air, qui remplacent celles établies en 2005. Ces nouvelles recommandations visent à tenir compte des avancées scientifiques et des évolutions dans la compréhension des effets de la pollution de l'air sur la santé humaine. Près de 15 ans se sont écoulés depuis la publication de la mise à jour globale de 2005. Pendant ce laps de temps, les progrès dans la mesure de la pollution de l'air et l'évaluation de l'exposition, ainsi que l'élargissement

de la base de données mondiale des mesures de la pollution de l'air, ont conduit à une augmentation marquée des preuves des effets néfastes de la pollution de l'air sur la santé. De nouvelles études épidémiologiques ont documenté les effets nocifs de l'exposition à des niveaux élevés de pollution de l'air dans les pays à revenu faible et intermédiaire, tandis que des études menées dans des pays à revenu élevé bénéficiant d'un air relativement propre ont signalé des effets nocifs à des niveaux bien inférieurs à ceux qui avaient été étudiés précédemment (OMS, 2021).

7.1.2 Les recommandations de l'OMS

Les recommandations de l'OMS pour la qualité de l'air ont été mises à jour entre 2005 et 2021, avec des seuils plus stricts pour plusieurs. Celles-ci visent à guider les gouvernements dans la gestion de la qualité de l'air, en proposant des seuils et des objectifs pour les principaux polluants atmosphériques. Bien qu'elles ne soient pas contraignantes légalement, elles offrent une base scientifique pour réduire les risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique et sont adaptées à diverses conditions dans le monde entier (OMS, 2021).

Figure 5 : Recommandations de l'OMS

Polluant	Averaging Time	2005 AQGs	2021 AQGs
PM _{2.5} , µg/m ³	Annual	10	5
	24-hour ^a	25	15
PM ₁₀ , µg/m ³	Annual	20	15
	24-hour ^a	50	45
O ₃ , µg/m ³	Peak season ^b	-	60
	8-hour ^a	100	100
NO ₂ , µg/m ³	Annual	40	10
	24-hour ^a	-	25
SO ₂ , µg/m ³	24-hour ^a	20	40
CO, mg/m ³	24-hour ^a	-	4

Source : OMS, 2021

D'abord, pour le PM_{2.5}, la valeur annuelle recommandée est passée de 10 µg/m³ à 5 µg/m³, et la limite de 24 heures est passée de 25 µg/m³ à 15 µg/m³, toujours avec un maximum de 3 à 4 jours de dépassement par an. Ensuite, la limite annuelle pour le PM₁₀ est réduite de 20 µg/m³ à 15 µg/m³, et celle de 24 heures de 50 µg/m³ à 45 µg/m³. Concernant le NO₂, la limite annuelle a été abaissée de 40 µg/m³ à 10 µg/m³, et une nouvelle limite de 24 heures de 25 µg/m³ a été introduite. Inversement, pour le SO₂, la recommandation de 24 heures est passée de 20 µg/m³ à 40 µg/m³. Enfin, une limite de 24 heures de 4 mg/m³ a été ajoutée pour le CO. Dans l'ensemble ces changements reflètent une reconnaissance accrue des effets néfastes de ces polluants même à des concentrations plus faibles.

7.2 L'Union Européenne

7.2.1 L'évolution des directives européennes

L'évolution des directives européennes sur la qualité de l'air a progressé de manière significative au fil des ans. Initialement, la Directive 96/62/CE de 1996 a établi les bases pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air, remplaçant plusieurs directives antérieures concernant des polluants spécifiques comme le SO₂, le Pb, le NO₂ et l'O₃, datant de 1980 (European Commission, 2024). Cette directive-cadre a été complétée par des sous-directives définissant des normes pour divers polluants, incluant des valeurs limites et des seuils d'alerte, ainsi que des méthodes de mesure standardisées.

Par la suite, deux directives principales sont devenues les fondements de la politique de l'air en Europe (CELINE, 2024a). La directive 2008/50/CE a établi des objectifs pour les concentrations des principaux polluants atmosphériques. Elle précise les méthodes de mesure, les exigences pour les valeurs limites et cibles, ainsi que les seuils d'information et d'alerte pour divers polluants. Elle stipule également comment les données sur la qualité de l'air doivent être communiquées au public. La directive 2016/2284, quant à elle, fixe des objectifs de réduction des émissions nationales pour certains polluants, contribuant ainsi à améliorer globalement la qualité de l'air en Europe.

En plus de ces directives, les recommandations de l'OMS jouent un rôle crucial car elles fournissent des valeurs indicatives basées sur les dernières recherches scientifiques, guidant les politiques nationales et européennes pour protéger la santé publique et l'environnement.

En 2022, une révision de la directive de 2008 a été proposée par la Commission Européenne. Cette révision vise à renforcer les limites des valeurs, à améliorer le cadre juridique et à ajuster les règles de surveillance et de modélisation. Elle intègre également une directive distincte concernant la régulation de polluants supplémentaires, dans le but de simplifier et de compléter la législation existante (CELINE, 2024a). Cette proposition découle d'un processus de plusieurs années, incluant des évaluations, des consultations et des études préliminaires. Elle cherche à prendre en compte au maximum les valeurs recommandées par l'OMS, publiées en 2021. Le Parlement Européen a validé cette proposition en 2023, et le Conseil Européen a suggéré des ajustements. En 2024, les négociations sont toujours en cours pour parvenir à un accord final sur le texte révisé (CELINE, 2024a).

7.2.2 Les objectifs européens

Les directives sur la qualité de l'air ambiant établissent des normes de qualité de l'air pour douze polluants différents, allant du dioxyde de soufre aux particules en suspension en passant par le benzène

et le monoxyde de carbone. Ces normes s'appuient sur les recommandations de l'OMS et sont destinées à protéger la santé humaine (European Commission, 2020).

Figure 6 : Les standards de qualité de l'air dans Union Européenne

Pollutant	Concentration	Averaging period	Legal nature	Permitted exceedences each year
Fine particles (PM _{2.5})	25 µg/m ³	1 year	Target value to be met as of 1.1.2010 Limit value to be met as of 1.1.2015	n/a
Fine particles (PM _{2.5})	20 µg/m ³	1 year	Stage 2 limit value to be met as of 1.1.2020 ***	n/a
Sulphur dioxide (SO ₂)	350 µg/m ³	1 hour	Limit value to be met as of 1.1.2005	24
Sulphur dioxide (SO ₂)	125 µg/m ³	24 hours	Limit value to be met as of 1.1.2005	3
Nitrogen dioxide (NO ₂)	200 µg/m ³	1 hour	Limit value to be met as of 1.1.2010	18
Nitrogen dioxide (NO ₂)	40 µg/m ³	1 year	Limit value to be met as of 1.1.2010 *	n/a
Particulate matter (PM ₁₀)	50 µg/m ³	24 hours	Limit value to be met as of 1.1.2005 **	35

Source : European Commission, 2020

Les particules fines (PM_{2.5}) ont des valeurs cibles de 25 µg/m³ et 20 µg/m³ pour une moyenne annuelle, à atteindre respectivement dès 2010 et 2015. Ensuite, le dioxyde de soufre a une limite horaire de 350 µg/m³ avec jusqu'à 24 dépassements autorisés par an, et une limite journalière de 125 µg/m³ avec 3 dépassements permis. Le dioxyde d'azote (NO₂) a une limite horaire de 200 µg/m³ avec 18 dépassements tolérés par an, et une limite annuelle de 40 µg/m³. Les particules (PM₁₀) ont une limite journalière de 50 µg/m³ avec 35 dépassements autorisés par an et une limite annuelle moyenne de 40 µg/m³ (European Commission, 2020). En somme, la majorité des normes européennes était déjà bien au-dessus de celles de l'OMS de 2005 et l'écart se creuse en 2021 (Figure 6).

En outre, ces directives orientent la surveillance de la qualité de l'air en mettant en place un réseau de surveillance complet avec plus de 4 000 stations dans toute l'UE. Elles encouragent également la diffusion d'informations fiables et objectives sur la qualité de l'air, notamment envers le grand public. En cas de dépassement des normes, les États membres sont tenus de préparer des plans d'action visant à

identifier et à réduire les sources de pollution, ainsi qu'à informer la population des mesures prises (European Commission, 2024).

La révision de ces normes est en cours et devrait bientôt entrer en vigueur. Les nouvelles règles établiront des limites et des valeurs cibles plus strictes pour 2030, par rapport aux seuils actuels, pour plusieurs polluants, notamment les PM_{2.5}, les PM₁₀, le NO₂ et le SO₂. Pour les deux polluants ayant le plus grand impact avéré sur la santé humaine, les PM_{2.5} et le NO₂, les valeurs limites annuelles devraient être plus que divisées par deux, passant respectivement de 25 à 10 µg/m³ et de 40 à 20 µg/m³. Il y aura également davantage de points de surveillance de la qualité de l'air dans les villes. Les normes de qualité de l'air seront révisées d'ici fin 2030 et au moins tous les cinq ans par la suite, et même plus fréquemment si de nouvelles découvertes scientifiques le justifient (European Parliament, 2024).

7.3 La Belgique

7.3.1 Les obligations européennes

La Belgique est tenue de fournir un air sain à ses citoyens en vertu du droit européen et des lois nationales. Au niveau européen, la législation en matière de qualité de l'air est établie par la Commission européenne à travers plusieurs directives, telles que la Directive 2008/50/CE sur la qualité de l'air ambiant et pour une atmosphère plus propre en Europe. Cette directive fixe des normes de qualité de l'air pour différents polluants atmosphériques, regroupant notamment les particules fines, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre et l'ozone (Rapport Spécial de la Cour des comptes européenne, 2018).

La Belgique, en tant qu'État membre de l'Union européenne, est tenue de transposer ces directives européennes dans son droit national et de prendre les mesures nécessaires pour assurer le respect des normes de qualité de l'air établies (SPF, 2023). Cela implique l'adoption de plans d'action nationaux, de mesures de réduction des émissions polluantes, et la mise en place de systèmes de surveillance de la qualité de l'air pour évaluer régulièrement les niveaux de pollution atmosphérique.

En cas de non-respect des normes de qualité de l'air, la Commission européenne peut engager des procédures d'infraction à l'encontre de la Belgique, ce qui peut éventuellement aboutir à des sanctions financières (Wolff & Perry, 2010). La Commission peut également adresser des mises en demeure à la Belgique pour lui demander de prendre des mesures correctives afin de se conformer aux directives européennes sur la qualité de l'air. Ces mises en demeure sont souvent un premier avertissement avant toute action juridique ultérieure (European Union sanctions, 2023).

7.3.2 La responsabilité fédérale et la gestion régionale

Depuis les années 1980, la Belgique a évolué vers une structure fédérale complexe qui touche en particulier le secteur de l'environnement. Les responsabilités environnementales sont partagées entre les régions et les autorités fédérales ; ces dernières conservant le droit de définir uniquement les normes environnementales. La Flandre a rapidement établi une politique environnementale ambitieuse tandis que la Wallonie a développé progressivement un cadre d'intervention spécifique. Il serait fort utile que les régions puissent coopérer pour représenter la Belgique auprès des institutions européennes, malgré une reconnaissance limitée de leur autonomie régionale au niveau de l'UE.

La directive 2008/50/CE accorde une certaine flexibilité aux États membres pour atteindre les objectifs environnementaux à travers des plans stratégiques pluriannuels mais impose des délais stricts et des objectifs contraignants (SPF, 2023). En Belgique, les régions sont responsables de la gestion des sources de pollution fixe et des réseaux de mesure de la qualité de l'air tandis que les autorités fédérales s'occupent des sources de pollution provenant des produits du quotidien et des véhicules (Dikuta, 2019).

Chaque région belge a mis en place ses propres instruments et plans pour respecter ces obligations, en coopérant à travers un réseau commun, le réseau CELINE, qui surveille la qualité de l'air et transmet les données aux instances européennes. Cette organisation permet de gérer les obligations imposées par le cadre européen tout en adaptant les actions aux spécificités régionales (Vanhaeren et al., 2013).

7.4 La Région de Bruxelles-Capitale

7.4.1 L'évolution de la qualité de l'air

La Région de Bruxelles-Capitale (RBC) est depuis longtemps confrontée à un problème de pollution de l'air. En effet, jusqu'en 2009, la commune de Molenbeek-Saint-Jean a dépassé chaque année la directive européenne autorisant un maximum de 35 jours par an où la concentration de PM10 peut être supérieure à 50 µg/m³ (Bruxelles Environnement, 2023b). De même, entre 2009 et 2016, la RBC comptait en moyenne plus de 40 µg/m³ de concentration de NO₂ par an, dépassant la limite fixée par la directive européenne 2008/50/CE (Rapport Spécial de la Cour des Comptes Européenne, 2018). En conséquence, en 2021, Bruxelles a été classée en huitième position parmi 1000 villes européennes par le « Barcelona Institute for Global Health » sur base du taux de mortalité prématuré attribuable au NO₂. Cette classification fut marquée par 530 décès prématurés qui auraient pu être évités (Khomenko et al., 2021).

Dès lors, en 2016, la RBC a adopté le Plan régional Air-Climat-Energie (PACE) qui est un plan d'action concret pour mettre en œuvre les objectifs du Code Bruxellois de l'Air, du Climat et de la maîtrise de

l'Energie (CoBRACE). Ce plan vise principalement à réduire les émissions de polluants atmosphériques et à atteindre les objectifs climatiques européens (Bruxelles Environnement, 2023b). Toutefois, certaines critiques ont révélé que les actions proposées jusqu'à présent par la RBC n'étaient pas assez concrètes. En effet, les actions n'étaient pas assez budgétisées, il y avait un manque de méthode d'évaluation fiable et il n'y avait pas d'ordre de priorité dans les actions à entreprendre (Scohier et al., 2015).

Dernièrement, en 2019, les avocats de l'ONG ClientEarth ont réagi aux dernières cartes de qualité de l'air publiées par l'Agence Belge de l'Environnement Inter-Régionale (CELINE), soulignant l'impératif de remédier rapidement aux lacunes sérieuses dans le réseau de surveillance de la pollution de la ville. Selon les données, des niveaux illégaux et préjudiciables de NO₂ avaient été détectés sur une grande partie de Bruxelles. Les cartes révèlent également qu'en 2019, les concentrations de PM_{2.5} dépassaient les recommandations de l'OMS dans l'ensemble du territoire de la Région bruxelloise.

Suite à ces préoccupations et au procès remporté par ClientEarth et cinq résidents locaux dans leur procès pour garantir le droit à un air pur à Bruxelles, deux stations de mesure de la qualité de l'air ont été installées à Bruxelles, en 2021 (ClientEarth, 2021a).

7.4.2 Gestion de la qualité de l'air dans la Région de Bruxelles-Capitale

7.4.2.1 *Le cadre législatif*

En 2013, la Région de Bruxelles-Capitale a introduit le Code Bruxellois de l'Air, du Climat et de la Maîtrise de l'Énergie (CoBRACE). Il s'inscrit dans le cadre des efforts de la Région pour répondre aux enjeux environnementaux et climatiques actuels. Le CoBRACE intègre diverses législations visant à améliorer la qualité de l'air, réduire les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir l'efficacité énergétique (Vanderstraeten & Tulkens, 2013). En outre, il est le fondement légal de la plupart des plans et actions de la Région comme le Plan Régional Air-Climat-Energie (PACE), la Zone de Basses Emissions (LEZ) ou encore la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) (Bruxelles Environnement, 2024a).

7.4.2.2 *L'objectif de la région*

Dans sa déclaration de politique générale (DPG) pour 2019-2024, le gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale s'engage à aligner les seuils de pollution actuels sur les recommandations de l'OMS, en collaboration avec les parties prenantes concernées (DPG, 2019). Cet engagement est réaffirmé dans le PACE de 2023, avec Bruxelles Environnement soulignant la nécessité de réduire rapidement les

émissions locales et d'encourager les autres gouvernements régionaux et la Commission européenne à adopter également les valeurs limites de l'OMS dans leurs législations et plans respectifs (PACE, 2023).

7.4.2.3 Le Plan Régional Air-Climat-Energie

En 1999, le Parlement de la Région de Bruxelles-Capitale a mandaté l'élaboration d'un « Plan d'amélioration structurelle de la qualité de l'air et de lutte contre le réchauffement climatique ». Préparé par l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), ce plan couvrait la période de 2002 à 2010 concernant plusieurs axes clés. D'abord, réduire les émissions du transport routier en améliorant les transports en commun, encourageant les déplacements moins polluants et promouvant l'utilisation de véhicules propres. Ensuite, le plan visait le secteur résidentiel et tertiaire en mettant l'accent sur le renouvellement des chaudières et l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Pour le secteur industriel, des réglementations spécifiques étaient prévues pour divers types d'industries, comme les imprimeries, les incinérateurs ou les carrosseries, encourageant l'adoption de pratiques plus respectueuses de l'environnement et le filtrage des émissions. Le plan abordait aussi la gestion des émissions de solvants et des incinérations domestiques avec des réglementations strictes pour minimiser les émissions de ces sources. Enfin, des actions étaient prévues pour informer et sensibiliser la population sur l'importance de la qualité de l'air, via des campagnes de communication, des programmes éducatifs et des incitations à adopter des comportements plus respectueux de l'environnement (IBGE, 2002).

En 2016, le premier Plan Régional Air-Climat-Energie (PACE) est adopté et il ne se concentre plus que sur trois axes majeurs en ce qui concerne la pollution atmosphérique. Pour les bâtiments, les mesures incluent l'élimination des obstacles aux travaux d'efficacité énergétique, la promotion de certifications durables et l'amélioration des incitants financiers pour les rénovations. Concernant les transports, le plan vise à rationaliser l'usage des véhicules, promouvoir les alternatives à la voiture individuelle et mettre en place une zone de basses émissions régionale permanente. Enfin, le troisième axe concerne la surveillance de la qualité de l'air et prévoit des améliorations dans les mesures et le suivi de la qualité de l'air ainsi que des actions pour sensibiliser le public et les professionnels de la santé aux impacts de la pollution atmosphérique (PACE, 2016).

En 2023, la dernière version du PACE est mise en place et se concentre sur un objectif dans la perspective d'amélioration de la qualité de l'air : atteindre les valeurs-guides de l'OMS d'ici 2035. Pour ce faire, les trois axes de 2016 sont repris, avec des objectifs plus précis cette fois-ci.

7.4.2.3.1 Le transport et la mobilité

7.4.2.3.1.1 Améliorer la mobilité avec le plan Good Move

Le plan Good Move, adopté en 2019, vise à améliorer la mobilité à Bruxelles d'ici 2030 et à atteindre les objectifs air-climat-énergie fixés pour cette période. Ce plan inclut des actions visant à rationaliser les déplacements, encourager les alternatives à la voiture individuelle, et améliorer les performances environnementales des véhicules. Le PACE souligne donc l'importance d'accélérer sa mise en œuvre mais aussi d'impliquer les communes et les acteurs économiques pour faciliter l'adoption de ces mesures au niveau local (Bruxelles Mobilité, 2018).

Un élément clé du plan Good Move lié aux émissions de polluants atmosphérique est le projet Smart Move qui introduit une tarification kilométrique intelligente pour réduire le trafic et les émissions de polluants liés. Ce système vise à calculer les frais en fonction de l'heure de circulation et du type de véhicule (Bruxelles Mobilité, 2024).

Par ailleurs, le PACE s'appuie sur le concept de la "ville des courtes distances", issu du plan Good Move, visant à ce que les habitants trouvent tous les services nécessaires à proximité de chez eux. Cela implique le développement de centres urbains à petite échelle dans les quartiers, offrant des commerces, des loisirs et des soins de santé accessibles à pied ou à vélo.

Enfin, la fiscalité régionale doit être ajustée pour dissuader l'achat de véhicules non adaptés à un environnement urbain et encourager l'autopartage. Cela inclut des avantages fiscaux pour les véhicules partagés ainsi que pour les véhicules alternatifs aux combustibles fossiles les moins émetteurs.

7.4.2.3.1.2 La LEZ et la transition vers les véhicules sans émissions directes

Les zones de basses émissions, en anglais Low Emission Zones (LEZ), représentent des secteurs urbains où certains véhicules ne sont pas autorisés en raison de leurs normes d'émission. L'idée des LEZ a émergé en Suède dans les années 1990, initialement appliquée aux véhicules lourds. Toutefois, après que l'Allemagne ait lancé les "Umweltzonen", des LEZ, pour certaines villes à partir de 2008, cet outil a gagné en popularité en Europe. Actuellement, plus de 250 LEZ sont en vigueur, principalement en Allemagne et en Italie, avec des exemples notables dans plusieurs capitales européennes. En dehors de l'Europe, on en trouve très peu, sauf en Asie, où certaines villes ont une LEZ mais pour les véhicules lourds (Verbeek & Hincks, 2022).

La LEZ de Bruxelles a été mise en place par étape, avec une première annonce en 2016 et une entrée en vigueur le 1er janvier 2018, avec une communication détaillée pour sensibiliser les résidents et les visiteurs. Depuis octobre 2018, des amendes sont émises pour non-respect des règles, encourageant ainsi l'adoption de véhicules plus propres. Cette initiative, visant à limiter l'accès aux véhicules les plus polluants pour améliorer la qualité de l'air de la région, prévoit par ailleurs l'interdiction des véhicules diesel dès 2030, suivis des véhicules essence en 2035. En outre, des calendriers spécifiques s'appliquent aux autres catégories de véhicules, comme les camionnettes et les poids lourds (Bruxelles Environnement, 2018).

L'implémentation de la LEZ dans la RBC permet déjà d'observer certains changements. En 2023, le parc automobile n'était composé que de 35 % de diesel, contre 62% en 2018. Ce changement a permis de réduire les émissions de Black Carbon, sous-catégorie des PM2.5, de 62 % entre 2018 et 2022. De plus, les véhicules diesel interdits dans la LEZ depuis 2022 émettaient six fois plus de particules fines que ceux encore autorisés et la concentration de NO₂ le long des routes avec le plus de trafic a diminué de 30 % depuis 2018 (Bruxelles Environnement, 2022a).

Pour continuer sur cette lancée, le PACE a pour objectif de mener à bien la suite des restrictions du calendrier de la LEZ, sans négliger les classes les plus fragilisées et en y intégrant les avancées scientifiques sur les carburants décarbonés comme l'hydrogène vert. Le contrôle devra aussi être renforcé avec plus de caméras et des sanctions pour les entreprises sans plan de déplacement (PACE, 2023).

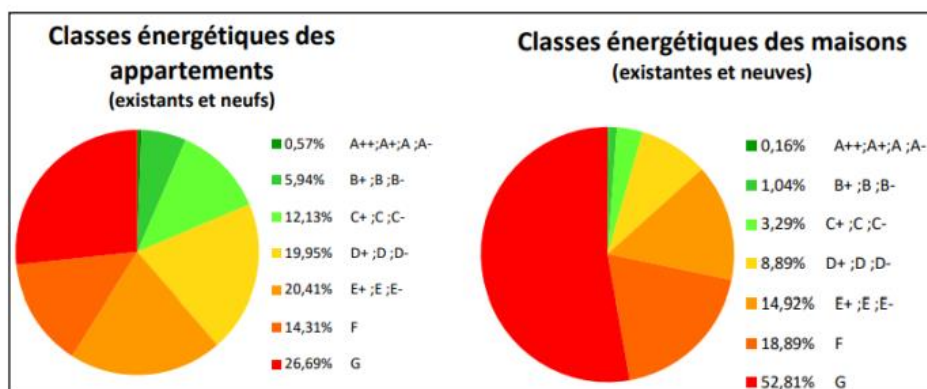
7.4.2.3.2 Le bâtiment et la PEB

7.4.2.3.2.1 La PEB

La directive européenne 2002/91/CE a pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et de réduire leurs émissions de CO₂. Elle oblige les États membres à établir des exigences de performance énergétique pour les bâtiments neufs et les rénovations majeures, à instaurer un système de certification énergétique lors de la construction, la vente ou la location, et à effectuer des contrôles réguliers des chaudières (IBGE, 2014). En réponse à cette directive, la Région de Bruxelles-Capitale a publié l'ordonnance relative à la performance énergétique et au climat intérieur des bâtiments (Ordonnance PEB), publiée en 2007. Cette ordonnance constitue un levier essentiel pour la mise en œuvre d'une politique régionale ambitieuse en matière d'efficacité énergétique, visant à rendre les bâtiments moins énergivores et plus respectueux de l'environnement. En 2015, l'ordonnance est abrogée et les réglementations PEB sont directement intégrées au CoBRACE (Bruxelles Environnement, 2017).

La première étape a consisté à évaluer la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB), c'est-à-dire à déterminer l'énergie nécessaire pour le chauffage, la production d'eau chaude et la climatisation. Depuis 2011, les propriétaires immobiliers ont été obligés d'obtenir un certificat PEB, indiquant la performance énergétique de leurs biens, dans l'optique de vendre ou de louer celui-ci (Bruxelles Environnement, 2022c). Cela a permis de classer les bâtiments en différentes catégories, facilitant la compréhension des besoins énergétiques régionaux pour le chauffage. La Figure 7 montre ce classement, révélant une faible proportion de logements avec une bonne performance énergétique et soulignant que les maisons présentent des besoins énergétiques plus importants, probablement en raison de certains quartiers et communes à caractère résidentiel.

Figure 7 : Les certificats PEB émis par type d'habitation individuelle



Source : Bruxelles Environnement, 2021

Ensuite, afin d'améliorer les certificats PEB les plus faibles, la Région de Bruxelles-Capitale a mis en place en 2021 un système de primes appelée « prime Révolution », comme planifié dans le PACE 2016. Ce dispositif vise à encourager les rénovations énergétiques en offrant des subventions pour divers travaux améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments. Les propriétaires peuvent obtenir des aides financières pour l'isolation, le remplacement des chaudières, l'installation de systèmes de chauffage plus efficaces et l'intégration de sources d'énergie renouvelable (Bruxelles Environnement, 2024b).

7.4.2.3.2.2 Sortir des combustibles fossiles et polluants

Pour réduire les émissions de polluants atmosphériques mais aussi atteindre une neutralité carbone, la Région de Bruxelles-Capitale cherche à éliminer progressivement les combustibles fossiles dans le cadre des installations HVAC (chauffage, ventilation et climatisation). Cela inclut l'interdiction des appareils au charbon dès 2021 et des chaudières au mazout à partir de 2025. Le gouvernement prévoit également de cesser l'utilisation des appareils fonctionnant au gaz naturel d'ici 2030, mais cette action est encore au stade d'analyse de faisabilité. À la place, des alternatives comme les pompes à chaleur, les

installations solaires thermiques et d'autres sources d'énergie renouvelable sont encouragées. Des études sont en cours pour évaluer l'avenir du gaz naturel à Bruxelles et déterminer les meilleures stratégies pour une décarbonation efficace. Le plan prévoit aussi des mesures financières et réglementaires pour soutenir cette transition énergétique, incluant des surprimes pour le remplacement des installations polluantes par des solutions plus respectueuses de l'environnement. A l'inverse, le PACE envisage de retirer les surprimes incitant la mise en place d'installations fonctionnant au gaz (PACE, 2023).

7.4.2.3.2.3 Réduire les émissions liées au chauffage au bois

Pour réduire les émissions liées au chauffage au bois, la Région de Bruxelles-Capitale doit tenir compte des risques des installations inadaptées au contexte urbain. Les appareils de chauffage d'appoint non réglementés, tels que les foyers ouverts et les poêles à bois, sont particulièrement préoccupants en raison des émissions de particules fines. La Région envisage de communiquer sur les nuisances associées à la combustion du bois, d'étudier l'opportunité d'interdire les équipements de chauffage au bois, et de mettre en place des incitations pour remplacer ces appareils par des alternatives plus écologiques, comme les pompes à chaleur (PACE, 2023).

7.4.2.3.3 La surveillance de la qualité de l'air

Pour améliorer la qualité de l'air à Bruxelles, le PACE rappelle la nécessité d'aligner les normes locales sur les nouvelles valeurs-guides de l'OMS. Ces recommandations ont été révisées à la hausse en 2021, ce qui nécessite une réduction importante tant au niveau régional qu'europpéen. Le renforcement des normes de qualité de l'air inclut l'ajustement des seuils de déclenchement des mesures en cas de pics de pollution et la révision de l'indice de qualité de l'air (PACE, 2023).

La surveillance de la qualité de l'air sera renforcée, notamment dans les zones où les populations vulnérables, comme les enfants et les personnes âgées, sont exposées. Cela implique une expansion du réseau de mesure, avec l'installation de nouvelles stations de surveillance et l'utilisation de projets locaux. Les initiatives de biomonitoring, comme l'étude sur 220 enfants d'école primaire réalisée par l'université de Hasselt, seront également amplifiées. Cette dernière consiste à mesurer la pollution provenant du trafic grâce à un appareil que les enfants porteront durant trois années chez eux et à l'école (PACE, 2023).

A travers le PACE 2023, le gouvernement s'engage à mettre à disposition du public les résultats de ces mesures et à entreprendre des actions régulières de communication et de sensibilisation sur les enjeux de la qualité de l'air, afin d'améliorer la compréhension des citoyens sur la manière de se protéger contre la pollution et de réduire leurs propres émissions.

8. Etude de cas

8.1 Les données

8.1.1 La qualité des données

Les données utilisées dans ce mémoire ont été collectées par la Cellule Interrégionale de l'Environnement (CELINE), responsable de la surveillance de la qualité de l'air en Belgique, du respect des normes de l'Union Européenne et de l'information du public concernant les pics de pollution futurs (Vanhaeren et al., 2013).

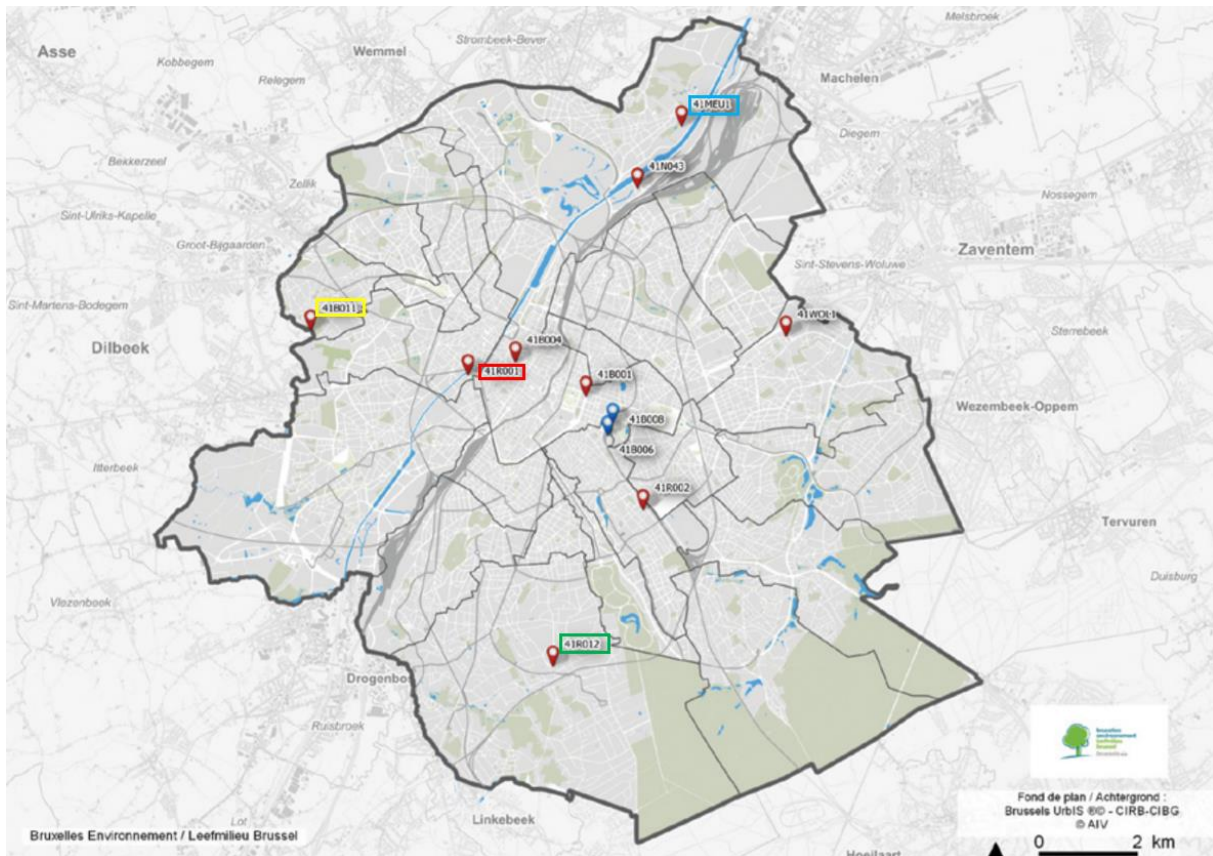
La base de données se compose de plusieurs fichiers Excel, chacun correspondant à une station de mesure, avec des mesures horaires de concentration de PM_{2.5} du 1er janvier 2013 au 31 décembre 2023. Les stations sélectionnées pour cette étude sont celles de Molenbeek-Saint-Jean, Uccle, Berchem-Sainte-Agathe et Neder-Over-Heembeek, choisies en raison de leurs caractéristiques distinctes et de la constance des mesures au fil du temps.

Avant utilisation, la base de données a été nettoyée pour éliminer les données irréalistes, telles que des valeurs négatives ou dépassant les 300 µg/m³. Toutefois, les concentrations mesurées ne fournissent pas d'informations sur la composition des particules fines, rendant difficile l'attribution directe des émissions par secteur aux concentrations relevées. Par conséquent, les informations fournies par Bruxelles Environnement, notamment sur les sources et les types de pollution, seront également cruciales pour l'interprétation des résultats obtenus.

8.1.2 Les stations de mesures

Les quatre stations de mesure de PM_{2.5}, situées respectivement à Molenbeek-Saint-Jean, Uccle, Berchem-Sainte-Agathe et Neder-Over-Heembeek, jouent un rôle crucial dans la surveillance de la qualité de l'air à Bruxelles. Chacune de ces stations est implantée dans un contexte urbain spécifique (cf. Figure 8), caractérisé par des activités industrielles, commerciales ou résidentielles distinctes, ce qui peut influencer sur les niveaux de pollution atmosphérique mesurés (CELINE, 2022 ; Bruxelles Environnement, 2020b).

Figure 8 : Carte du réseau de mesure de la Région de Bruxelles-Capitale



Source : PACE, 2023

À **Molenbeek**, la station (41R001) (encadré rouge) est située dans une zone urbanisée dense, à proximité de grands axes routiers, ce qui en fait un quartier plus propice à l'émission de PM2.5 liées au trafic routier.

La station d'**Uccle** (41R012) (encadré vert) se trouve dans une zone résidentielle plus verte, avec moins de trafic et d'activités industrielles, ce qui supposerait une influence au niveau des PM2.5 généralement plus basse.

À **Berchem-Sainte-Agathe** (41B011) (encadré jaune), la station est également implantée dans une zone résidentielle, mais pouvant être influencée par le trafic routier provenant de zones commerciales voisines et de routes principales.

Enfin, la station de **Neder-Over-Heembeek** (41MEU1) (encadré bleu) est située dans une zone industrielle, où les émissions provenant des activités industrielles pourraient exercer une influence significative sur les taux de PM2.5. Il peut également y avoir une influence modérée du trafic routier en raison de la proximité de certains grands axes routiers.

8.1.3 La méthodologie

Ce chapitre vise à montrer l'évolution des concentrations en PM2.5 dans les stations de mesures de Molenbeek-Saint-Jean, Uccle, Berchem-Sainte-Agathe et Neder-Over-Heembeek entre 2013 et 2023, et à les comparer aux recommandations de l'OMS de 2021. Pour ce faire, les données Excel enregistrées depuis 2013 seront insérées dans le logiciel Tableau (by Salesforce), permettant de créer des graphiques détaillés par périodes spécifiques et de visualiser des statistiques comme les moyennes, médianes et écarts-types (cf. Annexes 6, 7, 8, 9 et 10 pour une meilleure visualisation).

L'analyse de ces données permettra d'observer certaines tendances et de formuler des hypothèses pour la suite de cette partie pratique. Ensuite, ce travail examinera les variations observées et cherchera à les attribuer aux principaux secteurs émetteurs identifiés précédemment. Cela permettra de proposer des actions pour atteindre les lignes directrices de l'OMS.

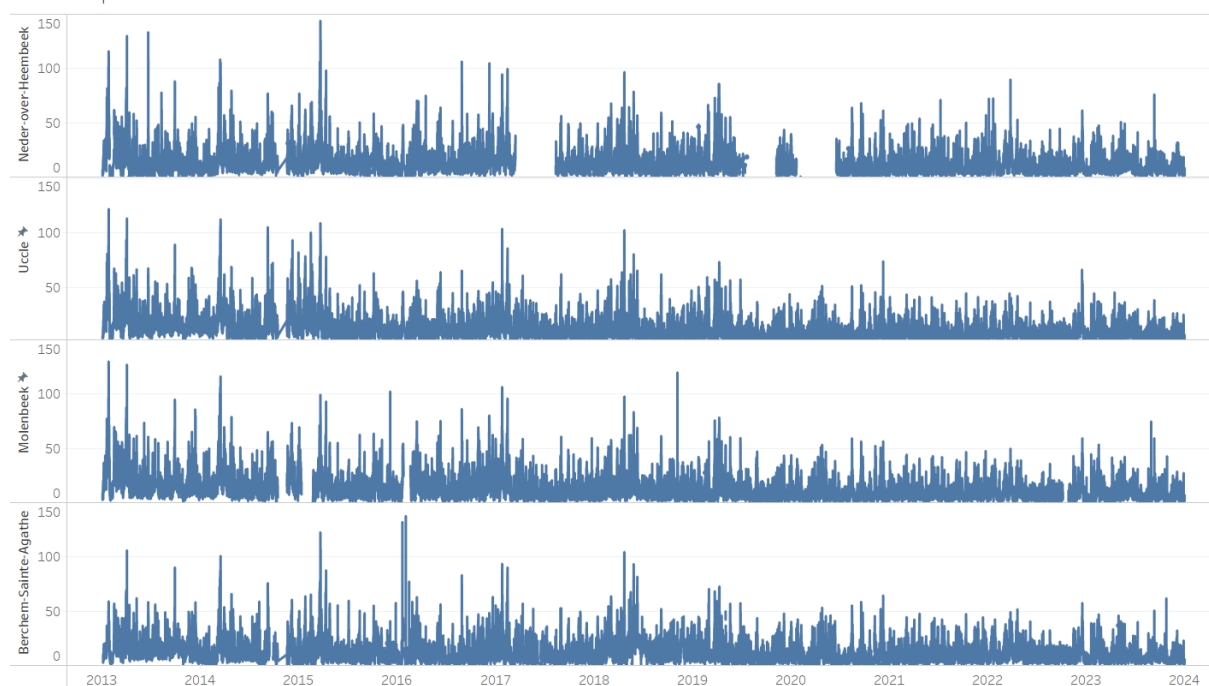
8.2 Compilation des résultats face aux recommandations de l'OMS

Dans cette section, nous analyserons les concentrations en PM2.5 mesurées entre 2013 et 2023 dans quatre stations de surveillance de la Région Bruxelloise-Capitale : Molenbeek-Saint-Jean, Uccle, Berchem-Sainte-Agathe, et Neder-Over-Heembeek. L'objectif principal est de déterminer si les niveaux de PM2.5 respectent les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé qui fixent un seuil de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle, avec un maximum de 3 à 4 jours par an de dépassement des 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentration moyenne journalière.

8.2.1 Données brutes (par heure)

Figure 9 : Données par heure

Données par heures



Source : CELINE, 2024b

La Figure 9 représente les valeurs exactes enregistrées chaque heure de chaque journée depuis l'année 2013 (comprise). On peut distinguer une diminution progressive de la concentration de PM_{2.5} sur l'ensemble des stations étudiées entre 2013 et 2023.

La première moitié de la période, entre 2013 et 2018, montre plusieurs pics dépassant les 100 µg/m³, et ce, dans les 4 stations situées respectivement à Neder-Over-Heembeek (N), Uccle (U), Molenbeek (M) et Berchem-Sainte-Agathe (B).

D'une part, le 23 janvier 2013, entre 15h et 19h, on peut observer le premier pic de pollution (Figure 9). Celui-ci se manifeste avec des concentrations maximales atteignant 116,1 µg/m³ à Neder-Over-Heembeek, 122,2 µg/m³ à Uccle et 130,7 µg/m³ à Molenbeek, et, de manière moins marquée à Berchem-Sainte-Agathe avec 59,2 µg/m³. On observe ce même phénomène presque chaque année, de décembre à janvier, avec, par exemple, le 6 décembre 2016 (N : 105 µg/m³, U : 45,2 µg/m³, M : 80,4 µg/m³ et B : 48,4 µg/m³) ou encore le 23 janvier 2017 (N : 94,8 µg/m³, U : 104 µg/m³, M : 106,6 µg/m³ et B : 93,8 µg/m³). Ces pics s'expliquent par des phénomènes météorologiques qui empêchent la pollution de se diluer ou de se déplacer comme elle le ferait dans des conditions normales et qui entraînent des smogs hivernaux. Les smogs hivernaux sont provoqués par des phénomènes d'inversions thermiques qui se

produisent lorsque des couches d'air froid sont piégées sous des couches d'air plus chaud. Normalement, l'air chaud situé à la surface terrestre monte naturellement en altitude étant donné qu'il est moins dense que les couches d'air froid. Mais, en hiver, ce processus peut s'inverser, empêchant la dispersion verticale des polluants, tels que le SO₂, les PM_{2.5} ou encore la suie, ce qui cause leur accumulation près du sol et augmente ainsi les concentrations locales, comme observé précédemment dans les graphiques. Si l'on ajoute à cela une baisse du vent, la dispersion horizontale diminue à son tour (EEA, 2016).

D'autre part, on observe une tendance de forte augmentation presque chaque année entre la mi-mars et début avril. Notamment, le 1 avril 2013 (N : 130,2 µg/m³, U : 113,5 µg/m³, M : 127,2 µg/m³ et B : 106 µg/m³), le 15 mars 2014 (N : 108,4 µg/m³, U : 112,8 µg/m³, M : 116,5 µg/m³ et B : 100,9 µg/m³) et le 20 mars 2015 (N : 144,1 µg/m³, U : 109,2 µg/m³, M : 99,5 µg/m³ et B : 122,7 µg/m³). Ces augmentations proviennent en réalité de la formation de particules fines secondaires par transformations physico-chimiques entre des composés émis dans et en dehors de la RBC et des polluants atmosphériques émis principalement dans la région. Ces transformations, qui seront analysées plus tard dans ce travail, sont favorisées par des conditions météorologiques favorables caractéristiques du printemps, avec une pression atmosphérique élevée, peu de vent et des températures relativement douces la journée et froides la nuit (CELINE, 2015).

Toutefois, on peut observer certains pics de pollution se produisant seulement à une certaine heure de la journée, ne reflétant pas la moyenne journalière, et qui sont pourtant clairement visibles sur la Figure 9. Par exemple, à Molenbeek, le 4 décembre 2015 à 11h, on mesure une concentration en PM_{2.5} de 102,5 µg/m³ alors que la moyenne pour ce jour-là est de 16 µg/m³. De même, à Berchem-Sainte-Agathe, le 18 janvier 2016 à 14h et le 31 janvier 2016 à 6h, les concentrations s'élevaient respectivement à 132 µg/m³ et 137,8 µg/m³, pour des moyennes journalières de 19,8 µg/m³ et 10 µg/m³.

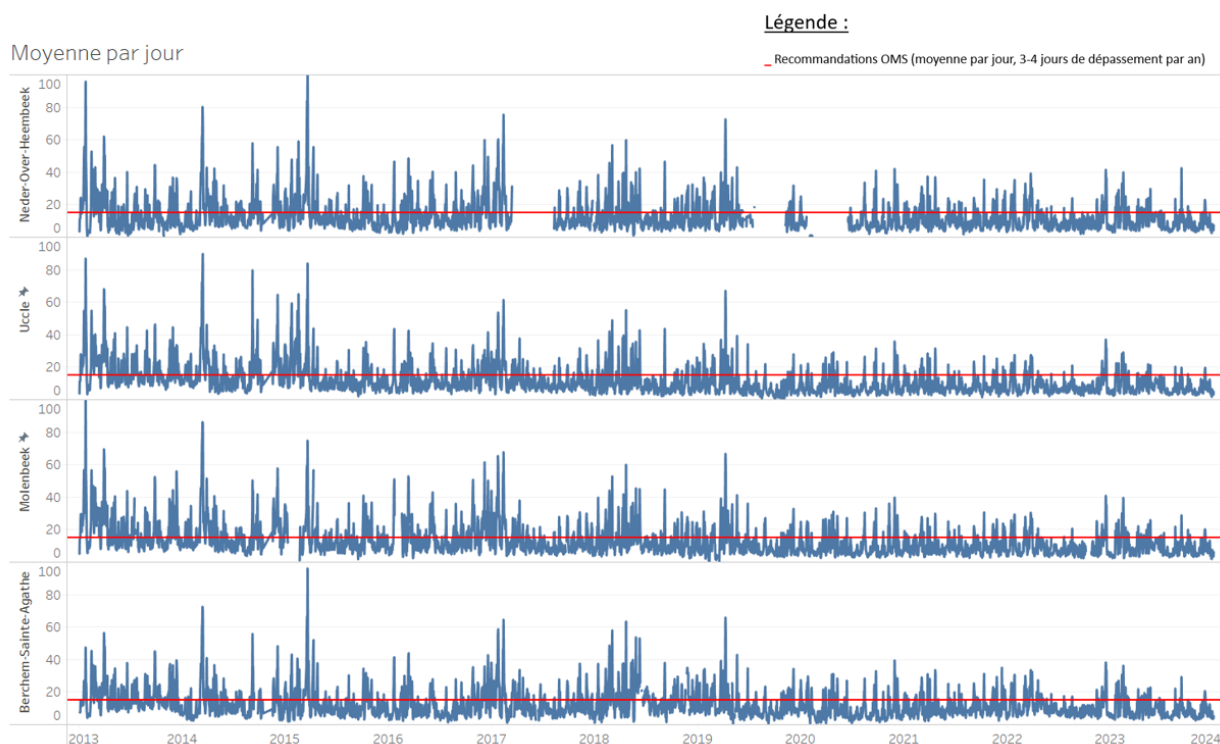
A partir de 2019, ces fortes augmentations de concentration en PM_{2.5} deviennent moins clairement dissociables des autres valeurs de l'année, avec des variations moins importantes au fil des ans. En effet, plus aucune des 4 stations ne dépasse les 100 µg/m³ de concentration en PM_{2.5}. De plus, le nombre d'observations au-dessus des 50 µg/m³ est également réduit, ne s'élevant plus qu'à 126 observations pour Neder-Over-Heembeek (1097 entre 2013 et 2018), 72 pour Uccle (977 entre 2013 et 2018), 89 pour Molenbeek (1195 entre 2013 et 2018), et 75 pour Berchem-Sainte-Agathe (757 entre 2013 et 2018). Les conditions météorologiques exposées précédemment ayant encore lieu après 2018 (CELINE, 2023a), on peut supposer que ces changements devraient provenir des améliorations effectuées au niveau des sources de PM_{2.5} elles-mêmes.

Si la tendance générale est à la baisse, on peut également observer une forme de cycle qui se répète pour chacune des stations. Les quatre stations présentent des profils de pollution PM_{2.5} distincts mais avec

de fortes ressemblances dans les variations à des périodes similaires. Neder-Over-Heembeek semble afficher les concentrations les plus élevées, suivie de Molenbeek, et finalement Uccle et Berchem-Sainte-Agathe avec des pics de concentration moins marqués.

8.2.2 Moyenne par jour

Figure 10 : Moyenne par jour



Source : CELINE, 2024b

Dans ce graphique, on retrouve la moyenne par jour des concentrations de PM_{2.5} mesurées depuis 2013. Ces profils nous semblent déjà plus pertinents que les précédents car ils suivent davantage la manière avec laquelle les recommandations de l'OMS sont formulées. Dans ce cas-ci, il est surtout intéressant de regarder la limite de 3 à 4 dépassements de la concentration moyenne journalière de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ligne rouge).

Les maxima représentent ici les journées qui ont été les plus élevées en moyenne et confirment donc les tendances observées pour la Figure 9 avec de fortes augmentations lors des smogs hivernaux et du début de la période printanière.

Avec l'utilisation des moyennes, on remarque que 2019 présente de nouveau un épisode de concentrations élevées au printemps, à la date du 8 avril, qui était moins visible lors de l'observation

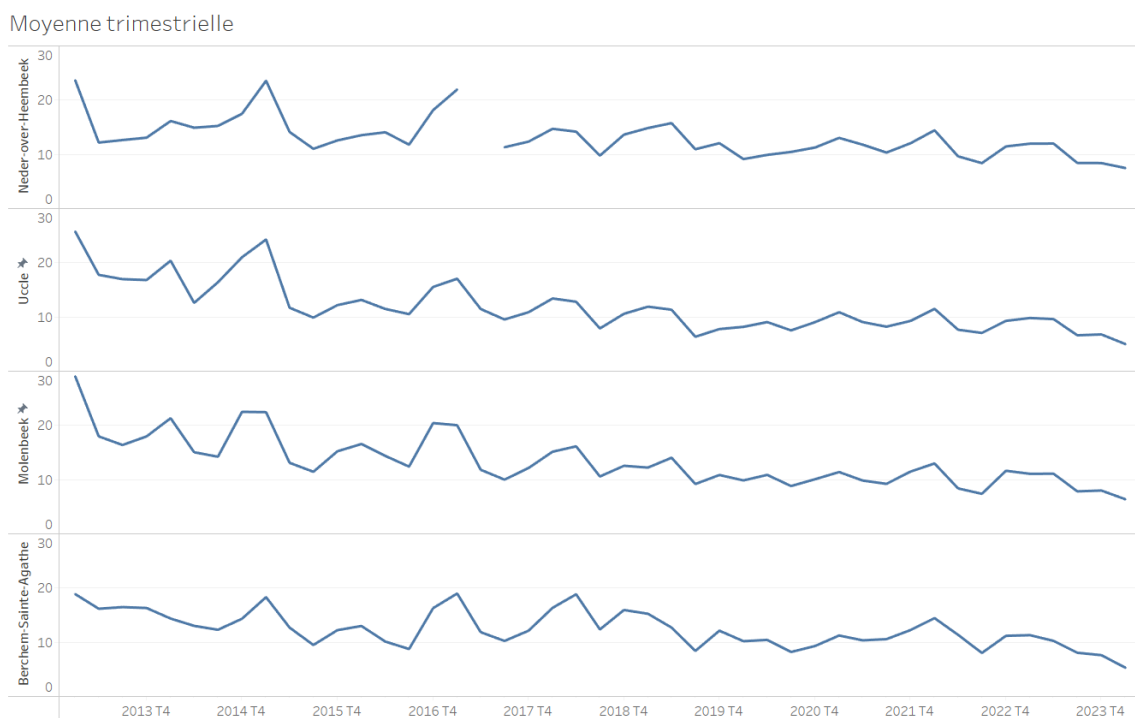
des données horaires de la Figure 9. Cet épisode dépasse même l'ensemble des valeurs moyennes atteintes depuis 2015 à Uccle avec 67,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Molenbeek avec 66,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et Berchem-Sainte-Agathe avec 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour Neder-Over-Heembeek, la moyenne atteinte à cette date est de 72,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que lors du smog hivernal du 11 février 2017 la moyenne atteignait 75,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour ce qui est du respect des recommandations de l'OMS, on voit clairement (Figure 10) qu'il y a encore énormément de jours de dépassement des 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentration moyenne, comparé aux 3 à 4 jours suggérés. En 2023, on compte 58 jours de dépassement pour la station de Neder-Over-Heembeek, 32 pour Uccle, 50 pour Molenbeek et 51 pour Berchem-Sainte-Agathe. Cependant, ces chiffres témoignent également d'une diminution notable par rapport à l'année précédente qui en comptait respectivement 65 (-7 jours), 47 (-15 jours), 57 (-7 jours) et 67 (-17 jours).

Finalement, dans la Figure 10, on peut remarquer que les moyennes journalières sont nettement moins élevées, notamment à partir de mi-2019 jusqu'à fin 2023, avec des valeurs qui ne dépassent plus les 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Uccle et Berchem-Sainte-Agathe. Molenbeek atteindra encore les 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 15 décembre 2022 et Neder-Over-Heembeek dépassera encore les 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 5 reprises.

8.2.3 Moyenne trimestrielle

Figure 11 : Moyenne trimestrielle



Source : CELINE, 2024b

La Figure 11 montre les variations trimestrielles pour chaque année entre 2013 et 2023. T1 rassemble les mois de janvier, février et mars, T2 les mois d'avril, mai et juin, T3 les mois de juillet août et septembre, et, finalement, T4 regroupe les mois d'octobre, novembre et décembre. L'idée à travers cette segmentation est de voir s'il y a des similarités entre les années, les saisons et les stations.

D'abord, la moyenne du T1 de 2013 est la plus élevée pour Neder-Over-Heembeek ($23,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Molenbeek ($29 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la deuxième plus élevée pour Uccle ($25,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Berchem-Sainte-Agathe ($18,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$). S'en suit une forte diminution de la moyenne au T2 pour Neder-Over-Heembeek ($12,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Uccle ($17,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Molenbeek ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$), et, une plus faible diminution pour Berchem-Sainte-Agathe ($16,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Par après, les variations pour T3 et T4 divergent dans les 4 stations mais on ne remarque rien de vraiment significatif. Pour l'année 2014, on constate à nouveau une augmentation au T1 pour Neder-Over-Heembeek ($16,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Uccle ($20,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et Molenbeek ($21,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), suivie d'une diminution au T2 (N : $14,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, U : $12,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et M : $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et, cette fois-ci, c'est au T4 de 2014 que la concentration en PM2.5 va à nouveau augmenter (N : $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, U : $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et M : $22,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cette oscillation va continuer au rythme des saisons jusqu'à la fin 2023 avec d'importantes similitudes entre les 4 stations.

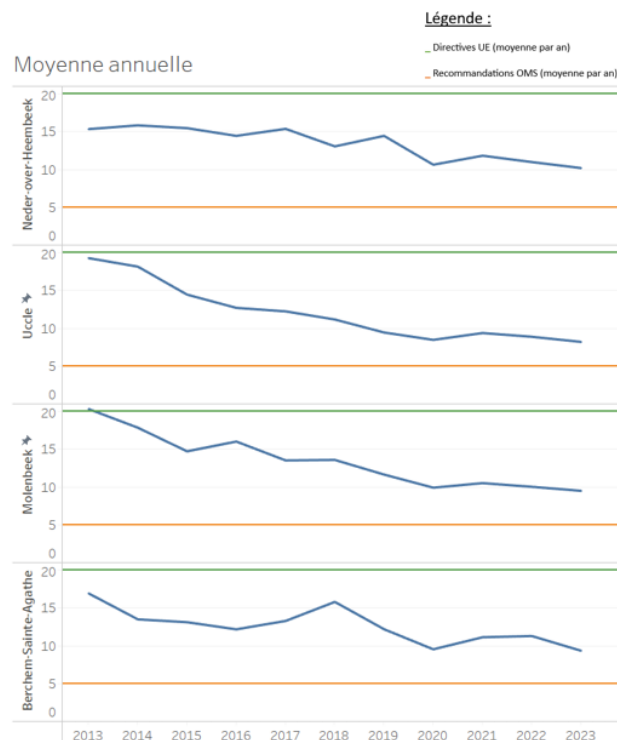
Pour les années 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 et 2020, la saison la plus pauvre en PM2.5 aux quatre stations est le T3, avec, pour 2015, des concentrations de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Neder-Over-Heembeek, $9,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Uccle, $11,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Molenbeek et $9,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Berchem-Sainte-Agathe. Pour 2023, les concentrations ont diminué avec $8,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Neder-Over-Heembeek, $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Uccle, $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Molenbeek et $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Berchem-Sainte-Agathe.

La saison qui montre les valeurs les plus élevées est souvent le T1, même si on voit parfois des maxima en T2 et T4 en fonction des années et des stations. Ceci peut s'expliquer par le mois d'avril pour le T2 et le mois de décembre pour le T4 qui peuvent manifester des conditions météorologiques propices à de fortes concentrations en PM2.5.

En observant les moyennes trimestrielles depuis 2013 jusqu'en 2023, on remarque une tendance générale à la baisse avec des variations qui sont de moins en moins importantes. A côté de cela, il semble bien y avoir un schéma qui se répète tout au long des années sur toute la période observée, avec une forte ressemblance dans les variations trimestrielles aux 4 stations.

8.2.4 Moyenne annuelle

Figure 12 : Moyenne annuelle



Source : CELINE, 2024b

La Figure 12 représente l'évolution de la moyenne annuelle des concentrations en PM2.5. La moyenne annuelle est un indicateur intéressant car elle peut être utilisée pour une comparaison directe avec les directives européennes (ligne verte) et les recommandations de l'OMS (ligne orange).

D'abord, la station de Neder-Over-Heembeek présente la moyenne la plus basse en 2013 avec 15,4 µg/m³. Cette moyenne reste relativement stable jusqu'en 2016 où l'on constate une légère diminution avec une moyenne annuelle de 14,4 µg/m³ mais celle-ci rejoint la moyenne de 2013 l'année suivante. A partir de 2020, on voit une vraie diminution de la concentration en PM2.5 qui atteint les 10,6 µg/m³ puis augmente à nouveau en 2021 (11,8 µg/m³) pour finalement atteindre un minimum en 2023 à 10,2 µg/m³.

La station de mesure d'Uccle affiche une diminution plus rapide et constante dès le début de la période examinée, passant de 19,3 µg/m³ à 8,5 µg/m³ entre 2013 et 2020. La moyenne remonte jusqu'à 9,4 µg/m³ après cette année marquée par le COVID et diminue ensuite jusqu'à atteindre les 8,2 µg/m³ en 2023.

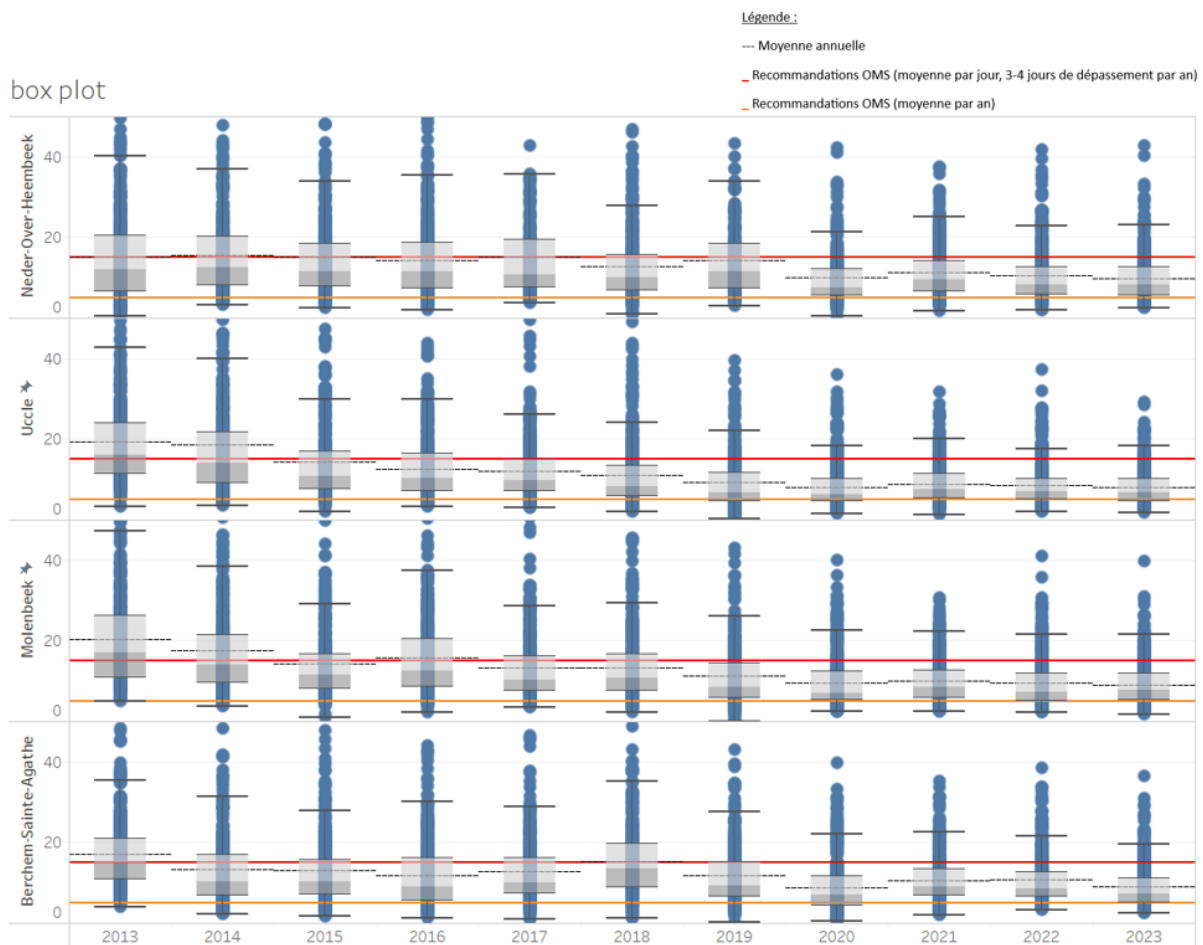
Similairement, la moyenne annuelle à Molenbeek passe de 20,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en 2013, à 9,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en 2020. Cette diminution significative n'est toutefois pas aussi homogène qu'à Uccle entre les 2 années. De 2015 à 2016, on a une augmentation de la concentration, allant de 14,7 à 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalement, en 2023, la concentration moyenne est de 9,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La station de Berchem-Sainte-Agathe montre des fluctuations assez différentes des autres stations. En début de période (2013), la concentration moyenne est de 16,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ puis diminue jusqu'en 2016 (12,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ensuite, on voit une augmentation de la moyenne jusqu'en 2018 où on atteint les 15,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5. En 2020, comme pour les autres stations, la moyenne diminue jusqu'à 9,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et ensuite réaugmente en 2021 et 2022, pour finalement atteindre la valeur moyenne la plus basse en 2023 : 9,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dans l'ensemble, la Figure 12 montre une tendance à la baisse dans les quatre stations, qui atteignent leur moyenne la plus basse en 2023, même si les stations de Neder-Over-Heembeek et Berchem-Sainte-Agathe montrent plus de fluctuations et une diminution moins marquée entre 2013 et 2023. Par rapport aux directives européennes, toutes les moyennes sont en-dessous des 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5, à part la moyenne de 2013 de Molenbeek qui atteint 20,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A l'inverse, aucune des stations n'est encore parvenue à atteindre le seuil des 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fixé par l'OMS.

8.2.5 Graphique en boîte à moustaches

Figure 13 : Graphique en boîte



Source : CELINE, 2024b

Ce graphique en boîte à moustaches (box plot) montre les concentrations de PM_{2.5} mesurées de 2013 à 2023 dans quatre stations de la Région Bruxelloise : Neder-over-Heembeek, Uccle, Molenbeek et Berchem-Sainte-Agathe. Chaque boîte (en gris) représente la distribution annuelle des PM_{2.5}, où le bas et le haut représentent respectivement le premier quartile et le quatrième quartile, regroupant ainsi 50% des observations de l'année. La ligne qui marque la différence entre le deuxième quartile (gris foncé) et le troisième quartile (gris clair), indique la médiane et les « moustaches » indiquent d'une part les 25% des mesures avec la plus faible concentration en PM_{2.5} et de l'autre les 25% avec la plus haute concentration. Le trait horizontal noir en pointillés indique la moyenne annuelle qui peut être mise en perspective avec la recommandation de l'OMS sur la moyenne annuelle de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ligne orange). De plus, la boîte et ses extrémités permettent de visualiser le pourcentage d'observations supérieures à la moyenne journalière maximale tolérée sur l'année avec 3 à 4 jours de dépassement, fixée à 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par l'OMS (ligne rouge).

Les données montrent que les niveaux de PM_{2.5} varient entre différentes stations et, au fil des ans, avec une baisse générale. La directive européenne de 2008, qui fixe un maximum de 20 µg/m³ en moyenne annuelle, n'a été dépassée qu'une seule fois en 2013 à la station de Neder-Over-Heembeek. À part cela, les quatre stations ont respecté la directive depuis le début de la période observée.

Concernant, les nouvelles lignes directrices proposées par l'OMS en 2021, on peut voir qu'aucune des stations n'atteint la limite de concentration de 5 µg/m³ en PM_{2.5} entre 2013 et 2023. En ce qui concerne l'autre recommandation qui estime qu'il ne faudrait pas plus de 3 à 4 jours sur une année avec une moyenne dépassant les 15 µg/m³, elle n'est respectée par aucune des 4 stations jusqu'à présent. On peut même observer qu'il y a encore énormément de jours de dépassement, avec plus de la moitié des jours du quatrième quartile au-dessus de 15 µg/m³ pour Neder-Over-Heembeek et Molenbeek.

Finalement, pour chaque année, on peut également observer des valeurs dites aberrantes ; c'est-à-dire qu'elles sont une fois et demie plus élevée que l'écart interquartile, celui-ci étant considéré comme un intervalle de confiance robuste par rapport à la médiane. L'importante quantité de ces valeurs aberrantes n'est pas reflétée par des indicateurs comme la médiane ou encore la moyenne. On risque donc de négliger certaines expositions à des doses très élevées durant l'année, d'où la nécessité de prendre en compte le nombre de jours de dépassement du seuil fixé par l'OMS sur une année entière.

8.2.6 Conclusion

L'analyse des concentrations de PM_{2.5} mesurées de 2013 à 2023 dans les quatre stations de surveillance de la Région Bruxelloise-Capitale révèle une diminution progressive des niveaux de pollution, bien que les recommandations strictes de l'OMS ne soient pas encore atteintes. Les pics de pollution les plus élevés, souvent observés en hiver et au printemps, sont principalement dus à des inversions thermiques (en hiver) et à la formation de particules secondaires (au printemps). Depuis 2019, les concentrations de PM_{2.5} ont considérablement diminué, avec moins de dépassements des seuils critiques. Cependant, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour réduire davantage les émissions et respecter pleinement les directives de l'OMS. Les données montrent également l'importance de considérer non seulement les moyennes annuelles mais aussi les jours de dépassement pour une évaluation complète de l'impact sur la santé.

8.3 Impact des principaux secteur émetteurs

Dans cette partie nous allons essayer d'expliquer, à l'aide des données récoltées et présentées précédemment, certaines variations temporelles qui peuvent être observées durant la période de 2013 à 2023. L'analyse globale des données a montré des tendances similaires dans les 4 stations de mesures

de la RBC mais avec des concentrations moyennes plus élevées dans certaines stations. Ces différences peuvent potentiellement s'expliquer par l'influence de certains secteurs émetteurs en fonction des communes/quartiers étudiés, à savoir zones industrielles, quartiers résidentiels et zones sous influence du trafic routier (cf. 6.2.3.7). L'objectif de ce chapitre est de visualiser l'impact de ces secteurs pour identifier les actions nécessaires afin de permettre à la RBC de se conformer aux recommandations de l'OMS.

Dans le cadre de ce travail, il a été décidé de se concentrer sur les sources de PM2.5 émises à proximité immédiate plutôt que sur celles provenant de la pollution européenne et internationale. L'objectif est de mieux comprendre et analyser les contributions locales à la pollution de l'air dans la Région de Bruxelles-Capitale. Cette approche permet d'identifier les secteurs spécifiques et les activités locales responsables des émissions de particules fines, facilitant ainsi la mise en place de mesures ciblées pour améliorer la qualité de l'air au niveau régional.

8.3.1 Le transport routier

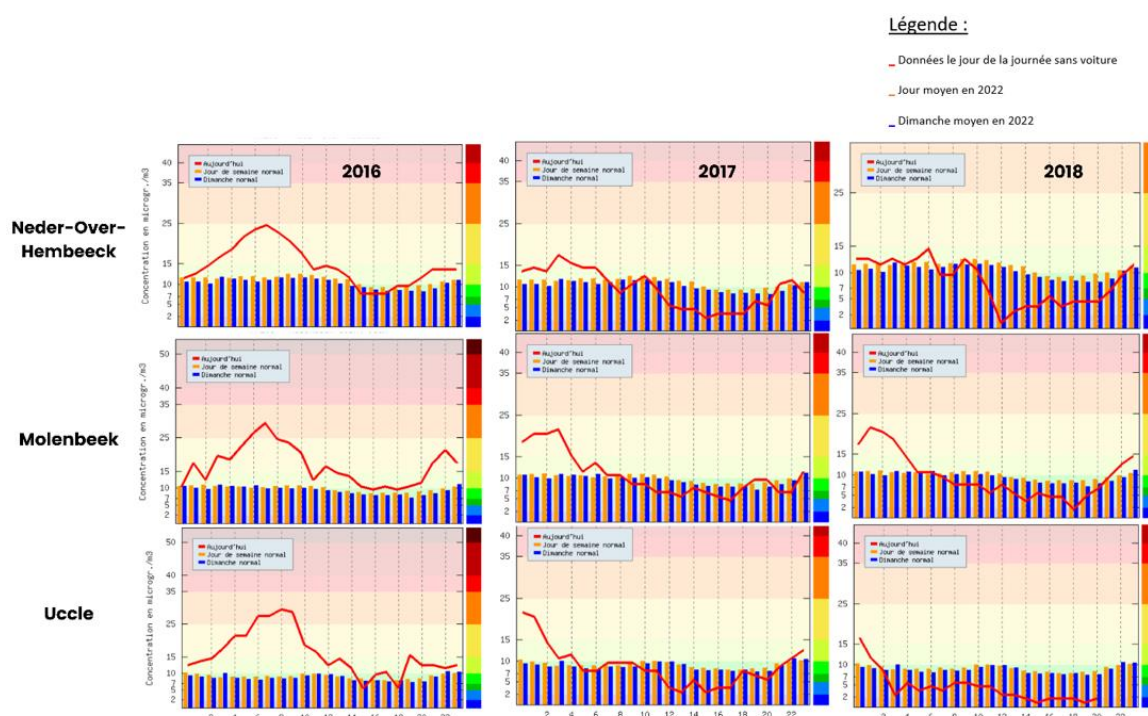
Le transport routier a depuis longtemps été l'une des causes principales des émissions de PM2.5 dans la Région de Bruxelles-Capitale. Il représentait plus de 40% des émissions de PM2.5 en 2012 (cf. Annexe 1) pour 21% en 2021 (Figure 3). En outre, certaines actions visant les transports routiers ont déjà été mises en place dans la Région et permettent de mettre en évidence les effets de l'impact du trafic automobile sur les concentrations en PM2.5.

8.3.1.1 *La journée sans voiture*

La ville de Bruxelles a instauré une « journée sans voiture ». Comme son nom l'indique, ce jour-là, la circulation automobile est interdite dans toute la région Bruxelles Capitale. Cette initiative vise à sensibiliser le public aux problèmes de pollution atmosphérique, de congestion du trafic et de sécurité routière, tout en encourageant l'utilisation de modes de transport alternatifs plus durables, tels que la marche, le vélo et les transports en commun. Depuis 2000, cet évènement a lieu chaque année, le troisième dimanche de septembre, à Bruxelles et dans beaucoup d'autres villes européennes (Bruxelles Environnement, 2000).

Dans ce contexte, il est intéressant de voir l'impact que cette action peut avoir sur la concentration totale en PM2.5 dans 3 stations parmi les 4 étudiées – sujets de notre étude, dans la capitale.

Figure 14 : Concentration en PM2.5 durant les journées sans voiture 2016, 2017 et 2018



Source : CELINE, 2022 & CELINE, 2024b

Les graphiques présentés (Figure 14) montrent une comparaison détaillée des concentrations de PM2.5 durant les journées sans voiture des années 2016, 2017 et 2018 à Bruxelles, spécifiquement dans les stations de mesures de Neder-over-Heembeek, Molenbeek et Uccle. Chaque graphique décompose les variations horaires de PM2.5, contrastant les valeurs de ces journées particulières avec les moyennes typiques des jours de semaine et des dimanches normaux de l'année 2022 mesurées pour chaque station.

Au travers des trois années observées, on constate une tendance à la baisse des PM2.5 lors des journées sans voiture entre 9h30 et 19h, comparé aux jours de semaine normaux et au dimanche normal.

Dans les trois graphiques de 2016, on observe un pic dans les concentrations de PM2.5 en début de journée, aux alentours de 7h (N : 24,8 µg/m³, U : 29,3 µg/m³ et M : 29,7 µg/m³), qui pourrait être attribué au fait que la journée sans voiture commence officiellement à 9h30. Il semble que les résidents profitent des derniers moments avant l'entrée en vigueur des restrictions pour se déplacer, ce qui entraîne temporairement une hausse des émissions des véhicules. Ce pic matinal est suivi d'une baisse considérable une fois que la restriction est appliquée, ce qui pourrait être le reflet de l'effet direct de la réduction du trafic routier sur les niveaux de pollution. Par exemple, à 15h, les concentrations en PM2.5 diminuent à 8 µg/m³ pour Neder-Over-Heembeek, 5,5 µg/m³ pour Uccle et 10,8 µg/m³ pour Molenbeek. A nouveau, on voit dans les trois stations, une augmentation plus importante des PM2.5 en fin de journée pouvant s'expliquer par la reprise du trafic routier à partir de 19h.

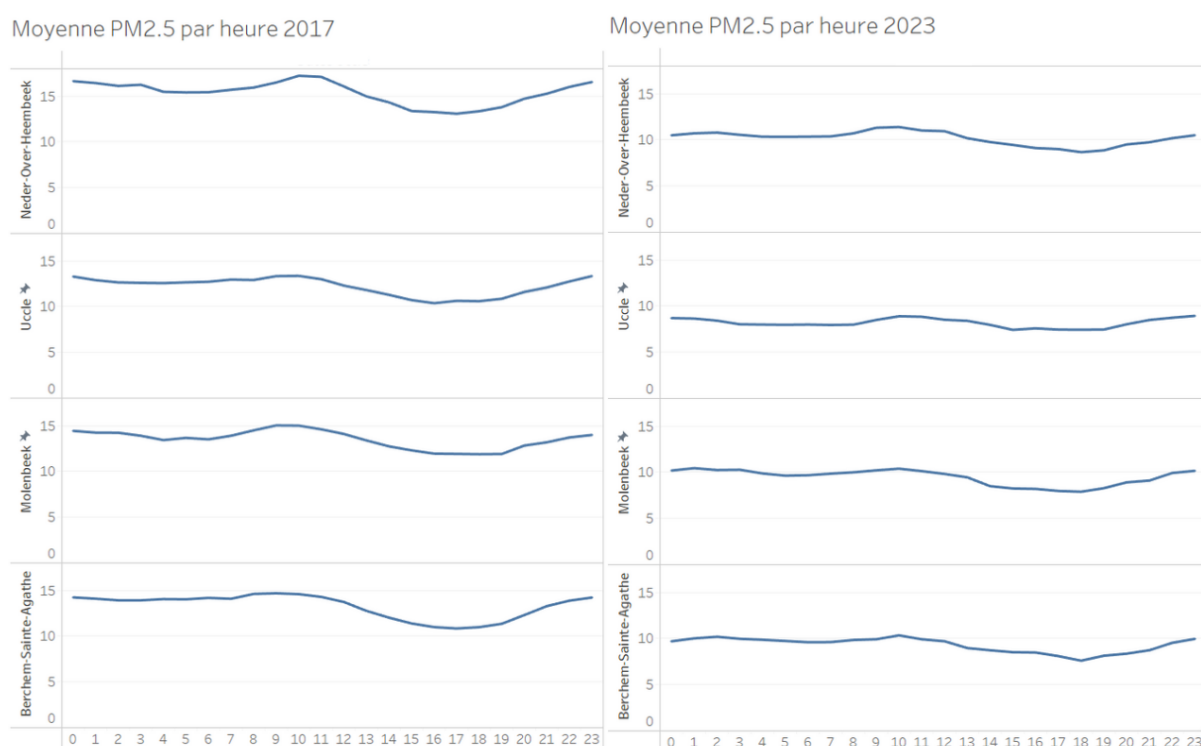
L'année 2018 se distingue particulièrement par une baisse notable des concentrations de PM2.5 lors de la journée sans voiture par rapport aux moyennes journalières normales et aux moyennes des dimanches. On peut même remarquer une tendance assez similaire avec les données de NO₂ obtenues par Bruxelles-Environnement durant cette journée (cf. Annexe 2), qui sont, quant à elles, directement liées aux transports routiers. Cette diminution suggère une amélioration de l'efficacité des mesures restrictives sur la circulation mais cela est aussi dû à la diminution générale de la concentration en PM2.5 dans les différents secteurs et notamment dans le transport routier comme nous allons le voir par la suite.

La réduction des concentrations de PM2.5 pendant les journées sans voiture, particulièrement marquée en 2018, renforce l'argument en faveur de l'extension de telles mesures. Ces résultats démontrent l'efficacité des restrictions de circulation pour améliorer la qualité de l'air, mais ils mettent également en lumière que même au niveau de trafic le plus faible possible la concentration en PM2.5 n'atteint pas zéro.

8.3.1.2 La Zone de Faible Émission

La Zone à Faibles Émissions (LEZ) de Bruxelles a été mise en œuvre progressivement. La première phase a été annoncée en 2016 et est entrée en vigueur le 1er janvier 2018, limitant l'accès au centre de Bruxelles pour les véhicules les plus polluants, tels que les diesels. Dès le début, des informations détaillées étaient disponibles sur un site web dédié pour éduquer les résidents et les visiteurs. L'envoi des amendes pour non-respect des règles de la LEZ a commencé en octobre 2018, renforçant l'application de la réglementation et visant à encourager une transition vers des véhicules moins polluants (Bruxelles Environnement, 2018).

Figure 15 : Moyenne des PM2.5 par heure pour 2017 et 2023



Source : CELINE, 2024b

La Figure 15 reprend les variations horaires moyennes sur une journée, de la concentration en PM2.5 dans la capitale avant l'implémentation de la LEZ (2017) et après (2023).

En 2017, la journée commençait avec une concentration moyenne relativement élevée en PM2.5 allant de 13,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Uccle à 16,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Neder-Over-Heembeek. Les valeurs maximales sont atteintes dans la matinée, à 9h, dans les stations de Molenbeek (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et de Berchem-Sainte-Agathe (14,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), et à 10h pour les stations de Neder-Over-Heembeek (17,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et d'Uccle (13,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Par la suite, les concentrations moyennes diminuent jusqu'à atteindre un minimum (N : 13,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, U : 10,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, M : 11,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et B : 10,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour augmenter à nouveau à partir aux environs de 17h.

Parallèlement, les polluants atmosphériques, tels que le NO_2 , présentés comme étant principalement produits par le trafic routier montrent clairement la même tendance avec un pic de pollution aux alentours de 9h, suivi d'une baisse jusqu'à 16-17h et une augmentation ensuite (cf. Annexe 3). Cette ressemblance suggère que cette variation journalière provient bien du trafic routier.

En 2023, on observe une tendance un peu similaire mais moins prononcée entre les valeurs les plus basses (N : 8,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, U : 7,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, M : 7,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et B : 7,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et les plus hautes (N : 11,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, U : 8,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, M : 10,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et B : 10,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), et on constate une diminution des moyennes horaires

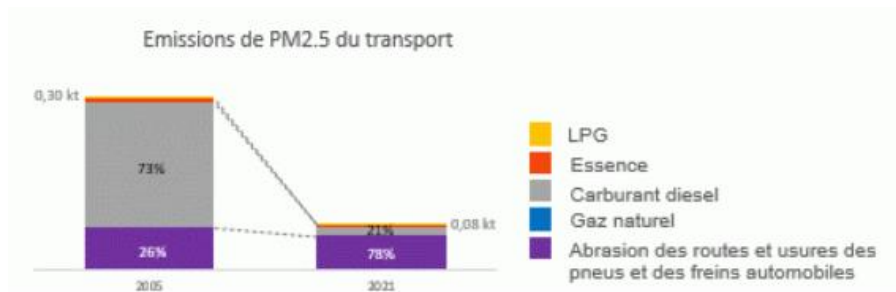
pour chacune des stations par rapport à 2017. Dès lors, ceci pourrait bien être lié à la diminution du nombre de véhicules fortement polluants dans la RBC.

A partir de ces observations, on peut conclure que la mise en place de la LEZ a permis de réduire l'impact du secteur du transport routier sur les émissions de PM2.5 depuis 2018 en Région de Bruxelles-Capitale. De plus, entre 2018 et 2022, Bruxelles Environnement estime à 30% la diminution des PM2.5 émises par le parc automobile. Cette diminution devrait se poursuivre puisque les véhicules diesel ne pouvant plus circuler depuis 2022 émettent 6 fois plus de particules fines que ceux encore autorisés à circuler (Bruxelles Environnement, 2022a).

8.3.1.3 Les émissions hors-échappement

Comme on a pu le constater, les émissions liées au transport routier ont diminué mais représentent encore 21% des émissions de PM2.5 dans la Région de Bruxelles-Capitale en 2021. Il est donc impératif d'étudier tous les facteurs influençant cette contribution.

Figure 16 : Répartition des émissions de PM2.5 dans les transports



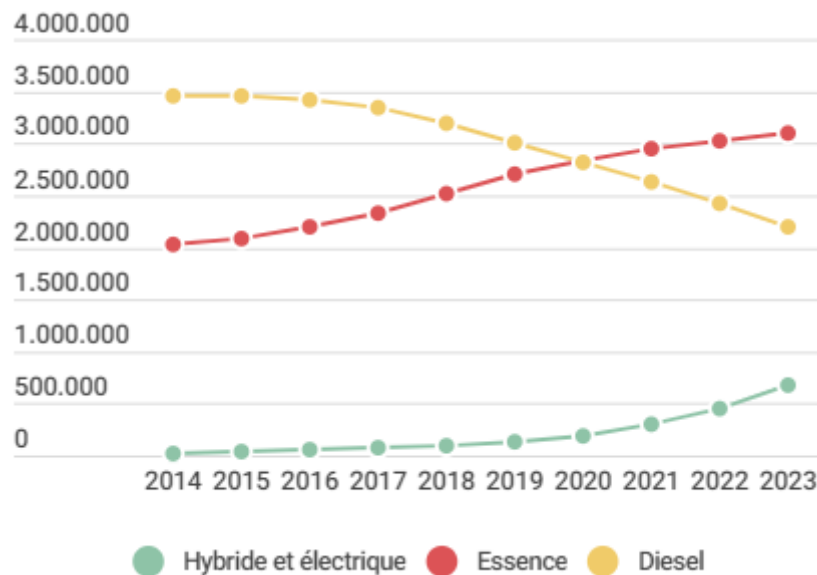
Source : Bruxelles Environnement, 2023

La Figure 16 illustre les émissions de PM2.5 du transport dans la Région de Bruxelles-Capitale entre 2005 et 2021. En 2005, les émissions s'élevaient à 0,30 kt, avec 73% provenant du carburant diesel et 26% de l'abrasion des routes et de l'usure des pneus et des freins. En 2021, les émissions ont chuté à 0,08 kt, avec une inversion des proportions : 78% des émissions proviennent désormais de l'abrasion et de l'usure, tandis que le diesel représente 21%. En d'autres termes, les émissions provenant du pot d'échappement des voitures ont fortement diminué depuis 2005, ce qui n'est pas le cas des sources « hors-échappement » provenant de l'abrasion des routes et de l'usure des pneus et des freins des véhicules routiers qui représentent 16,4% des émissions totales de PM2.5 (Timmers & Achten, 2016). Au niveau européen les PM2.5 ont même augmenté au fil des années, rattrapant les carburants en termes

d'émissions à partir de 2018 (EEA, 2021). La LEZ contribuera donc toujours à la réduction des émissions liées au transport routier mais dans une moindre mesure car elle ne concerne pas directement les émissions hors-échappement.

Les émissions de PM2.5 dues à l'abrasion des routes et à l'usure des pneus et des freins concernent tous les types de transports routiers et dépendent fortement de leur masse. Or, les véhicules électriques (VE), présentés comme alternative aux véhicules traditionnels plus émetteurs, tendent à avoir « une masse plus élevée de 258 kg à 318 kg par rapport aux véhicules diesel et essence respectivement » (EEA, 2021). Dès lors, en supposant un freinage 100% par friction, ils généreraient 7 à 12% d'émissions de PM supplémentaires, dues à l'usure plus conséquente des pneus et des freins.

Figure 17 : Nombre de voitures particulières par carburant, en Belgique, entre 2014 et 2023



Source : Statbel, 2023

Sur la Figure 17, on voit le nombre de véhicules circulant en Belgique entre 2014 et 2023. On constate une forte diminution des véhicules au diesel ainsi qu'une plus faible croissance des véhicules à essence, alors que les véhicules hybrides et électriques sont en croissance exponentielle. Plus précisément, le parc belge de voitures électriques a augmenté de 93,6% entre 2022 et 2023 (Statbel, 2023). Ce graphique fait écho à l'interdiction d'accès à la LEZ des moteurs diesel en 2030 et des moteurs essence en 2035 à Bruxelles (Bruxelles Environnement, 2023a). Dans la même optique, le gouvernement bruxellois propose des subventions allant jusqu'à 40% du prix d'achat des véhicules électriques pour les entreprises (Bruxelles Économie et Emploi, 2023)

Cependant, la part des émissions liée aux facteurs hors-échappement remet en question l'approche des véhicules électriques comme étant une alternative aux véhicules dépendant des énergies fossiles face à la pollution atmosphérique. Par conséquent, la Région de Bruxelles-Capitale devrait à présent chercher à réduire l'ensemble du parc automobile et non pas uniquement celui des véhicules traditionnels.

8.3.1.4 Conclusion

En conclusion, la réduction des émissions de PM2.5 du transport routier dans la Région de Bruxelles-Capitale est indéniable, passant de plus de 40 % en 2012 à 21 % en 2021. Les initiatives comme la journée sans voiture et la mise en place de la Zone à Faibles Émissions démontrent l'efficacité des restrictions de circulation pour améliorer la qualité de l'air.

La journée sans voiture, instaurée depuis 2000, montre une baisse significative des PM2.5, soulignant l'impact direct du trafic routier sur la pollution de l'air. Les pics observés avant 9h30 indiquent que les résidents profitent de la circulation avant les restrictions. En 2018, une baisse plus marquée des PM2.5 par rapport aux jours normaux et aux dimanches normaux témoignent de l'efficacité accrue des mesures restrictives.

La mise en œuvre progressive de la LEZ depuis 2018 a contribué à une diminution des émissions des véhicules les plus polluants. Les variations horaires montrent une baisse des concentrations de PM2.5 après l'implémentation de la LEZ, confirmant l'impact positif de cette mesure sur la qualité de l'air.

Cependant, les émissions hors-échappement, notamment dues à l'abrasion des routes et à l'usure des pneus et des freins, représentent désormais la majorité des émissions de PM2.5 du transport. Les véhicules électriques, bien que moins polluants en termes de gaz d'échappement, contribuent davantage aux émissions de PM2.5 en raison de leur poids plus élevé. Avec une augmentation exponentielle des véhicules électriques, il est essentiel de considérer ces émissions hors-échappement dans les futures politiques de réduction de la pollution.

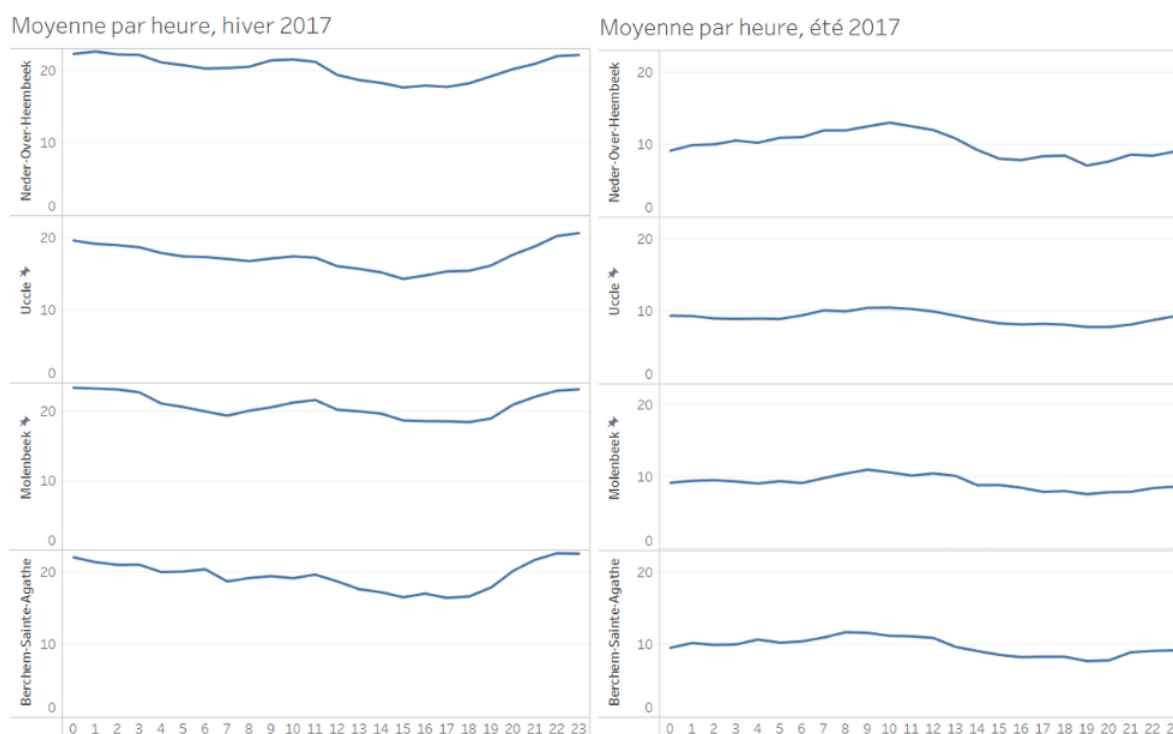
Ainsi, pour se conformer pleinement aux recommandations de l'OMS, la Région de Bruxelles-Capitale doit non seulement continuer à réduire les émissions des véhicules traditionnels mais aussi s'attaquer aux émissions hors-échappement et envisager des stratégies pour réduire globalement le parc automobile.

8.3.2 La combustion dans les bâtiments résidentiels et tertiaires

Le chauffage domestique et tertiaire est à la source principale des émissions de PM2.5 dans la RBC avec une contribution estimée à 42% (6.2.3.7). Dans ce contexte, les actions concernant le bâtiment prévues dans le PACE, revues en 2023, sont principalement orientées vers la sortie des combustibles fossiles et polluants comme source de chauffage et la réduction des émissions issues du chauffage au bois (PACE, 2023).

8.3.2.1 Impact du chauffage des bâtiments

Figure 18 : Moyenne par heure d'hiver et d'été 2017



Source : CELINE, 2024b

Afin de visualiser l'impact de la combustion dans les foyers et dans le secteur tertiaire, il semble intéressant de comparer la saison d'hiver, qui est fortement propice à l'utilisation du chauffage, avec la saison d'été. L'année 2017 a connu un hiver proche des températures moyennes attendues à cette saison (Météo en Belgique, 2017), c'est pourquoi elle est prise, ici, comme l'année de référence en termes de températures. Les moyennes hivernales de 2017 sont calculées entre le 21 décembre 2016 et le 20 mars 2017, alors que celles d'été sont calculées entre le 20 juin et le 22 septembre 2017.

La Figure 18 montre le contraste entre la tendance de concentration en PM_{2.5} dans l'air en hiver et en été au cours de l'année 2017. En hiver, la journée moyenne commence avec des concentrations très élevées à partir de minuit, aux alentours de 20 µg/m³ (N : 22,3 µg/m³, U : 19,5 µg/m³, M : 23,3 µg/m³ et B : 22 µg/m³) qui diminuent jusqu'aux heures de trafics routiers où elles stagnent pour Uccle et Berchem-Sainte-Agathe, et augmentent légèrement pour les 2 autres stations. Ensuite, les concentrations baissent pour atteindre un minimum aux alentours de 16-17h (N : 17,7 µg/m³, U : 14,3 µg/m³, M : 18,3 µg/m³ et B : 16,4 µg/m³). A ce moment de la journée, les concentrations remontent progressivement pour atteindre à nouveau les valeurs enregistrées au début de la journée. En été, la journée commence avec moins de la moitié des concentrations que celles enregistrées en hiver (N : 8 µg/m³, U : 7 µg/m³, M : 8,3 µg/m³ et B : 7,5 µg/m³) et augmente faiblement et de manière constante jusqu'à 10h. Dans l'après-midi, les concentrations montrent une tendance à la baisse puis se stabilisent jusqu'à la fin de la journée.

La comparaison des concentrations en PM_{2.5} entre l'hiver et l'été 2017 semble montrer une influence conséquente du chauffage domestique sur l'émission de ces particules fines. La combustion dans le secteur tertiaire est difficilement dissociable d'autres causes, étant donné les différents moments de la journée où celle-ci peut avoir lieu et son plus faible impact sur la concentration en PM_{2.5} (7%) (cf. 6.2.3.7). Toutefois, les observations faites dans les 4 stations de mesures de la RBC reflètent bien l'impact général que peuvent avoir les différents modes de chauffages sur la pollution de l'air.

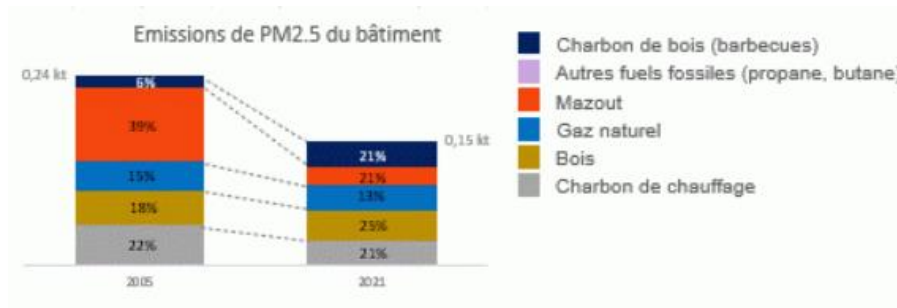
8.3.2.2 Les réglementations PEB

Comme on a pu le voir, la RBC a mis en place dans son PACE certaines mesures contraignantes concernant le mode de chauffage des bâtiments. Deux objectifs sont fixés dans le cadre des installations HVAC (chauffage, ventilation et climatisation) : la sortie des combustibles fossiles et polluants, et la réduction des émissions liées au chauffage au bois (cf. 7.4.2.3.2).

Dans cet optique, depuis le 1^{er} septembre 2021, la RBC a mis en place l'interdiction de placer de nouveaux chauffages et chauffe-eau fonctionnant au charbon, et, en juin 2025, l'installation de chaudières au mazout sera interdite (Bruxelles environnement, 2022b). Pour soutenir ces mesures, le gouvernement avait déjà mis en place des incitants pour remplacer les chaudières fonctionnant aux énergies fossiles en proposant, par exemple, des primes Révolution (cf. 7.4.2.3.2.1). Dans le « Plan d'amélioration structurelle de la qualité de l'air et de lutte contre le réchauffement climatique » de 2002 à 2010 et le PACE de 2016, le gouvernement avait déjà mis en place des primes de ce genre qui se sont avérées assez efficaces. En effet, sur la Figure 19, on observe une forte diminution des émissions liées au mazout entre 2005 et 2021 qui peut s'expliquer par la mise en place de ces primes. Ces observations

confortent l'idée que des incitants, tels que la prime Rénovation, peuvent être un bon moyen de réduire les émissions de PM2.5 issues de la combustion dans les bâtiments de la Région de Bruxelles-Capitale.

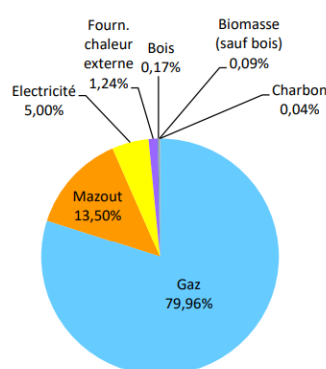
Figure 19 : Répartition des émissions de PM2.5 dans le bâtiment



Source : Bruxelles Environnement, 2023

La : Répartition des émissions de PM2.5 dans le bâtiment Figure 19 montre les émissions de PM2.5 des bâtiments en Région de Bruxelles-Capitale pour les années 2005 et 2021. En 2005, les émissions totales étaient de 0,24 kt, avec les principales contributions provenant du charbon de chauffage (22%), du bois (18%), du gaz naturel (15%), et du mazout (39%). En 2021, les émissions totales ont diminué à 0,15 kt. Le charbon de bois (21%) et le bois (25%) deviennent les principaux contributeurs tandis que le mazout représente 21%, le gaz naturel 13%, et le charbon de chauffage 21%. L'évolution montre une diminution globale des émissions, avec un changement dans la répartition des sources principales de pollution qui sont plus équilibrées.

Figure 20 : Les sources de chauffage des bâtiments avec un certificat PEB



Source : Bruxelles Environnement, 2021

D'un autre côté, en 2021, comme le montre la Figure 20, le bois et le charbon étaient renseignés comme source principale de chauffage pour seulement 0,17% et 0,04% du parc résidentiel possédant un certificat PEB. Ce faible pourcentage est marquant quand on sait que la combustion de bois pour le

chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires contribue respectivement à 25% et 21% des émissions de PM2.5 du bâtiment, et donc, à 10,5% et 8,8%, des émissions totales dans la Région de Bruxelles-Capitale. Le PACE 2023 évoque ainsi l'idée d'interdire le chauffage central fonctionnant au bois, toutefois, aucune réglementation n'a encore été mise en place à ce niveau-là. Il en va de même pour le charbon de chauffage qui, lui, est réglementé par une interdiction de nouvelles installations depuis 2021, sans aucune mention de potentiel interdiction d'usage (PACE, 2023).

8.3.2.3 Conclusion

En conclusion, le chauffage domestique et tertiaire représente une source majeure des émissions de PM2.5 dans la Région de Bruxelles-Capitale, avec une contribution estimée à 42%. La comparaison entre les saisons hivernales et estivales de 2017 met en évidence l'impact significatif du chauffage des bâtiments sur la qualité de l'air, particulièrement en hiver où les concentrations de PM2.5 sont nettement plus élevées.

Pour remédier à cela, le PACE de 2023 a introduit des mesures pour sortir des combustibles fossiles et réduire les émissions dues au chauffage au bois. La mise en place des réglementations PEB a permis de classer les bâtiments selon leurs besoins énergétiques et faire un état des lieux des modes de chauffage dans la RBC.

Depuis septembre 2021, l'installation de chauffages au charbon est interdite et une interdiction similaire pour les chaudières au mazout sera mise en place en juin 2025. Ces deux restrictions ne concernent pas pour autant l'usage des installations déjà existantes. Parallèlement, bien que l'utilisation actuelle du chauffage au bois et au charbon soit actuellement négligeable, elle contribue de manière disproportionnée aux émissions de PM2.5 et n'est pourtant pas réglementée.

Dès lors, bien que des progrès aient été réalisés, il reste crucial de mettre en place des actions et des réglementations strictes concernant les installations déjà en place nécessitant les combustibles les plus polluants tels que le bois, le charbon et même le mazout. En plus de cela, la mise en place de primes à la rénovation des installations de chauffage les plus polluantes est un bon moyen de diminuer les émissions de PM2.5 liées à la combustion dans les bâtiments.

8.3.3 Industrie et utilisation de produits

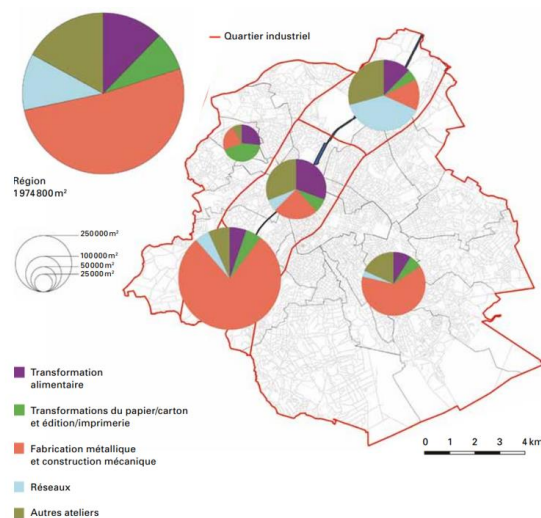
Le secteur industriel cumule différentes activités émettrices de particules fines. D'une part, les procédés industriels sont larges et variés, allant du dégraissage d'usine, à la transformation de produits alimentaires, en passant par le traitement de carrosserie. De l'autre, l'utilisation domestique et

industrielle englobent les produits d’entretiens, les parfums, les peintures, ou encore les produits de beauté. L’ensemble de ces pratiques contribue à 13% des émissions de PM2.5 selon Bruxelles Environnement (Figure 3).

8.3.3.1 Activité industrielle

Comme l’indique la Figure 21, Neder-Over-Heembeek est considéré comme un quartier industriel alors que les autres communes de cette recherche sont considérées comme résidentielles ou urbaines. Cette information suggère que l’impact des procédés industriels devrait se remarquer plus fortement au niveau des concentrations de PM2.5 à Neder-Over-Heembeek. Lorsqu’on regarde l’évolution des moyennes annuelles entre 2013 et 2023, cette hypothèse semble déjà se confirmer étant donné qu’on a une plus grosse diminution des concentrations en PM2.5 dans les communes de Uccle, Molenbeek et Berchem-Sainte-Agathe (Figure 12), qui sont supposément plus influencées par les transports routiers et le chauffage résidentiel que par les activités industrielles, comme vu précédemment.

Figure 21 : Répartition des activités industrielles sur le sol bruxellois



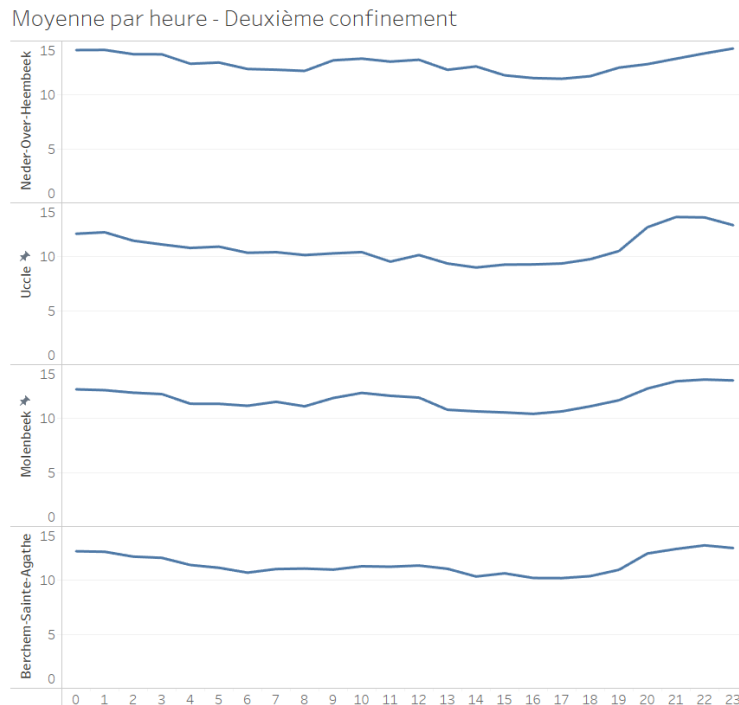
Source : Orban & Scohier, 2018

8.3.3.2 Covid

Dans ce cas-ci, on cherche à observer une période qui est moins influencée par les facteurs que l’on connaît déjà, à savoir les transports routiers et la combustion dans les ménages. La période de premier confinement dû au COVID19 nous aurait peut-être permis cela, mais, malheureusement, il n’y a pas de données enregistrées à Neder-Over-Heembeek à ces dates (18 mars au 4 mai 2020). Nous allons donc analyser les données du second confinement qui a eu lieu à Bruxelles entre le 2 novembre 2020 et le 8

mars 2021. Dès lors, les concentrations en PM2.5 mesurées dans cet intervalle de temps devraient toujours être influencées par les émissions liées au chauffage mais moins par le trafic routier.

Figure 22 : Moyenne par heure durant le second confinement



Source : CELINE, 2024b

Le Figure 22 présente les moyennes horaires des concentrations de PM2.5 dans les quatre stations de la Région de Bruxelles-Capitale pendant le deuxième confinement. Dans l'ensemble, le graphique montre que les niveaux de PM2.5 à Neder-Over-Heembeek restent relativement élevés et stables. La journée moyenne commence avec 14,2 g/m³ et diminue jusqu'à 8h (12,2 g/m³), puis, la concentration se stabilise un peu au-dessus de 13 g/m³. La concentration diminue ensuite à partir de 13h jusqu'à 17h où elle atteint 11,5 g/m³. Après cela, elle se dirige progressivement vers les 14,3 g/m³ aux alentours de minuit.

Pour les 3 autres stations, la tendance est assez semblable mais deux facteurs différents. D'une part, les moyennes sont plus faibles dès la première heure à Uccle (12,1 g/m³), Molenbeek (12,7 g/m³) et Berchem-Sainte-Agathe (12,7 g/m³) et il en est de même pour le reste de la journée. D'autre part, pour ces 3 mêmes stations, la concentration en PM2.5 croît plus rapidement qu'à Neder-Over-Heembeek entre 19h (N : 12,5 µg/m³, U : 10,5 µg/m³, M : 11,7 µg/m³ et B : 10,9 µg/m³) et 21h (N : 13,4 µg/m³, U : 13,7 µg/m³, M : 13,5 µg/m³ et B : 12,9 µg/m³). On pourrait alors interpréter cette augmentation comme étant la conséquence de la combustion dans les foyers.

Dans l'ensemble, les observations durant la période du deuxième confinement ne montrent pas d'impact significatif du secteur industriel. Toutefois, les divergences avec les 3 autres stations pourraient suggérer que les activités industrielles à Neder-Over-Heembeek maintiennent des niveaux de PM2.5 plus élevés, tandis que les autres communes bénéficient d'une réduction liée à la baisse du trafic routier mais restent influencées par le chauffage résidentiel.

8.3.3.3 Conclusion

L'analyse des concentrations de PM2.5 à Neder-Over-Heembeek montre des niveaux plus élevés par rapport à d'autres stations de la Région de Bruxelles-Capitale. Cela peut s'expliquer par la présence plus importante d'activités industrielles, contribuant à 13% des émissions totales de PM2.5 dans la RBC.

On peut voir que, bien que le second confinement lié au COVID-19 ait réduit l'impact du trafic routier, les émissions industrielles ont maintenu des niveaux élevés de PM2.5 à Neder-Over-Heembeek, alors qu'Uccle, Molenbeek et Berchem-Sainte-Agathe affichent une diminution plus marquée des PM2.5 en raison de la réduction du trafic routier notamment.

Pour améliorer la qualité de l'air, il est essentiel de renforcer la surveillance des procédés industriels, en particulier dans les zones industrielles. Des actions de régulation et de prévention des émissions de PM2.5 doivent être mises en place dans ce secteur, s'appuyant sur des études de pollution atmosphérique issue des activités industrielles

8.3.4 Gestion des déchets (hors valorisation énergétique)

Comme présenté plus tôt, la station de mesure de la qualité de l'air à Neder-over-Heembeek présente les concentrations moyennes et les écarts types les plus élevés en PM2.5 parmi les 4 stations observées (Figure 13). Ceci laisse suggérer un possible lien avec des facteurs autres que ceux qui influencent déjà les 4 stations, à savoir, le transport routier et la combustion. En l'occurrence, Neder-Over-Heembeek et ses quartiers voisins appartenant à Laeken et Haren sont marqués par la présence broyeurs de métaux.

En effet, à Neder-Over-Heembeek et ses alentours, les broyeurs de métaux sont très présents, avec 7 établissements parmi les 12 recensés au sein de la Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2016). Ceux-ci suscitent des préoccupations en matière de pollution atmosphérique parmi les riverains. Ces installations industrielles peuvent émettre divers polluants dans l'air, notamment des particules métalliques, qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Les riverains expriment des inquiétudes quant aux poussières qu'ils voient s'accumuler dans leur quartier et à l'impact de ces émissions sur la qualité de l'air dans leur quartier et sur leur propre santé

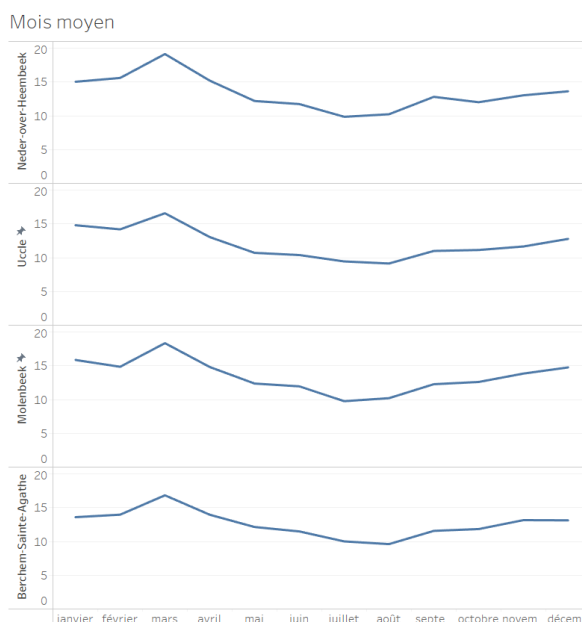
(Dinant, & Scheenaerts, 2024). Pourtant, aucune mesure des concentrations de polluants dans la zone industrielle de Neder-Over-Heembeek n'a été faite jusqu'à présent.

Les préoccupations concernant les émissions potentiellement toxiques des broyeurs de métaux résonnent avec des situations similaires dans d'autres villes belges. Des citoyens wallons expriment également des inquiétudes quant aux effets sur leur santé des émissions provenant des broyeurs de métaux, à la suite de résultats d'analyses montrant la présence d'arsenic et de plomb dans les échantillons d'urine et de sang des personnes vivant à proximité de ces installations (Theunis, 2024). En Californie, des mesures de concentrations en PM2.5 effectuées autour de stations de broyage de métal ont révélé des moyennes journalières allant de 10 à 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (DTSC, 2021).

8.3.5 Le secteur agricole

Même si la production agricole se fait principalement en dehors de la Région de Bruxelles-Capitale, l'utilisation de produits chimiques, notamment dans l'industrie agricole, peut avoir un impact important sur la concentration en PM2.5 dans la Région (Bruxelles Environnement, 2023b). L'épandage d'engrais est déjà limité à une certaine période de l'année, entre mi-février et août, pour éviter les risques de pollution de l'eau (Protect'eau, 2024) mais il n'y a pas de réglementation concernant la pollution de l'air de cette activité.

Figure 23 : Le mois moyen pour la période 2013-2023



Source : CELINE, 2024b

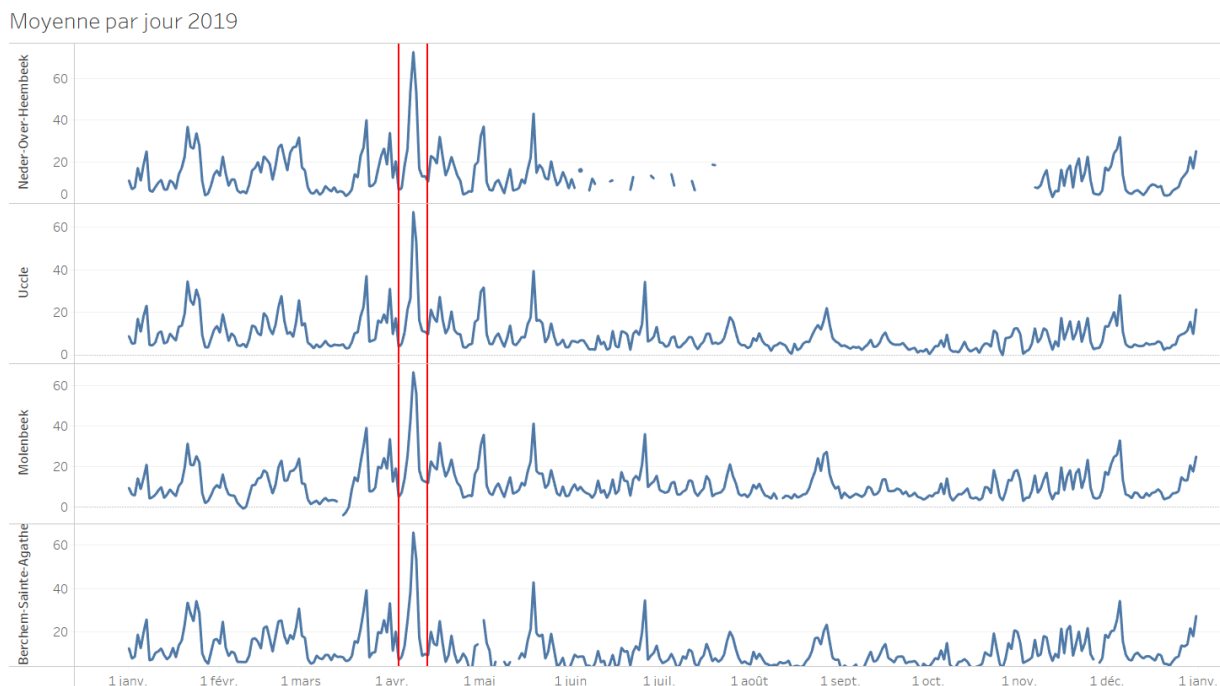
Lorsque l'on fait la moyenne pour chaque mois de l'année, avec les données récupérées entre 2013 et 2023, on peut observer certaines variations dans les stations de mesures de la RBC. La Figure 23 nous permet ainsi de mieux visualiser l'impact des processus agricoles sur la concentration en PM2.5 dans la Région.

D'abord, on commence l'année avec une concentration en PM2.5 qui est assez élevée en moyenne pour les 4 stations, comparé au reste de la période, avec 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Neder-Over-Heembeek, 14,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Uccle 15,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Molenbeek et 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Berchem-Sainte-Agathe.

Ensuite, on remarque un pic de pollution de l'air lors du mois de mars, allant de 16,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 16,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Uccle et Berchem-Sainte-Agathe, à 18,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Molenbeek et 19,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour Neder-Over-Heembeek. Cette tendance pourrait s'expliquer par un phénomène plutôt extérieur à la Région de Bruxelles-Capitale. En effet, c'est à cette période de l'année que les agriculteurs commencent à pulvériser leurs champs, ce qui entraîne une plus haute concentration de particules dans l'air (Bruxelles Environnement, 2023b).

On peut également voir assez clairement une tendance à la baisse de mars jusqu'en août (N : 10,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, U : 9,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, M : 10,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et B : 9,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), suivie d'une remontée de la pollution atmosphérique par les PM2.5 jusqu'en décembre (N : 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, U : 12,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, M : 14,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et B : 13,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figure 24 : Moyenne par jour de l'année 2019



Source : CELINE, 2024b

Plus précisément, sur la Figure 24, une distinction nette est observée sur la moyenne journalière du 8 avril 2019, avec des pics respectifs de 72,7 µg/m³, 67,1 µg/m³, 66,7 µg/m³ et 66 µg/m³ de PM2.5 enregistrés aux stations de Neder-Over-Heembeek, Uccle, Molenbeek et Berchem-Sainte-Agathe. Ce phénomène avait été prévu par l'agence interrégionale CELINE chargée de surveiller la qualité de l'air en Belgique et d'anticiper les éventuels pics de pollution (Le Soir, 2019). Celle-ci indique des « conditions météorologiques favorables à la formation de particules secondaires » (CELINE, 2023a).

Pour conclure, il y a bien une augmentation des niveaux de particules en suspension dans l'air dans la RBC lors de la période d'épandage d'engrais (Vanderstraeten et al., 2008). En effet, des particules fines secondaires se forment via une réaction chimique entre des polluants tels que les oxydes d'azote (NOX) et les oxydes de soufre (SOX) et des molécules d'ammoniac (NH₃) provenant de l'utilisation d'engrais azotés. Cette réaction est favorisée au début du printemps par des températures douces la journée et basses le soir, une pression atmosphérique relativement élevée et peu de vent (Park et al., 2021). Cette augmentation de concentration en particules est observée dans les 4 stations de mesures de Bruxelles, indiquant ainsi une source commune pendant cette période. Ces pics se manifestent chaque année depuis 2013 et leur ampleur réduit avec le temps. Cela ne semble pas être dû à une action de régulation des processus agricoles mais plutôt à la diminution des autres polluants réactifs au contact du NH₃.

8.4 Discussion générale

L'analyse des concentrations de PM2.5 de 2013 à 2023 dans quatre stations de surveillance de la qualité de l'air de la Région de Bruxelles-Capitale montre une diminution progressive de ces particules fines, bien que les recommandations strictes de l'OMS ne soient pas encore atteintes (cf. 8.2.6). D'une part, les émissions de PM2.5 proviennent principalement du chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires (42%), du transport routier (21%), de la gestion des déchets (19%) et des processus et produits industriels (13%) (cf. 6.2.3.7). D'autre part, les pics de pollution observés en hiver et au printemps sont souvent liés aux inversions thermiques (smogs de pollution en hiver) et à la formation de particules secondaires (associées aux activités d'épandage) (cf. 8.2.6).

Tout d'abord, les initiatives visant à réduire les émissions de PM2.5 provenant du transport routier, comme la journée sans voiture et la Zone de Basses Émissions, ont démontré leur efficacité (cf. 8.3.1.4). Cependant, il reste crucial de continuer à cibler les émissions « hors-échappement », c'est-à-dire, celles dues à l'usure des routes, des pneus et des freins des véhicules, y compris les véhicules électriques (cf. 8.3.1.3). De plus, la Région doit envisager des stratégies efficaces pour réduire le parc automobile global (cf. 8.3.1.4).

Le chauffage résidentiel et du secteur tertiaire contribue significativement aux émissions de PM2.5, surtout en hiver (cf. 8.3.2.1). Les mesures introduites par le PACE 2023, comme l'interdiction progressive des chaudières au charbon et au mazout (PACE, 2023), constituent des avancées importantes vers la réduction des émissions. Toutefois, il est essentiel de renforcer la réglementation sur les installations déjà existantes, comme celles au bois et au charbon, et d'encourager des alternatives moins polluantes (cf. 8.3.2.2).

Par ailleurs, le secteur industriel, notamment à Neder-Over-Heembeek, est également une source notable de PM2.5. Durant le deuxième confinement lié au COVID-19, les niveaux de PM2.5 dans cette zone sont restés stables et élevés, contrairement aux autres communes où les niveaux ont diminué (cf. 8.3.3.2). Il serait donc recommandé de mettre en place des actions de surveillance spécifiques adaptées aux procédés industriels pour mieux comprendre et contrôler leurs émissions.

De façon similaire, la station de Neder-Over-Heembeek enregistre les niveaux moyens les plus élevés de PM2.5 parmi les quatre stations observées, suggérant la présence de sources additionnelles d'émissions atmosphériques influençant ces concentrations, notamment les broyeurs de métaux dans cette zone industrielle (cf. 8.3.4). Ces installations émettent des poussières, soulevant des préoccupations parmi les riverains quant à leur impact sur la qualité de l'air et la santé. Pour améliorer la qualité de l'air, des actions ciblées doivent être mises en place pour surveiller et réguler les émissions des broyeurs de métaux et autres installations de gestion des déchets dans la Région. Il serait également utile de pouvoir distinguer les impacts des différents sites industriels ou différents procédés industriels.

Enfin, l'utilisation de produits chimiques dans l'industrie agricole contribue aux niveaux élevés de concentration en PM2.5 dans la Région de Bruxelles-Capitale. Des pics de pollution coïncident avec la période d'épandage d'engrais, suggérant que des réglementations spécifiques des pratiques agricoles sont nécessaires pour réduire cette source de pollution (cf. 8.3.5).

9. Recommandations

À travers cette recherche et analyse de la qualité de l'air dans la Région de Bruxelles-Capitale, plusieurs recommandations peuvent être adressées au gouvernement bruxellois. Celles-ci, en étant intégrées au Plan Régional Air Climat Energie (PACE), pourraient permettre d'atteindre les lignes directrices fixées par l'OMS de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en moyenne annuelle et 3-4 jours de dépassant $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne.

Premièrement, il est crucial de surveiller les conditions météorologiques qui influencent fortement les pics de pollution et de minimiser les sources émettrices durant ces périodes. Cela permettrait de réduire les journées intenses en pollution atmosphérique et permettrait de s'aligner aux normes de l'OMS, à savoir maximum 3 à 4 jours de dépassement par an au-dessus de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ (cf. 8.2.6).

Concernant le transport, la Région doit continuer à promouvoir et faciliter l'accès aux alternatives à la voiture individuelle comme les transports en commun, le covoiturage et les mobilités douces. À court terme, le gouvernement doit renforcer la LEZ et encourager les véhicules électriques légers tout en tenant compte des émissions hors-échappement. La mise en œuvre du plan Smart Move pourrait réduire la circulation des véhicules les plus lourds, émettant plus de $\text{PM}_{2.5}$ issues de l'usure des pneus et des freins (Bruxelles Mobilité, 2024).

Pour le secteur du bâtiment, il est nécessaire de progresser vers une interdiction des combustibles fossiles tels que le mazout et le gaz, et d'interdire totalement l'usage du bois et du charbon comme principales sources de chauffage. Cela doit être accompagné de la promotion des systèmes de chauffage à faibles émissions comme les pompes à chaleur (Bruxelles Environnement, 2024b). Le soutien financier pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, via les primes Révolution, peut être un bon moyen de réduire les installations existantes (cf. 8.3.2.2).

Le secteur industriel et le traitement des déchets métalliques ou autres nécessitent une surveillance et une régulation accrues des émissions de $\text{PM}_{2.5}$, notamment dans les zones les plus industrialisées. Ceux-ci sont les troisième et quatrième émetteurs de $\text{PM}_{2.5}$ de la Région de Bruxelles-Capitale mais n'apparaissent pourtant pas dans les objectifs du PACE concernant la qualité de l'air (PACE, 2023). Des études de pollution et des mesures préventives pour les procédés industriels, l'utilisation de produits, les broyeurs de métaux et autres installations de gestion des déchets doivent donc être mises en place pour envisager une réduction de ces sources émettrices de $\text{PM}_{2.5}$. Afin de différencier les effets associés aux broyeurs à métaux de ceux liés aux autres sites industriels de Neder-Over-Heembeek, par exemple, il serait opportun de mieux caractériser les particules émises, et déterminer leur composition géochimique (cf. 8.3.3.3). Une recommandation importante que nous aimerions formuler viserait alors à déterminer

non seulement les taux d'émission des PM2.5, mais aussi l'analyse de leur composition (géo)chimique, afin de pouvoir identifier leur provenance et différencier les effets des différents émetteurs.

Enfin, il est essentiel de surveiller les procédés extérieurs pouvant entraîner des pollutions atmosphériques, comme les réactions chimiques provenant des molécules d'ammoniac issues de l'épandage d'engrais et réagissant avec d'autres polluants pour former des particules fines secondaires. Pour réduire cette pollution, il est crucial de collaborer avec les autres régions et au niveau national pour réglementer ces pratiques agricoles et minimiser leur impact, notamment lors de certains épisodes météorologiques printaniers. En parallèle, des campagnes de sensibilisation sur les meilleures pratiques agricoles respectueuses de l'environnement devraient être renforcées pour encourager des méthodes d'épandage moins polluantes (cf. 8.3.5).

10. Limites

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, plusieurs limites qui peuvent affecter la précision et la portée des conclusions tirées ont été identifiées.

Tout d'abord, la vaste quantité de données à traiter sur une période de dix ans dans les quatre stations de mesures constitue une difficulté majeure pour une analyse précise et détaillée de chaque année. La densité des informations rend la gestion et l'interprétation des données particulièrement complexes.

Ensuite, le fait de tirer des conclusions à partir des résultats provenant seulement de quatre stations de mesures parmi les douze existantes dans la Région de Bruxelles-Capitale (RBC) limite la représentativité des résultats obtenus. Cette sélection restreinte de stations peut ne pas refléter de manière exhaustive la situation globale de la qualité de l'air dans toute la région.

Dans la même optique, la précision des mesures peut être mise en question car les données interprétées pour un quartier entier reposent souvent sur un point de mesure unique. Cela peut ne pas offrir une représentation précise de la qualité de l'air dans tout le quartier. Par comparaison, l'étude CurieuzenAir, avec plus de 3000 points de mesure de NO₂, permet une meilleure précision géographique et une compréhension plus fine de la répartition des polluants (Lauriks, et al., 2022).

De plus, il est également difficile de prouver certaines affirmations concernant l'influence des différents secteurs d'émission sur les niveaux de PM_{2.5}. L'absence de preuves concrètes et de données spécifiques rend complexe la démonstration de l'impact exact de chaque secteur. En outre, la concentration mesurée n'indique pas la composition des particules fines, ce qui ne permet pas de faire un lien direct entre les émissions par secteur et les concentrations mesurées dans les stations.

Finalement, les analyses présentées n'ont pas de valeur scientifique et manquent de preuves statistiques. Avec De plus, plus davantage de d'autres données précises concernant les variations du trafic, l'activité industrielle, les période cele traitement des déchets ou encore la météo, il aurait été possible auraient aidé à d'établir des corrélations statistiques plus robustes entre les concentrations de PM_{2.5} et les différents facteurs d'émissions. Par exemple, on aurait pu étudier la corrélation entre une base de données du trafic dans la commune de Molenbeek depuis 2013 avec les données de concentrations en PM_{2.5} sur la même période, tout en tenant compte d'autres variables pouvant influencer cette corrélation, comme la météo enregistrée ce jour-là en fonction du jour considéré.

11. Conclusion

La pollution de l'air représente un défi majeur pour la Région de Bruxelles-Capitale (RBC), en raison de ses impacts sur la santé humaine et l'environnement. Malgré les progrès réalisés, les concentrations de PM_{2.5} restent au-dessus des recommandations de l'OMS (cf. 8.2.6). L'analyse des données de 2013 à 2023 montre une diminution progressive, mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour atteindre les normes fixées par l'OMS (cf. 8.2.6).

Les émissions de PM_{2.5} proviennent principalement du chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires (42%), du transport routier (21%), de la gestion des déchets (19%) et des processus et produits industriels (13%) (Bruxelles Environnement, 2023b). Les pics de pollution sont souvent observés en hiver et au printemps, liés aux inversions thermiques et à la formation de particules secondaires (CELINE, 2015).

Pour réduire les émissions de PM_{2.5}, plusieurs recommandations peuvent être adressées au gouvernement bruxellois. Premièrement, il est crucial de surveiller les conditions météorologiques influençant fortement les pics de pollution et de minimiser les sources émettrices durant ces périodes. Cela permettrait de réduire les jours de forte pollution et de se conformer aux recommandations de l'OMS, limitant les dépassements annuels au-dessus de 15 µg/m³ de PM_{2.5} à 3, voire 4 jours.

En ce qui concerne les transports, il est essentiel que la Région de Bruxelles-Capitale continue à promouvoir et à faciliter l'accès aux alternatives à la voiture individuelle, telles que les transports en commun, le covoiturage et les modes de transport doux comme le vélo et la marche (Bruxelles Mobilité, 2024). À court terme, le gouvernement devrait renforcer la LEZ et encourager l'utilisation de véhicules électriques plus légers, tout en prenant en compte les émissions non liées à l'échappement. La mise en œuvre du plan Smart Move pourrait réduire la circulation des véhicules lourds, responsables d'une part importante des émissions de PM_{2.5} dues à l'usure des pneus et des freins (cf. 7.4.2.3.1.1).

Pour le secteur du bâtiment, il est nécessaire de progresser vers une interdiction des combustibles fossiles tels que le mazout et le gaz, et d'interdire totalement l'usage du bois et du charbon comme principales sources de chauffage. Cela doit être accompagné de la promotion des systèmes de chauffage à faibles émissions comme les pompes à chaleur (Bruxelles Environnement, 2024b). Le soutien financier pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, via les primes Révolution, peut être un bon moyen de réduire les installations existantes (cf. 8.3.2.2).

Le secteur industriel et le traitement des déchets nécessitent une surveillance et une régulation accrues des émissions de PM_{2.5}, notamment dans les zones les plus industrialisées. Ceux-ci sont les troisième et quatrième émetteurs de PM_{2.5} de la Région de Bruxelles-Capitale mais n'apparaissent pourtant pas

dans les objectifs du PACE concernant la qualité de l'air (PACE, 2023). Des études de pollution et des mesures préventives pour les processus industriels, l'utilisation de produits, les broyeurs de métaux et autres installations de gestion des déchets doivent donc être mises en place pour envisager une réduction de ces sources émettrices de PM2.5. En outre, une recommandation clé serait de déterminer non seulement les taux d'émission des PM2.5, mais aussi à analyser leur composition (géo)chimique. Cela permettra d'identifier leur provenance précise et de différencier les impacts des divers émetteurs, dans les quartiers industriels notamment (cf. 8.3.3.3).

Enfin, il est crucial de surveiller les processus externes qui peuvent contribuer à la pollution atmosphérique, tels que les réactions chimiques entre les molécules d'ammoniac issues de l'épandage d'engrais et d'autres polluants, qui forment des particules fines secondaires (CELINE, 2015). Pour atténuer cette pollution, une collaboration renforcée avec les autres régions et au niveau national est nécessaire pour réglementer ces pratiques agricoles et minimiser leur impact, surtout lors des épisodes météorologiques printaniers (cf. 8.3.5). En parallèle, il est important de promouvoir des campagnes de sensibilisation sur les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement pour encourager des méthodes d'épandage moins polluantes.

En somme, une approche intégrée et sectorielle est essentielle pour réduire les niveaux de PM2.5 dans la Région de Bruxelles-Capitale et se conformer aux recommandations de l'OMS, assurant ainsi une meilleure qualité de l'air pour les résidents.

12. Bibliographie

- Brasseur, O. (2011). Les méthodes d'évaluation de la qualité de l'air. Bruxelles environnement - Observatoire des données de l'environnement (pp. 1–34). https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Air_Labo_methode_eval.PDF?langtype=2067
- Bruxelles Économie et Emploi. (2023). Prime Utilitaire électrique. Bruxelles Économie Et Emploi. <https://economie-emploi.brussels/prime-utilitaire-electrique>
- Bruxelles Environnement. (2000). EN VILLE, SANS MA VOITURE ! » : MESURES ET CONSTATS EN MATIÈRE DE BRUIT. https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Bru_38.PDF
- Bruxelles Environnement. (2015). Synthèse des émissions de polluants atmosphériques en Région de Bruxelles-Capitale. Les Données De Bruxelles Environnement (pp. 1–8). https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Air_43
- Bruxelles Environnement. (2017). VADE-MECUM REGLEMENTATION TRAVAUX PEB 2015. Guide des exigences et des procédures de la réglementation Travaux PEB en Région de Bruxelles-Capitale pour les demandes de permis d'urbanisme déposées entre le 01/01/2015 et le 30/6/2017 (pp.4–93). https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/GIDS_vademecumTravauxPEB_2015_FR_VersionJuin2017.pdf
- Bruxelles Environnement. (2018). EVALUATION DE LA ZONE DE BASSES EMISSIONS RAPPORT 2018. Rapport 2018. <https://www.lez.brussels/medias/rapp-2018-lez-fr-def-2019-12-04.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8OTIxNzE3fGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnxoZjkvaDZkLzg4MDIxNzQzMDQyODYucGRmfGEyOTJhYzQzNTI4ZWJhYjE5ZTliNTdhMTdiODEyMjFjYTY5MjJhMDgzYzBhODU0NjA4OTA3NDQ1YzAzOWYxMTQ>
- Bruxelles Environnement. (2020a). Evaluation de l'impact des mesures prises dans le cadre de la pandémie de Covid-19 sur la qualité de l'air en Région de Bruxelles-Capitale. BRUXELLES ENVIRONNEMENT. <https://leefmilieu.brussels/media/7021/download?inline4>
- Bruxelles Environnement. (2020b). Réseau de mesure de la qualité de l'air. <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/projets-et-resultats/reseau-de-mesure-de-la-qualite-de-lair>

- Bruxelles Environnement. (2021). Certification PEB des habitations individuelles de 2021. Bruxelles Environnement.

https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Rapport_statistique_2021_certificationPEB.pdf

- Bruxelles Environnement. (2022a). Evaluation de la zone de basses émissions rapport 2022. Rapport 2022.

<https://lez.brussels/medias/240506-Rapport-LEZ-2022-V6.1-FR.pdf?context=bWFzdGVyfHBkZnwxOTYxMjYxfGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnxxREk1TDJobU1DODRPGt4TnpVd09UYzVOakUwTHpJME1EVXdObDITWVhCd2IzSjBYMHhGV2w4eU1ESXlYMVkyTGpGZlJsSXVjR1JtfGU5YTBiZDU5OTIwNjVjYjlkMjc2Y2QwYjViODdjZGQ1MjVkbmVjOWI3ODBhYzJhMjAxYmVjYjBIYzBhZTU5OGY&attachment=true>

- Bruxelles environnement. (2022b). Interdiction d'installations non durables dans le cadre de la réglementation chauffage et climatisation PEB. Professionnel - Bruxelles Environnement.

<https://environnement.brussels/pro/reglementation/obligations-et-autorisations/interdiction-dinstallations-non-durables-dans-le-cadre-de-la-reglementation-chauffage-et-climatisation-peb>

- Bruxelles Environnement. (2022c). Le certificat PEB.

<https://environnement.brussels/pro/reglementation/obligations-et-autorisations/le-certificat-peb>

- Bruxelles Environnement. (2023a). 2025-2035 : retrouvez les prochaines étapes de la Zone de Basses Émissions.

<https://environnement.brussels/citoyen/news/2023/2025-2035-retrouvez-les-prochaines-etapes-de-la-zone-de-basses-emissions>

- Bruxelles Environnement. (2023b). Qualité de l'air extérieur : état des lieux.

<https://environnement.brussels/citoyen/outils-et-donnees/etat-des-lieux-de-lenvironnement/qualite-de-lair-exterieur-etat-des-lieux>

- Bruxelles Environnement. (2023c). La politique de mobilité durable : pour une meilleure qualité de

l'air à Bruxelles. <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/plans-et-politiques-regionales/la-politique-de-mobilite-durable-pour-une-meilleure-qualite-de-lair-bruxelles?highlight=covnm>

- Bruxelles Environnement. (2024a). Le Code Bruxellois de l'Air, du Climat et de la maîtrise de

l'Énergie (CoBrACE). <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/plans-et-politiques-regionales/le-code-bruxellois-de-lair-du-climat-et-de-la-maitrise-de-lenergie-cobrace>

- Bruxelles Environnement. (2024b). RENOLUTION : une stratégie pour rénover le bâti bruxellois. <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/plans-et-politiques-regionales/renolution-une-strategie-pour-renover-le-bati-bruxellois>

- Bruxelles Environnement. (2024c). Bruxelles réunit air, climat et énergie dans une vision intégrée. <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/plans-et-politiques-regionales/bruxelles-reunit-air-climat-et-energie-dans-une-vision-integree>

- Bruxelles Environnement-ibge. (2014). Les données de l'IBGE : "Air – données de base pour le plan." BRUXELLES ENVIRONNEMENT-IBGE, COLLECTION FICHES DOCUMENTEES, THEMATIQUE AIR (pp. 1–15) [Report]. https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Air_9.PDF

- Bruxelles Mobilité. (2018). Plan régional de mobilité 2020-2030. Dans Bruxelles Mobilité. https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/2021-04/goodmove_FR_20210420.pdf

- Bruxelles Mobilité. (2024). SmartMove, un nouveau souffle pour Bruxelles. SmartMove. <https://smartmove.brussels/fr/introduction/>

- CELINE. (2015). Etat de la situation concernant les concentrations de particules fines depuis mardi 17 mars 2015. <https://www.irceline.be/fr/nouvelles/etat-de-la-situation-concernant-les-concentrations-de-particules-fines-depuis-mardi-17-mars-2015>

- CELINE. (2018). Journée sans voiture en ville dimanche 16 septembre 2018. Cellule Interrégionale De L'Environnement (CELINE). <https://www.irceline.be/fr/nouvelles/sans>

- CELINE. (2023a). Combien d'épisodes de pollution (PM) y a-t-il déjà eu en Belgique ? <https://www.irceline.be/fr/documentation/faq/combien-depisodes-de-smog-y-a-t-il-deja-eu-en-belgique>

- CELINE. (2023b). Quelle est la composition chimique des particules? Cellule Interrégionale De L'Environnement (CELINE). <https://www.irceline.be/fr/documentation/faq/quelle-est-la-composition-chimique-des-particules>

- CELINE. (2024a). Révision de la directive européenne 2008/50/CE. Cellule Interrégionale De L'Environnement. <https://www.irceline.be/fr/documentation/legislation/review-of-the-european-directive-2008>

- CELINE. (2024b). Base de données externe. Cellule Interrégionale De L'Environnement.

- ClientEarth. (2021a). ClientEarth and Brussels residents win five-year legal battle for clean air. ClientEarth. <https://www.clientearth.org/latest/press-office/press/clientearth-and-brussels-residents-win-five-year-legal-battle-for-clean-air/>

- ClientEarth. (2021b). New maps reveal toxic air in Brussels has been going undetected. <https://www.clientearth.org/latest/press-office/press/new-maps-reveal-toxic-air-in-brussels-has-been-going-undetected/>

- Colbeck, I., & Lazaridis, M. (2010). Aerosols and environmental pollution. *Naturwissenschaften*, 97, 117-131.

- Commission européenne (2005), Communication de la Commission - Aide de l'UE : «Stratégie thématique sur la pollution atmosphérique», COM(2005)446 Final, septembre 2005, Bruxelles.

- Conseil européen. (2021). Pollution atmosphérique dans l'UE: faits et chiffres. Conseil Européen. <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/air-pollution-in-the-eu/>

- Costa, S., Ferreira, J., Silveira, C., Costa, C., Lopes, D., Relvas, H., ... & Paulo Teixeira, J. (2014). Integrating health on air quality assessment—review report on health risks of two major European outdoor air pollutants: PM and NO2. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 17(6), 307-340.

- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., & Pan, Y. (2006). Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment international*, 32(6), 815-830.

- Da Schio, N., De Geus, S., & Catherine, BOULAND. (2018). A brief guide to the air of Brussels. Brussels Centre Observatory, 2, 117-131. <http://bco.bsi-brussels.be/a-brief-guide-to-the-air-of-brussels/>

- Dikuta, O. (2019). " Comment expliquer le manquement de la Région de Bruxelles-Capitale en matière de lutte contre la pollution de l'air ? ".

- Dinant, M., & Scheenaerts, N. (2024). La pollution des broyeurs à métaux à Bruxelles est-elle comparable à la Wallonie ? BX1. <https://bx1.be/categories/news/la-pollution-des-broyeurs-a-metaux-a-bruxelles-est-elle-comparable-a-la-wallonie/>

- DPG. (2019). Déclaration de politique générale commune au Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale et au Collège réuni de la Commission communautaire commune. In Parlement Bruxellois (pp. 2–4). <https://www.parlement.brussels/wp-content/uploads/2019/07/07-20-D%C3%A9claration-gouvernementale-parlement-bruxellois-2019.pdf>

- EEA (2021). ETC/ATNI Report 5/2020: Transport Non-exhaust PM-emissions. An overview of emission estimates, relevance, trends and policies. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-5-2020-transport-non-exhaust-pm-emissions-an-overview-of-emission-estimates-relevance-trends-and-policies/@@download/file/ETC-ATNI%202020-5_AP2020-task%201-3-9-4_201221_v10%20-%2002-03-2021%20FINAL.pdf

- EEA. (2016). L'inversion de température emprisonne la pollution au niveau du sol. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/fr/pressroom/infographies/l2019inversion-de-temperature-emprisonne-la/view>

- EEA. (2019). Air quality in Europe - 2020 report. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>

- EPA. (2023). Basic Information about NO2 | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>

- EEA. (2022). Health impacts of air pollution in Europe, 2022. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

- EEA. (2023). Europe's air quality Status 2023. Agence européenne pour l'environnement. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>

- EPA. (2024a). Health effects of ozone pollution | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>

- EPA. (2024b). Sulfur Dioxide Basics | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>

- European Commission. (2020). EU air quality standards. European Commission. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en

- European Commission. (2024). Air quality. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality_en?prefLang=fr

- European Parliament. (2024). Air pollution: Deal with Council to improve air quality | News | European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240219IPR17816/air-pollution-deal-with-council-to-improve-air-quality>

- European Union sanctions. (2023). EEAS. https://www.eeas.europa.eu/node/410712_fr

- F. Lauriks, D. Jacobs and F. J. R. Meysman (2022). “CurieuzenAir: Data collection, data analysis and results”. 50 p. University of Antwerp.

- Fowler, D., Brimblecombe, P., Burrows, J., Heal, M. R., Grennfelt, P., Stevenson, D. S., ... & Viero, M. (2020). A chronology of global air quality. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2183), 20190314.

- Gerouard, F. (2020). Qualité de l’air : des leviers pour optimiser la fertilisation azotée. *L’Agriculteur Normand*. <https://www.agriculteur-normand.com/qualite-de-lair-des-leviers-pour-optimiser-la-fertilisation-azotee>

- González Ortiz A., Gsella A., Guerreiro C., Soares J. & Horálek J. (2021), “Health risk assessments of air pollution. Estimations of the 2019 HRA, benefit analysis of reaching specific air quality standards and more”, <https://www.eionet.europa.eu/etc/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-10-2021-health-risk-assessments-of-air-pollution-estimations-of-the-2019-hra-benefit-analysis-of-reaching-specific-air-quality-standards-and-more>

- Heene, B., Beaujean, F., Declerck, P., de Vos, T., Mendes, G., & Brasseur, O. (2016). Evaluation de la qualité de l’air dans le pentagone de la Région de Bruxelles-Capitale.

- Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmospheric Environment*, 111, 161-169.

- Hub.brussels. (2023). Le secteur alimentaire à Bruxelles : toujours solide et en croissance. Hub.Brussels. <https://hub.brussels/fr/le-secteur-alimentaire-a-bruxelles-toujours-solide-et-en-croissance/>

- IBGE. (2002). La lutte contre la pollution atmosphérique dans la région de Bruxelles-Capitale. Bruxelles Environnement. https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/Plan_Air_climat_2002-2010_FR.PDF

- IBGE. (2014). ORDONNANCE PEB. Bruxelles Environnement-IBGE. https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/gids_20141127_ordonnance_fr_0.pdf

- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., ... & Nieuwenhuijsen, M. (2021). Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *The Lancet Planetary Health*, 5(3), e121-e134.

- Laurent, A., & Hauschild, M. Z. (2014). Impacts of NMVOC emissions on human health in European countries for 2000–2010: Use of sector-specific substance profiles. *Atmospheric environment*, 85, 247-255.

- Météo en Belgique. (2017). Hiver 2017. <https://www.meteobelgique.be/article/104-annee-2017/2192-hiver-2017>

- Munster, P. J. (2024). Malgré les normes, les broyeurs à métaux continuent à polluer. *Le Soir*. <https://www.lesoir.be/563340/article/2024-01-23/malgre-les-normes-les-broyeurs-metaux-continuent-polluer>

- OMS. (2016). Santé et Environnement. Organisation Mondiale De La Santé. https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA69/A69_18-fr.pdf

- OMS. Occupational and Environmental Health Team. (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : global update 2005 : summary of risk assessment. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/69477>

- ONU. (2015). Objectifs de développement durable. Développement Durable. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

- Orban, A., & Scohier, C. (2018). Bruxelles industrielle ? Inter-environnement Bruxelles. https://www.ieb.be/IMG/pdf/bem296_09-10-18.pdf

- Organisation Mondiale de la Santé : OMS. (2022). Pollution de l'air ambiant (extérieur). [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

- Organisation Mondiale de la Santé : OMS. (2024). <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Organisation Mondiale de la Santé. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- PACE. (2016). PLAN REGIONAL AIR-CLIMAT-ENERGIE 2016. Dans Bruxelles Environnement. https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/PLAN_AIR_CLIMAT_ENERGIE_FR_DE_F.pdf
- Park, J., Kim, E., Oh, S., Kim, H., Kim, S., Kim, Y. P., & Song, M. (2021). Contributions of ammonia to high concentrations of PM2.5 in an urban area. *Atmosphere*, 12(12), 1676.
- Pénard-Morand, C., & Annesi-Maesano, I. (2004). Air pollution: from sources of emissions to health effects. *Breathe*, 1(2), 108-119.
- PACE. (2023). Plan Régional Air-Climat-Energie. Bruxelles Environnement. https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/PACE_FR.pdf
- Popescu, F., & Ionel, I. (2010). Anthropogenic air pollution sources. *Air quality*, 1-22.
- Protect'eau. (2024). Engrais : périodes autorisées et conditions. <https://www.protecteau.be/fr/engrais-periodes-autorisees-et-conditions>
- Rapport Spécial de la Cour des Comptes Européenne n° 23/2018 – Pollution de l'air : Notre santé n'est toujours pas suffisamment protégée. (2018). <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/fr/>
- Santé Publique France. (2019). Qu'est-ce que la pollution de l'air? <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/articles/qu-est-ce-que-la-pollution-de-l-air>
- Scohier, C., Matagne, J., D'Haenens, S., & Kuyken, T. (2015). Le Plan régional Air-Climat-Énergie (PACE) - Inter-Environnement Bruxelles. <https://www.ieb.be/Le-Plan-regional-Air-Climat-Energie-PACE>

- Soir. (2019). Pic de pollution aux particules fines ce lundi dans tout le pays. Le Soir. <https://www.lesoir.be/217146/article/2019-04-08/pic-de-pollution-aux-particules-fines-ce-lundi-dans-tout-le-pays>

- SPF. (2023). Transposition. SPF Affaires Étrangères - Commerce Extérieur Et Coopération Au Développement. <https://diplomatie.belgium.be/fr/politique/coordination-des-affaires-europeennes/la-politique-de-la-belgique-au-sein-de-lue/transposition>

- Statbel. (2023). Parc de véhicules. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/mobilite/circulation/parc-de-vehicules>

- STRATEC. (2022). Rapport sur l’incidence environnemental du PACE 2 en RBC. Bruxelles Environnement, Rapport Final.
https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/RIE_PACE_FR.pdf

- Theunis, L. (2024). Les jeunes riverains des broyeurs de métaux surexposés à certains polluants. DAILY SCIENCE. <https://dailyscience.be/24/04/2024/les-jeunes-riverains-des-broyeurs-de-metaux-surexposes-a-certains-polluants/>

- Timmers, V. R., & Achten, P. A. (2016). Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. Atmospheric environment, 134, 10-17.

- Turner, M. C., Andersen, Z. J., Neira, M., Krzyzanowski, M., Malmqvist, E., Ortiz, A. G., ... & Hoffmann, B. (2023). Clean air in Europe for all! Taking stock of the proposed revision to the ambient air quality directives: a joint ERS, HEI and ISEE workshop report. European Respiratory Journal, 62(4).

- Ung, A. (2003). Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).

- United Nations Environment Programme, & United Nations Human Settlements Programme (2016). The ABC for Sustainable Cities: A Glossary for Policy Makers. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/32537>.

- United Nations Environment Programme. (2022). Comment mesure-t-on la qualité de l’air ? UNEP. <https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/recit/comment-mesure-t-la-qualite-de-lair>

- Vanderstraeten, M., & Tulkens, F. (2013). " Le Code bruxellois de l'air, du climat et de la maîtrise de l'énergie: une approche transversale des défis environnementaux. *La Libre Belgique*, 22, 8.

- Vanderstraeten, P., Lénelle, Y., Meurrens, A., Carati, D., Brenig, L., Offer, Z. Y., & Zaady, E. (2008). Micromorphology and chemistry of airborne particles in Brussels during agriculture working periods in surrounding region. *Environmental monitoring and assessment*, 146, 33-39.

- Vanhaeren, S., Feron, P., Hendrickx, K., & Fallon, C. (2013). La gestion de la qualité de l'air en Belgique : une gouvernance multiniveau entre incertitudes politiques et techniques. *Télescope*, 19(1), 115-134.

- Verbeek, T., & Hincks, S. (2022). The 'just' management of urban air pollution? A geospatial analysis of low emission zones in Brussels and London. *Applied Geography*, 140, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102642>

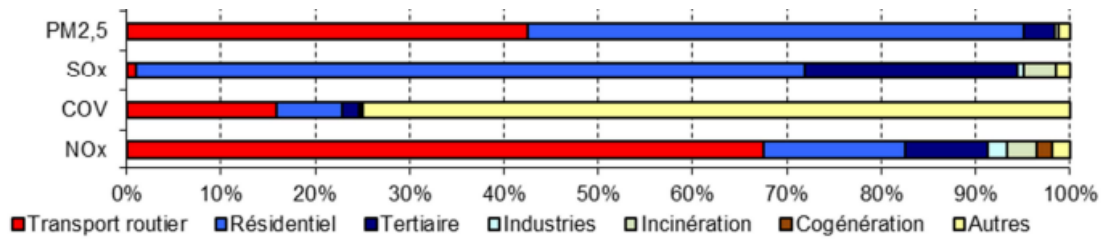
- Wolff, H., & Perry, L. (2010). Policy monitor. *Review of Environmental Economics and Policy*.

- Xu, G., Ren, X., Xiong, K., Li, L., Bi, X., & Wu, Q. (2020). Analysis of the driving factors of PM2.5 concentration in the air: A case study of the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 110, 105889.

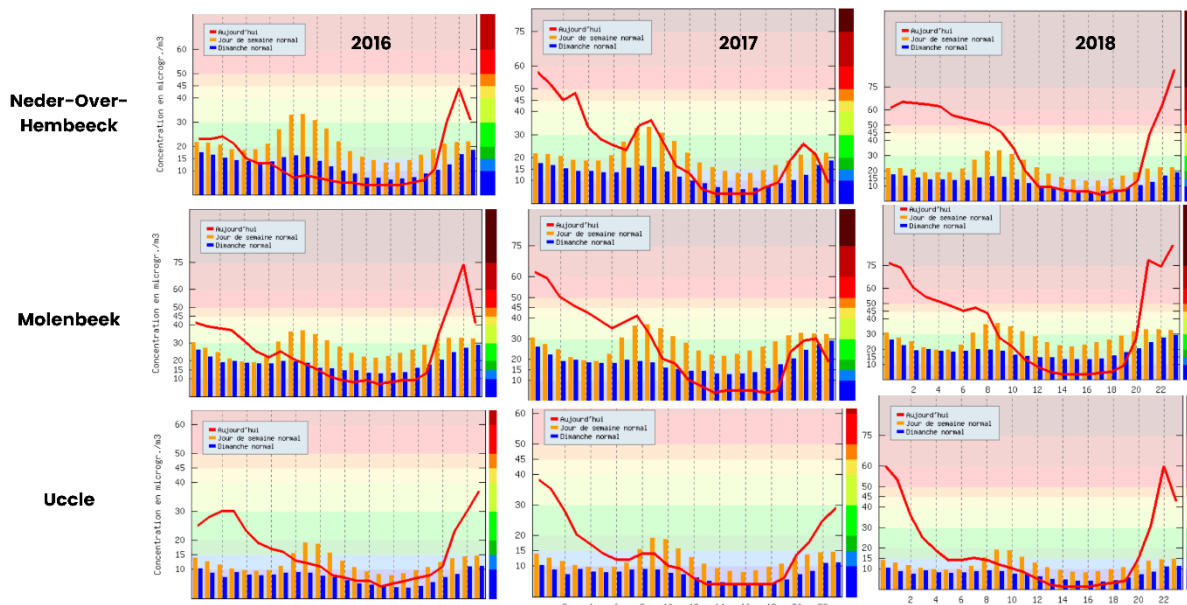
- Zhang, Q., Jiang, X., Tong, D., Davis, S. J., Zhao, H., Geng, G., ... & Guan, D. (2017). Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 543(7647), 705-709.

13. Annexes

Annexe 1 : Répartition de l'origine des polluants par secteur, 2012

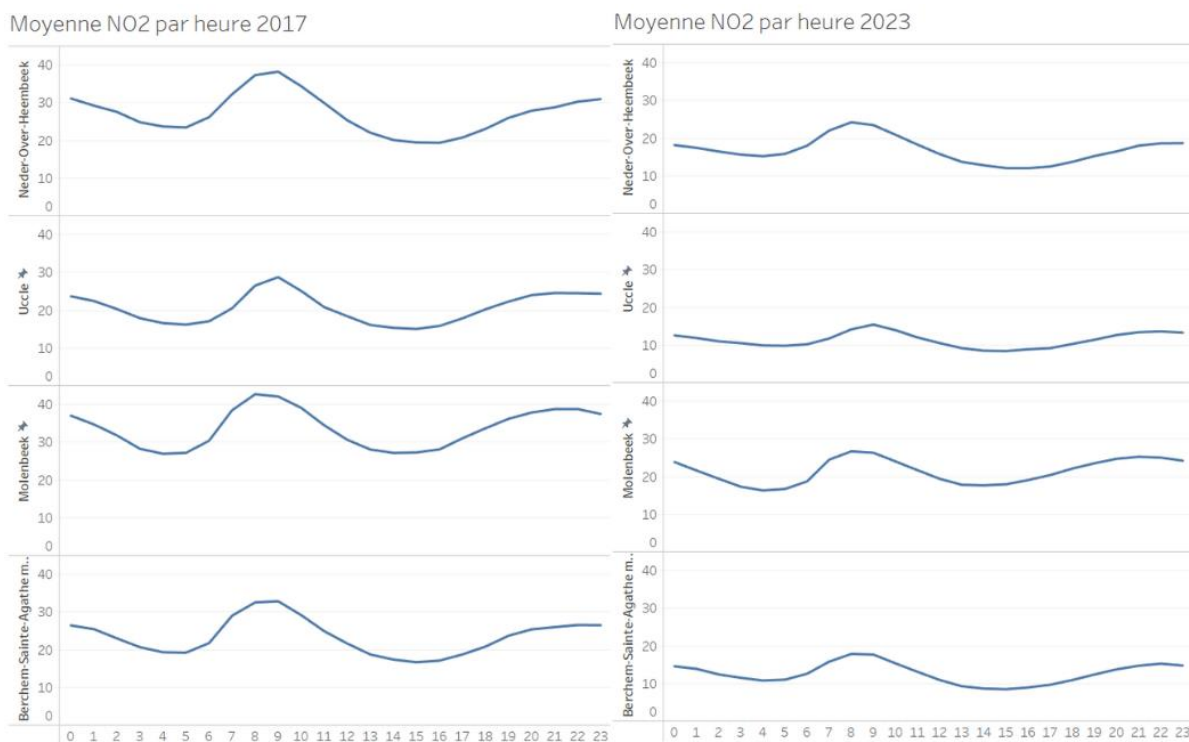


Annexe 2 : NO₂ durant les journées sans voiture, 2016-2018



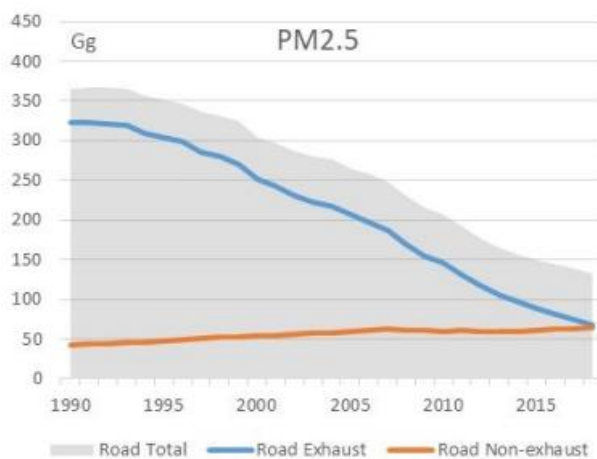
Source : CELINE, 2022

Annexe 3 : Moyenne de concentration de NO₂ dans la RBC, 2017 et 2023



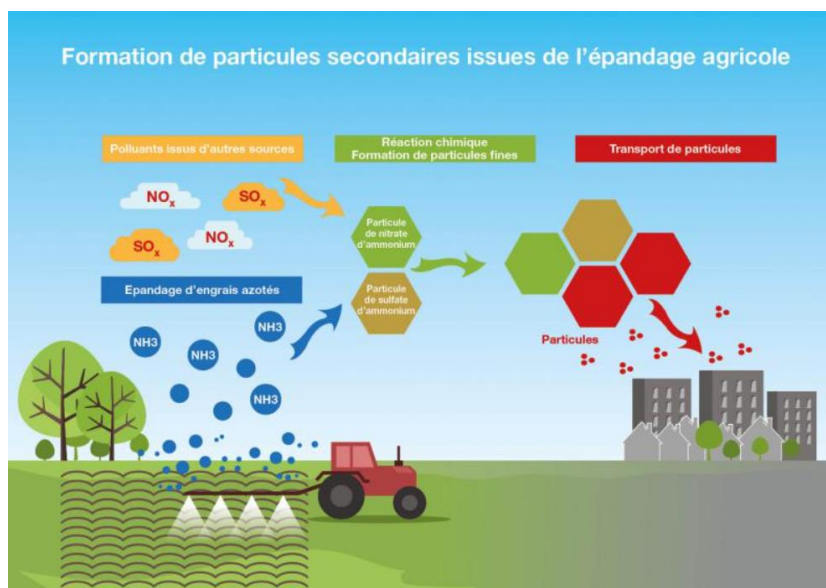
Source : CELINE, 2024

Annexe 4 : L'évolution des émissions de PM_{2.5} des transports routiers via l'échappement et hors-échappement



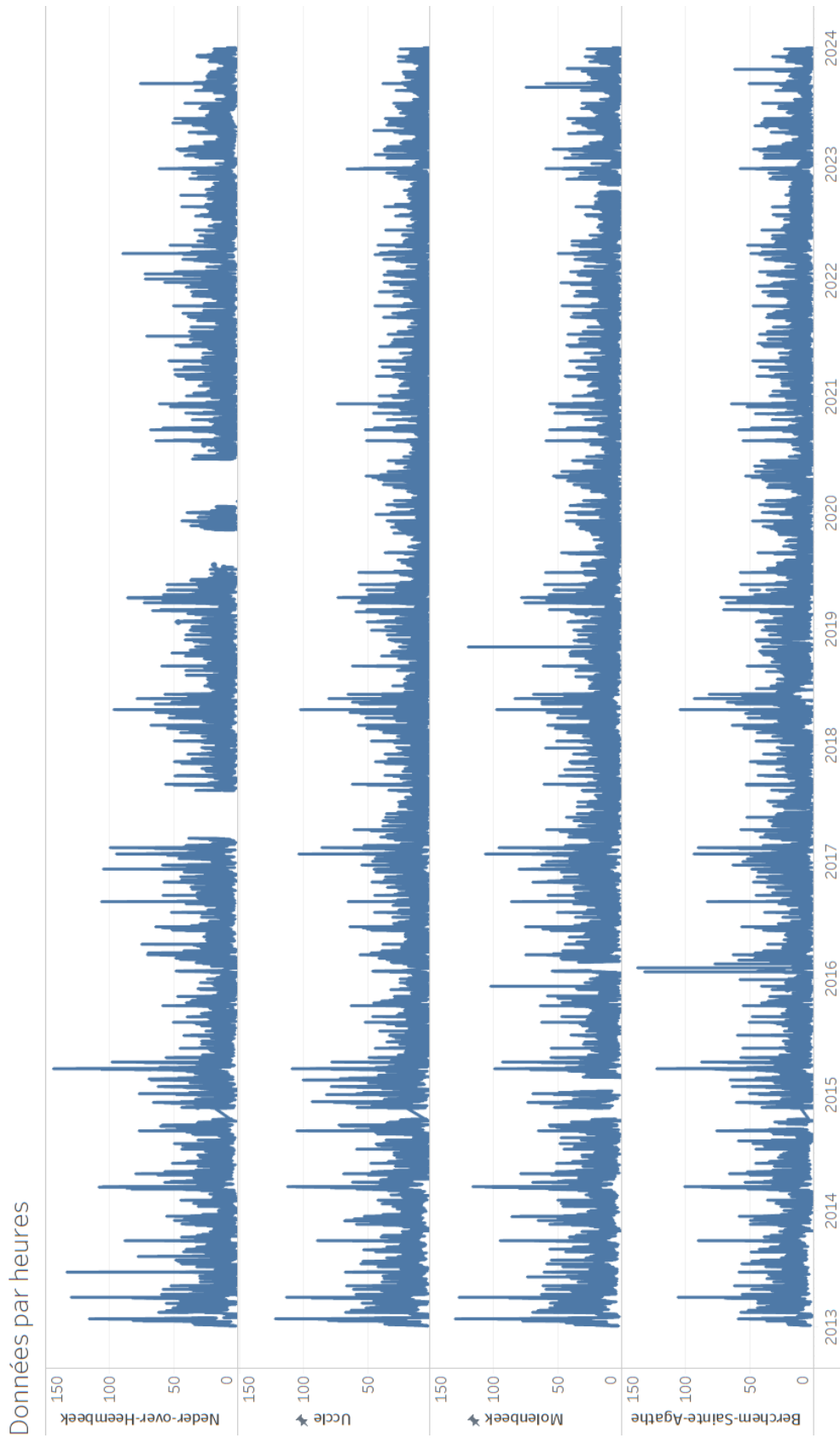
Source : EEA 2021

Annexe 5 : Schéma de la formation de PM via le secteur agricole

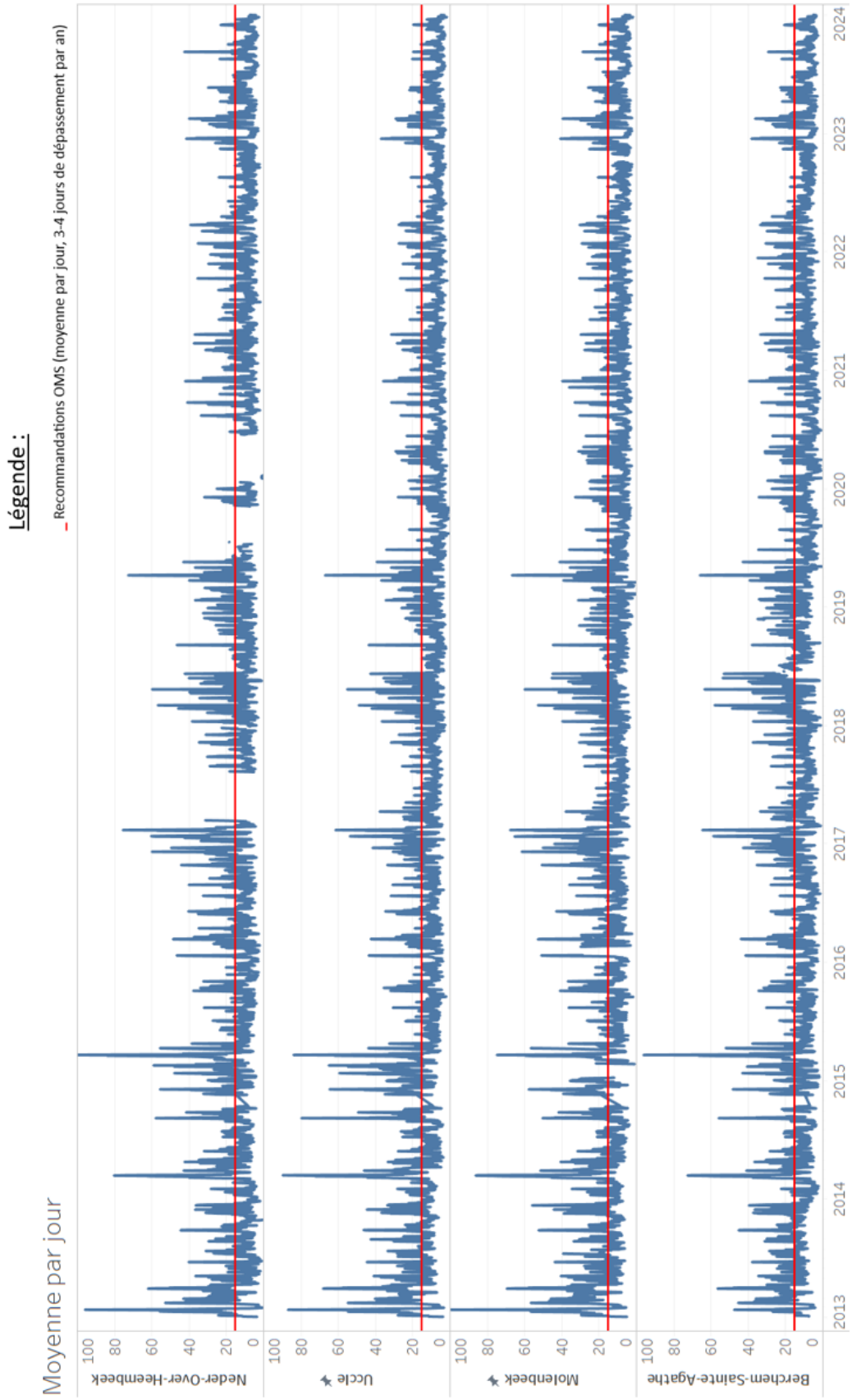


Source : Gerouard, 2020

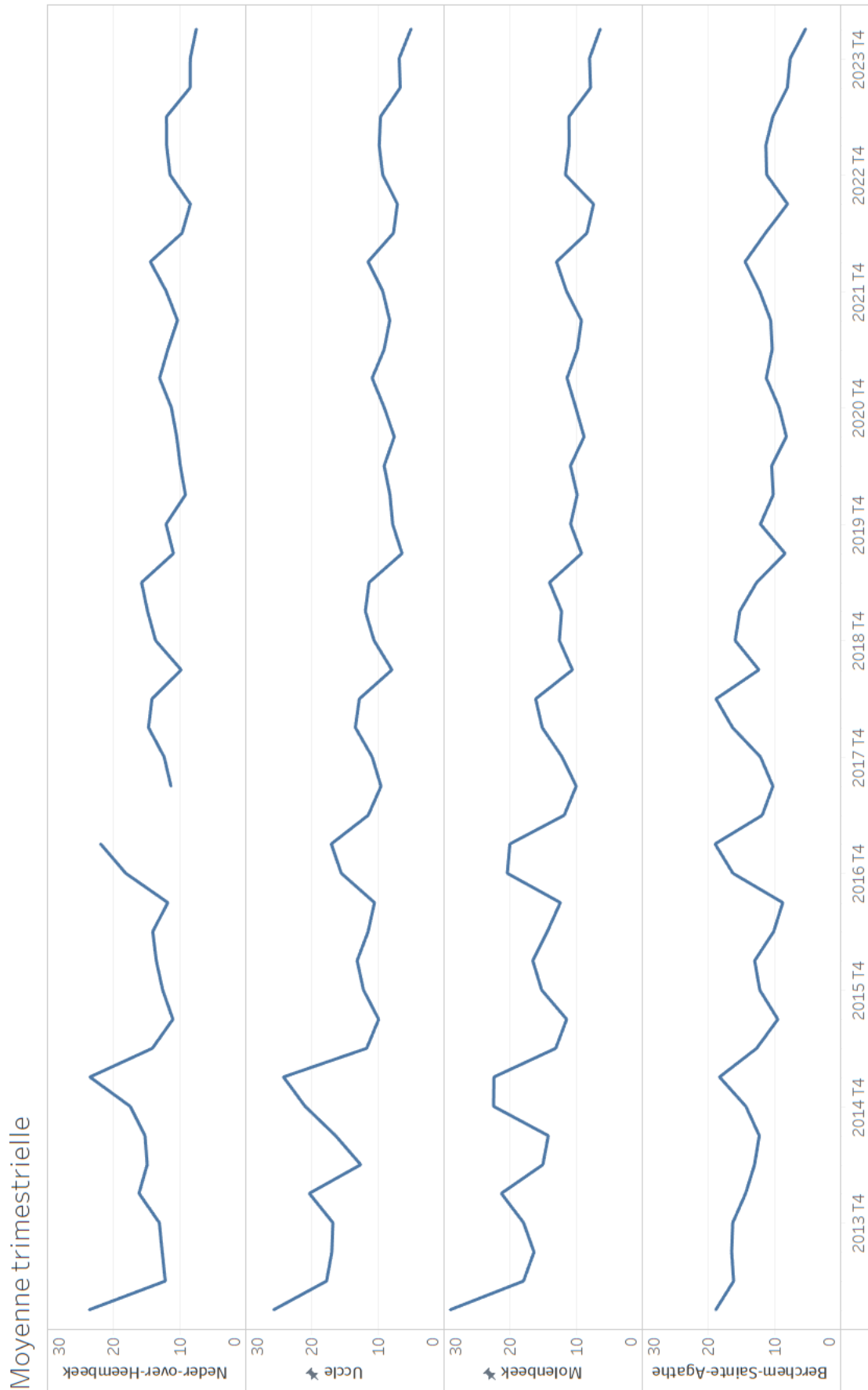
Annexe 6 : Données brutes (par heure) (Source : CELINE, 2024b)



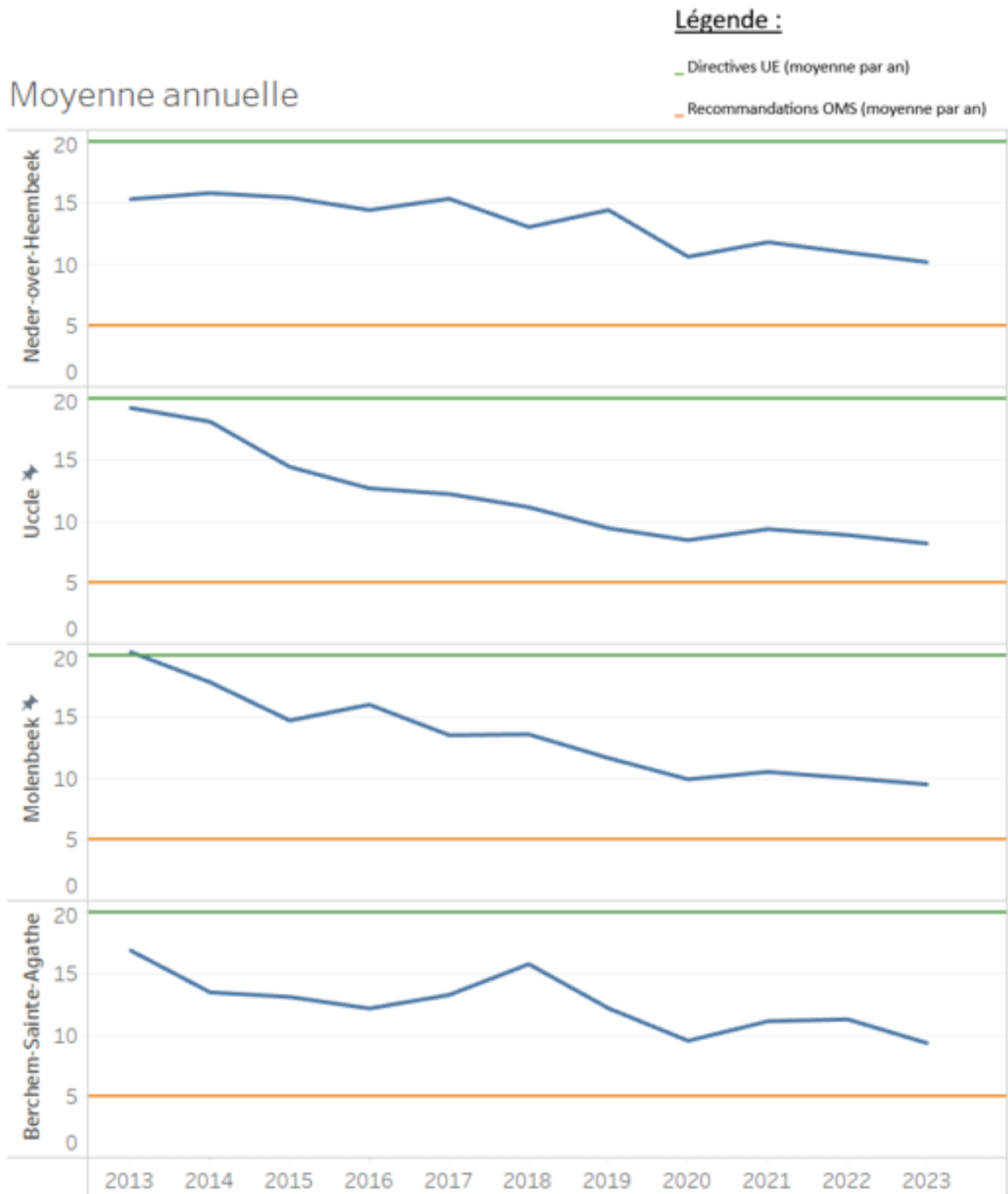
Annexe 7 : Moyenne par jour (Source : CELINE, 2024b)



Annexe 8 : Moyenne trimestrielle (Source : CELINE, 2024b)



Annexe 9 : Moyenne annuelle (Source : CELINE, 2024b)



Annexe 10 : Graphique en boîte à moustaches (Source : CELINE, 2024b)

