

# TRAVAIL DE FIN D'ETUDES EN MEDECINE GENERALE

*Université Catholique de Louvain*

*Année académique 2018-2019*



## LA POLLUTION DE L'AIR EXTÉRIEUR ET SON IMPACT SUR LA SANTÉ

Aide à la compréhension et à la pratique en médecine générale

*Dr Patricia Palacios*

*Promoteur : Dr John Pauluis*

*Co-Promotrice: Dr Hanne Bosselaers*

## Table des matières

REMERCIEMENTS .....	4
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	5
INTRODUCTION .....	6
Pourquoi un TFE sur la pollution de l'air extérieur ?.....	6
La pollution de l'air extérieur : un problème de santé publique .....	8
La pollution de l'air : un sujet d'actualité.....	10
Contexte actuel en Belgique : .....	10
Lien avec la pratique en médecine générale : .....	12
Utilité d'un travail dans ce contexte : .....	13
Objectifs du TFE : .....	13
METHODE .....	13
Recherche dans la littérature .....	13
Rencontres scientifiques.....	15
Elaboration du e-learning .....	16
LA POLLUTION DE L'AIR : AIDE À LA CONSULTATION.....	16
Les polluants et leurs sources.....	16
Les particules fines.....	17
Les oxydes d'azote .....	18
Le dioxyde de soufre .....	18
L'ammoniac .....	19
L'ozone .....	19
Ce qui influence la qualité de l'air .....	20
Les facteurs météorologiques .....	20
L'inversion thermique.....	20
L'activité agricole .....	21

Les transports routiers.....	21
Les rues Canyon .....	21
Les effets sur la santé.....	22
La réaction macroscopique .....	23
La réaction microscopique .....	24
Niveau alvéolaire .....	24
Niveau cellulaire.....	24
Le système cardio-vasculaire.....	25
Le système respiratoire.....	26
Le système neurologique.....	27
La reproduction .....	27
Le système endocrine .....	28
Les personnes à risque.....	28
La particularité des enfants .....	29
Vignette clinique .....	29
L'exposition au polluants et l'asthme chez l'enfant.....	30
La proximité des grands axes routiers et la capacité respiratoire.....	31
La proximité des grands axes routiers et les capacités intellectuelles .....	31
Conclusion de la vignette clinique .....	32
La question du sport .....	32
Est-il bon de faire du sport dans une ville polluée ? .....	32
Localisation.....	33
Moment.....	33
Saison.....	33
Rythme .....	33
Qui sont les usagers les plus exposés à la pollution de l'air ? .....	33

« Take home » message.....	35
L'impact de la pollution atmosphérique sur les différents organes du corps .....	35
Ce qui influence la qualité de l'air : géographie et saisons.....	36
DISCUSSION .....	37
CONCLUSION .....	39
BIBLIOGRAPHIE .....	41
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	46
LISTE DES TABLEAUX .....	46
ANNEXE .....	47

## REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord simplement remercier mon époux Dirk et mes enfants Icaro et Tupaq pour leur patience et leur soutien dans mes choix atypiques. Ainsi que ma maman, qui m'a toujours laissé croire que tout était possible si on y travaillait, que l'on soit homme ou femme, âgé ou jeune. J'aimerais aussi la remercier pour ses relectures attentives, ses conseils et surtout son amour.

Je remercie le Docteur Hanne BOSSELAERS et toute l'équipe et les patients de MPLP à Molenbeek pour leur enthousiasme et leur support. Grâce à eux j'ai pu commencer la médecine générale dans une ambiance d'équipe soudée, constructive, optimiste, scientifique et avec des objectifs qui vont bien au-delà des préoccupations personnelles et individuelles. Le Docteur BOSSELAERS a été mon guide dans les nombreux engagements citoyens et m'a permis de croire en une médecine générale qui prend en compte les aspects sociétaux, économiques et environnementaux des patients.

En deuxième année de médecine générale, j'ai rencontré le Docteur Reinelde POELMAN qui restera pour toujours un modèle et un guide, un véritable maître de stage dans le sens noble du terme. Son expérience, son engagement envers les patients et les assistants et sa grande humanité m'ont aidé à progresser dans ma pratique. Son avis tranché et ses relectures ont été d'une aide décisive dans la réalisation de ce TFE.

Je remercie le Docteur John PAULUIS d'avoir accepté d'être le promoteur de ce travail, nos échanges passionnés sur la médecine environnementale et ses connaissances immenses ont été de véritables moteurs et ont renforcé mon envie d'agir dans le domaine.

Je remercie également les Docteurs Claire GERAETS, Nele VANDENBEMPT, Alain DEVAUX mais aussi Liévin CHEMIN du BRAL, qui m'ont conforté dans mes choix engagés pour une médecine humaine et une société plus juste.

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

BRAL: mouvement urbain pour un Bruxelles durable

CH<sub>4</sub>: Méthane

CO<sub>2</sub>: Dioxyde de carbone

COP 23: 23ième conférence des parties des nations unies

CVF : Capacité vitale forcée

DALY : Disability-Adjusted Life Year

FEV : volume expiratoire forcé

FNRS: Fonds national de la recherche scientifique

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GES : Gaz à effet de serre

HFC : hydrofluorocarbure

KUL : Katholiek Universiteit Leuven

MPLP: Médecine pour le peuple

N<sub>2</sub>O: protoxydes d'azote

NO<sub>2</sub> : Dioxyde d'azote

O<sub>3</sub> : Ozone

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PAH : hydrocarbures polycycliques aromatiques

PFC: perfluorocarbure

PIB: Produit intérieur brut

PM : Particulates Matter (particules fines)

ROS : reactive oxygen species, dérivés réactifs de l'oxygène

SF<sub>6</sub>: hexafluorure de soufre

SPF : service public fédéral

TFE : Travail de fin d'étude

VOCS : Composés organiques volatiles

[...] : concentration

## INTRODUCTION

### Pourquoi un TFE sur la pollution de l'air extérieur ?

Les questions environnementales m'ont toujours beaucoup intéressé, en tant qu'amoureuse de la nature, en tant qu'actrice d'une société de consommation qui se pose des questions sur les conséquences de nos modes de vie, et surtout en tant que maman de deux petits garçons et médecin généraliste. D'une part, mon expérience de chercheuse en thérapie cellulaire m'a permis de constater la force mais aussi la fragilité des cellules humaines, en les observant quotidiennement IN VITRO : la moindre variation de composants des milieux de culture avait un impact considérable sur leur survie. D'autre part, mon quotidien en ville, j'étais interpellée face à la qualité de l'air que nous respirons dans les rues. Je me questionnais beaucoup sur l'impact de la qualité de l'air sur nos cellules et nos organes. J'avais vaguement entendu parler des impacts respiratoires de la pollution de l'air mais je trouvais que nous n'étions pas suffisamment informés, en tant que citoyens et en tant que médecins.

En quittant mon travail pour une société privée de thérapie cellulaire et en me réorientant vers la médecine générale je ressentais le désir profond de mieux comprendre les phénomènes environnementaux et leur impact sur la santé des patients. J'avais même planifié de trouver un laboratoire qui accepterait de faire des tests en mettant en contact des cellules souches avec des polluants de l'air. Je ne savais pas encore que de nombreuses études existaient déjà sur le sujet.

Le hasard a donc très bien fait les choses car lors de ma première année d'assistantat je suis arrivée dans une maison médicale engagée qui planifiait d'approfondir les questions environnementales.

Il s'agissait de la maison médicale « Le Renfort », une maison médicale de « *Médecine pour le Peuple* », dans les quartiers défavorisés de Molenbeek. Une maison médicale au forfait qui met l'accent sur la promotion à la santé, la prévention et la sensibilisation des patients sur les déterminants de la santé mais qui ambitionne aussi d'aller plus loin en agissant sur les déterminants sociaux avec les patients pour favoriser "le droit à la santé dans une société saine". Cette équipe envisage la médecine générale en se basant sur le modèle de DAHLGREN et WHITEHEAD<sup>1</sup> (Fig. 1). Ce modèle préconise que l'état de santé se caractérise par les interactions entre les facteurs socio-économiques, l'environnement physique et le comportement individuel. Selon ce modèle, ces facteurs sont les déterminants de la santé et ils n'agissent pas isolément, c'est la combinaison de ces différents facteurs qui influe sur l'état

de santé des patients. Plus on s'éloigne du centre du schéma, plus les facteurs sont déterminants pour la santé.

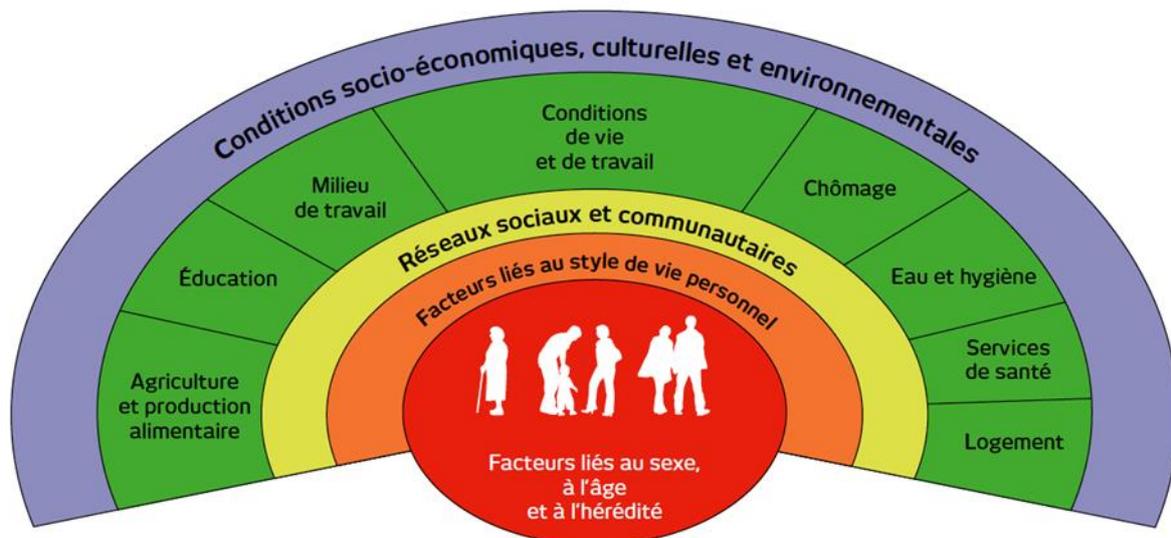


Figure 1. Les déterminants de la santé de Dahlgren et Whitehead.

Une des médecins généralistes de la maison médicale, le Docteur Hanne BOSSELAERS, a décidé de mettre en place un groupe de travail sur la pollution de l'air et son impact sur la santé. J'étais très enthousiaste à l'idée de participer à ce projet sur un sujet qui me touchait depuis plusieurs années. Nous avons commencé avec quatre médecins généralistes, deux médecins de notre maison médicale et trois médecins généralistes d'autres maisons médicales.

Nous avons planifié de travailler sur deux plans : la sensibilisation des patients au travers d'ateliers et de micro conférences et la sensibilisation des collègues.

Je m'aperçus rapidement que le sujet était vaste et que je manquais grandement de connaissances. Beaucoup de patients posaient des questions sur l'impact de la pollution sur le système respiratoire, essentiellement, et je ne pouvais répondre très précisément. Je confondais aussi les questions de réchauffement climatique et de pollution de l'air. Je n'identifiais pas clairement les différences entre les différents polluants de l'air et leurs différents impacts sur la santé. Je me posais également la question de l'ampleur de ce problème et de ce que moi, en tant que médecin généraliste, je pouvais faire pour lutter contre la pollution de l'air. Il me manquait les outils pour identifier clairement le problème et surtout pour conseiller mes patients sur ces questions environnementales. En écoutant mes collègues, je m'aperçus qu'ils n'en savaient pas beaucoup plus que moi et qu'il existait très peu de formations en médecine environnementale pour les médecins. J'ai donc commencé par

m'informer sur le sujet en faisant des recherches de littérature et en contactant le responsable de la médecine environnementale de la SSMG, le Docteur PAULUIS.

C'est comme cela que j'ai été amenée à rencontrer les responsables du projet NEHAP (voir plus bas) et à m'engager pour la réalisation d'un module de e-learning sur la pollution de l'air extérieur et son impact sur la santé.

### La pollution de l'air extérieur : un problème de santé publique

La pollution de l'air est un problème de santé publique au niveau mondial. Les derniers chiffres de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) font part de plus de 7 millions de décès prématurés par an dans le monde dus à la pollution de l'air. De plus, une récente étude parue dans l'European Heart Journal <sup>2</sup> a montré que le nombre de décès dus à la pollution de l'air était deux fois supérieur aux estimations de l'OMS. A l'échelle Européenne, plus de 40% de ces décès sont d'origine cardio vasculaire (cardiopathies ischémiques et accidents vasculaires cérébraux), ce qui représente 2 fois plus de décès que les décès d'origine respiratoire (Fig. 2) et Fig. 3). Les 790 000 décès dus à la pollution de l'air en Europe représentent plus de décès que ceux liés au tabac. L'étude montre également une espérance de vie diminuée de 2 ans en Europe et donc en Belgique.

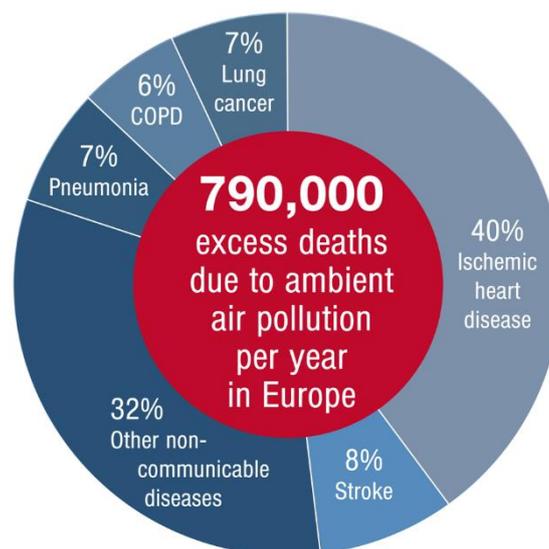
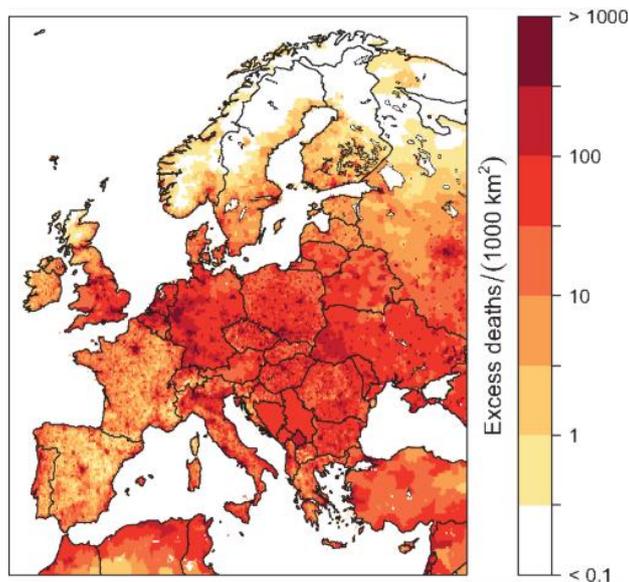


Figure 2. Excès de mortalité estimée attribué à la pollution de l'air en Europe et aux catégories de maladies associées.



*Figure 3. Répartition régionale des taux estimés de surmortalité annuelle due aux maladies attribuées à la pollution atmosphérique. Ces taux sont des limites inférieures car les autres maladies non transmissibles ne sont pas incluses.*

En termes de DALYS (Un DALY (Disability-Adjusted Life Year) peut être considéré comme une année de vie saine perdue<sup>3</sup>), la pollution de l'air apparaît comme le quatrième facteur de risque le plus important avec des composantes cardiovasculaires et respiratoires importantes<sup>4</sup>. Il a également été observé que le pourcentage de DALY's imputable à la pollution de l'air par les particules fines en termes cardio-vasculaires est supérieur à la glycémie élevée ou au taux de cholestérol sanguin élevé<sup>5</sup>.

L'impact économique est évidemment, très important, en termes de dépenses en santé et coûts associés. L'étude européenne APHEKOM a démontré que si les villes européennes respectaient le seuil d'émission d'ozone (O3) et de particules fines (PM2,5) recommandé par l'Organisation Mondiale de la Santé, cela représenterait une économie de 31 milliards d'euros par an rien que pour la France<sup>6</sup>. Au niveau Européen, la pollution de l'air coûterait 1.46 milliards d'euros par an et pour la Belgique, 18 millions d'euros par an soit 4.6 % du PIB<sup>7</sup>. Ce qui fait de celle-ci le plus gros risque sanitaire posé par l'environnement. 90% des citoyens européens sont exposés à des niveaux de concentration de particules fines supérieurs aux normes recommandées par l'OMS.

Vu cet impact énorme, ce sujet me paraissait être un bon sujet de TFE d'autant plus que nous nous trouvions dans un contexte d'actualité très riche pour tout ce qui concerne les questions environnementales.

## La pollution de l'air : un sujet d'actualité

Au début de mon travail de fin d'étude eut lieu le Sommet International sur le Climat, la COP 23 à Bonn en Allemagne dont l'objectif était d'inciter les états à lutter contre le réchauffement climatique. Même s'il ne faut pas confondre la pollution de l'air extérieur et le réchauffement climatique, les deux phénomènes sont intimement liés. Les gaz à l'origine du réchauffement climatique sont issus de la pollution de l'air (Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), gaz fluorés (PFC, SF<sub>6</sub>, HFC), protoxydes d'azote(N<sub>2</sub>O), méthane (CH<sub>4</sub>)). Le plus important étant le CO<sub>2</sub>.

Un an plus tard environ, en octobre 2018, le GIEC<sup>8</sup> publiait son dernier rapport. Ce rapport a clairement mis en évidence les preuves scientifiques (plus de 300000 articles scientifiques) de l'impact de l'homme sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) et le réchauffement climatique qui en découle. Il démontre bien que les conséquences d'une persistance de ces hausses de GES seront dévastatrices tant pour les systèmes humains mais également les systèmes naturels. Les éléments écosystémiques et économiques sont très sensibles au climat. Ce rapport, qui a été rédigé afin de permettre aux politiques de faire face à ce changement climatique, demande à ceux-ci de limiter le réchauffement à 1.5°C et de réduire les émissions de GES de 40% d'ici à 2030. Malgré cela, les politiques n'ont pas encore pris des mesures préconisées dans le rapport. Bien qu'en Belgique et malgré de nombreuses marches citoyennes contre le réchauffement climatique, le projet de loi Climat a été rejetée par le gouvernement. Dans le monde entier, des citoyens et, fait tout à fait nouveau, des enfants et des adolescents, ont décidé de manifester dans les villes pour demander aux gouvernements de prendre des mesures concrètes.

### *Contexte actuel en Belgique :*

C'est dans ce contexte de prise de conscience écologique, précédant le rapport du GIEC, qu'en Belgique plusieurs études ont été effectuées pour évaluer l'importance mais aussi l'impact de la pollution de l'air sur la santé. L'étude de Greenpeace, réalisée dans 222 écoles réparties sur toute la Belgique et appelée « Mon air mon école »<sup>9</sup> s'est penchée sur l'exposition des enfants au NO<sub>2</sub> dans et autour de leur école pendant quatre semaines. Les conclusions de cette étude montraient que dans plus de 60% des cas la qualité de l'air à l'entrée de l'école était préoccupante à carrément mauvaise dû au fait de la proximité de la circulation routière et par conséquent des gaz d'échappement. Les véhicules diesels sont les grands coupables car ils émettent beaucoup de NO<sub>2</sub>. On retient aussi l'importance des rues environnantes des écoles,

l'air respiré par les enfants dans les classes est fortement influencé par la qualité de l'air dans les rues autour et devant l'école.

Suite à la diffusion des résultats de cette étude, une chaîne de télévision néerlandophone, la VRT, a réalisé un reportage (PANO) sur les écoles investiguées et a également mis en avant une étude de l'Université de Hasselt et de la KULeuven<sup>10</sup> qui a pu quantifier les particules ultrafines dans les urines des enfants. Celles-ci seraient deux fois plus importantes chez les enfants vivant dans les villes que ceux vivant dans les zones rurales.

Ces résultats et ce reportage ont éveillé les consciences de nombreux parents, y compris moi, surtout à Anvers et à Bruxelles. Ceux-ci ont bloqué les rues devant les écoles de leurs enfants dès le lendemain de la diffusion de l'émission, afin de demander des mesures concrètes pour limiter le trafic automobile autour des écoles. Un mouvement citoyen de grande ampleur nommé « Filter-Café-filtré » est né. Aujourd'hui, il regroupe plus d'une centaine d'écoles en Belgique. En prenant de l'ampleur le mouvement a précisé ses revendications, pour une réglementation plus stricte de la concentration de NO<sub>2</sub>, la limitation des véhicules moteurs autour des écoles, la promotion des moyens de transport non polluants, l'amélioration et l'augmentation des services de transport en commun, plus d'espaces verts, l'amélioration de la sécurité des piétons et cyclistes, une généralisation et une extension des mesures de la qualité de l'air, des campagnes de sensibilisation sur la qualité de l'air.

A l'initiative de l'Université d'Anvers, de la KUL et du journal néerlandophone « de Standaard » était conduite la plus vaste enquête mondiale sur la qualité de l'air : « curieuze neuzen »<sup>11</sup>. 20000 citoyens flamands étaient invités à participer à ce projet de « citizen science » (science citoyenne) en mesurant la qualité de l'air à l'aide d'un tube (mesurant la concentration de NO<sub>2</sub>) fixé à leur domicile. Les résultats mettent l'accent sur la grande variabilité de la qualité de l'air et sur l'influence de l'effet des rues canyons et de la proximité des grands axes. Les zones rurales ne sont pas aussi épargnées qu'on le pensait. 60% des mesures étaient au-dessus des normes fixées par l'OMS (20µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>).

En parallèle, des organisations de développement durable, d'autres universités, d'autres mouvements citoyens (Clean Air BXL, Bruxsel'air, Bruxelles air propre, Luchtpijp, le BRAL...) voyaient le jour et devenaient de plus en plus actifs. En tant que citoyenne, je participais activement à différentes actions mais je me posais aussi la question de mon rôle en tant que médecin généraliste.

### **Lien avec la pratique en médecine générale :**

J'avais donc la confirmation que la pollution de l'air est une question de santé publique et une question d'actualité qui inquiète beaucoup de citoyens belges et européens, bien que l'information sur ces conséquences sanitaires ne soit pas diffusée par les autorités.

Dans la pratique quotidienne, nous sommes de plus en plus confrontés aux questions des patients sur les conséquences de la pollution de l'air, surtout en ce qui concerne les maladies pulmonaires (asthme, infections, etc.) et les allergies. Mais lorsque j'ai commencé à faire mes recherches dans la littérature scientifique je me suis aperçue que la pollution de l'air avait un impact qui allait bien au-delà des maladies respiratoires et allergiques et touchait en réalité tous les organes du corps (voir e-learning).

Il s'agit donc d'un sujet très vaste qui relie des questions de société à des questions de santé et qui touche nos patients au quotidien. En tant que médecins généralistes nous avons l'obligation d'être informés sur ces problèmes de santé et d'informer nos patients sur ces risques encourus. On constate, hélas, que les médecins généralistes, et à plus large échelle les professionnels de la santé, ne sont ni suffisamment formés, ni sensibilisés à la médecine environnementale durant leur formation alors que leur intérêt est grandissant<sup>12</sup>. Pourtant, l'OMS a élaboré une grande campagne de sensibilisation aux impacts de la qualité de l'air (Breathlife<sup>13</sup>) et l'Union Européenne dans le cadre du programme SCALE (Sciences, Children, Awareness-raising, Legislation, Evaluation) a mis en place un plan d'action santé-environnement. Dans la foulée, la Belgique a mis en place un plan national Environnement- Santé, baptisé NEHAP (National Health and Environmental Action Plan)<sup>14</sup> qui, entre autres points, soutient le développement de cours et de formations sur les relations entre l'environnement et la santé. Ce projet vise à élaborer et à mettre en place une formation en médecine environnementale pour les médecins généralistes dans leur cursus de base, ainsi que pour les autres professionnels de la santé. Mais également d'assurer la formation continue des professionnels de la santé, notamment au travers de e-learning développés par des experts et des médecins. Ces e-learning concernent la pollution de l'air extérieur mais aussi 13 autres champs de la médecine environnementale : La pollution intérieure, les perturbateurs endocriniens, la pollution au radon, les ondes électromagnétiques, les moisissures, les métaux lourds, les pesticides, le changement climatique, les textiles, les bruits, les produits de consommation, ...

### **Utilité d'un travail dans ce contexte :**

En m'engageant à réaliser un e-learning sur la pollution de l'air destiné aux professionnels de la santé, j'avais la volonté de fournir une source d'apprentissage sur un sujet.

Le e-learning n'est pas l'objectif de ce TFE même si je vous conseille de le suivre avant de lire ce présent travail, vous trouverez le lien en annexe.

### **Objectifs du TFE :**

L'objectif de ce TFE est donc de fournir un outil de base permettant aux confrères de comprendre rapidement ce qu'est la pollution de l'air, quels sont les polluants de l'air, quelles sont leurs origines et leur impact sur la santé. Par ce TFE, j'aimerais aussi alerter les médecins sur l'ampleur et l'importance de ce problème afin de mieux se positionner par rapport à ces questions d'actualité.

L'objectif est également de fournir des clefs afin de répondre aux nombreuses questions des patients surtout les plus vulnérables.

### **METHODE**

Pour répondre à ces objectifs j'ai choisi la méthode de la pédagogie médicale/ Assurance qualité en tentant de fournir une aide de compréhension aux confrères et consœurs à travers l'élaboration d'un e-learning d'environ 1h30 sur la pollution de l'air extérieur et ses impacts sur la santé. L'élaboration du e-learning n'était qu'un jalon de cette aventure. Ce qui m'a permis d'élaborer ce travail, ce sont aussi les exercices de vulgarisation de l'information pour les patients, les collègues mais aussi parfois les hommes et femmes politiques.

Les congrès scientifiques et les rencontres scientifiques ainsi que les discussions avec les acteurs de terrain m'ont permis d'enrichir mes connaissances afin de mieux les communiquer.

### **Recherche dans la littérature**

Les premières recherches que j'ai effectuées étaient destinées à réaliser des présentations visuelles pour les patients de la maison médicale mais aussi pour les parents de différentes écoles à Bruxelles. Il s'agissait de faire des présentations de vulgarisation afin de faire comprendre rapidement ce qu'est la pollution de l'air et pourquoi elle est néfaste pour la santé. Les premières recherches étaient axées sur la description des polluants et sur leur impact sur la santé.

J'ai effectué quelques recherches sur PubMed avec les mots clé : « *air pollution* » ; « *particulate matter* » ; « *nitrogen dioxide* » ; « *health impact air pollution* » en tentant de ne sélectionner que les articles des 10 dernières années mais les résultats étaient pharaoniques et très difficiles à filtrer.

Pendant les présentations aux patients et aux citoyens de Molenbeek j'ai pu rencontrer les membres du BRAL<sup>15</sup>, un mouvement urbain qui se bat pour un Bruxelles durable. En collaboration avec un étudiant de la VUB ils ont élaboré une première bibliographie « qualité de l'air savoir pour agir » qui aborde les polluants de l'environnement, les effets sur la santé mais aussi la gouvernance en matière de qualité de l'air. J'ai parcouru cette bibliographie qui axait les problèmes de toxicologie, d'épidémiologie et les effets cliniques. Cette bibliographie était une très bonne base mais elle avait été élaborée par un géographe et non un professionnel de la santé. En partant des axes déjà abordés je décidai de la compléter avec mon point de vue médical en optant plus pour un abord « effets cliniques ». J'ai ainsi pu refaire une bibliographie de 40 articles scientifiques abordant les effets respiratoires, cardiovasculaires, hormonaux, génétiques, reproducteurs, carcinogènes, ...

En faisant mes recherches j'ai également découvert le projet APHEKOM<sup>16</sup>, projet européen qui a regroupé plus de 60 scientifiques européens afin de produire de nouvelles connaissances et des outils pour les décideurs politiques, les professionnels de la santé et les citoyens. Cette étude m'a permis d'accéder à de nombreux articles fiables.

J'ai également découvert qu'un médecin généraliste de Strasbourg, le Dr Sophie RABOURDIN avait conçu une bande dessinée « *la pollution de l'air en clair* »<sup>17</sup> destinée aux patients afin de leur expliquer exactement la même chose que ce que je tentais d'expliquer au miens ! Cette bande dessinée m'a permis d'avancer dans mes recherches sur l'effet microscopique des polluants de l'air et d'orienter mes recherches PubMed sur le stress oxydatif induit par les polluants de l'air en contact avec les cellules.

Ensuite, pour construire le contexte de mon travail, j'ai utilisé les ressources de l'OMS et de la communauté européenne ainsi que les ressources belges : Bruxelles Environnement avait déjà réalisé de nombreuses études et publications et a été une source d'information fiable tout comme la cellule irCELine (Cellule Interrégionale de l'Environnement) qui regorge d'informations sur la qualité de l'air.

En ce qui concerne la médecine générale, j'ai trouvé un article du Dr PAULUIS<sup>12</sup> sur le site de la Fédération des Maisons Médicales, deux références dans la revue de médecine générale<sup>18</sup> ainsi que deux articles dans la revue médicale suisse.

Afin de réaliser le e-learning j'ai procédé à l'analyse de ces bibliographies et je les ai complétées après avoir pris contact avec le SPF Santé dans le cadre de la préparation de l'élaboration des modules de e-learning. L'expert préconisé pour la qualité de l'air en Belgique est le Professeur Benoit NEMERY de la KUL. Il a réalisé un power point dans lequel j'ai trouvé de nouvelles références. J'ai analysé ces articles et j'ai reformulé leur présentation afin de les rendre plus accessibles au public novice.

Enfin j'ai effectué des recherches sur les événements historiques de pics de pollution importants et les articles scientifiques qui y sont liés (voir e-learning).

Pour terminer le travail d'élaboration du e-learning j'ai fait un travail de recherche de littérature sur les externalités négatives de la pollution de l'air. Le Journal le Lancet a lancé une grande campagne « *The Lancet Commission on pollution and health* » qui venait compléter le travail de réflexion sur les impacts santé, économiques et sociaux de la pollution de l'air.

### **Rencontres scientifiques**

J'ai également participé à un congrès organisé par le professeur NEMERY à la KUL où j'ai pu rencontrer et écouter les exposés d'experts sur les sujets suivants : Modélisation de la pollution de l'air, les effets de la pollution de l'air sur les enfants, les effets neurologiques de la pollution de l'air. Cette conférence m'a permis d'élargir ma bibliographie.

Au travers de mon implication personnelle, en tant que maman et médecin, j'ai participé au projet Air Casting Brussels<sup>19</sup>, en collaboration avec la VUB. Cela consistait à mesurer la qualité de l'air au moyen de « air beam », des capteurs de particules fines (PM2.5 et PM10) de manière mobile autour des écoles mais aussi partout dans la ville de Bruxelles. Cela a donné lieu à une publication scientifique<sup>20</sup>, grâce à la science citoyenne.

Mon implication dans les projets de science citoyenne m'a permis d'être invitée à participer à un réseau informel de scientifiques sur « la qualité de l'air et les citoyens », ce réseau rassemble des chercheurs de différentes universités belges (surtout néerlandophones) qui étudient la pollution de l'air dans des perspectives diverses : les sciences de l'environnement, la santé, la gouvernance urbaine, le droit, la mobilité.

Ces réunions nous permettent de partager nos connaissances, nos travaux, nos résultats, de créer des possibilités de collaboration et de contribuer aux débats sur la pollution de l'air.

## Elaboration du e-learning

L'élaboration du e-learning s'est faite sous la supervision du Dr PAULUIS et de Marie-Christine DEWOLF responsable de *Hainaut Vigilance Sanitaire* et en charge des modules de e-learning pour le SPF santé. Plusieurs réunions ont eu lieu afin de scénariser le e-learning. Celui-ci se devait d'être interactif et la structuration du module devait être effectuée avec des méthodes de « mind mapping », ce qui n'a pas été très évident.

J'ai aussi travaillé avec les infographistes afin de rendre le module interactif.

## LA POLLUTION DE L'AIR : AIDE À LA CONSULTATION

Les résultats de toutes mes recherches se trouvent dans le e-learning que vous pouvez consulter sur la plateforme du SPF santé et qui, je l'espère vous sera utile.

Je vais tenter de résumer les informations de manière concise afin de fournir un outil de travail **efficace et rapide** au médecin généraliste pour :

- Comprendre ce qu'est la pollution de l'air
- Connaître les principaux mécanismes biologiques des polluants sur les organes
- Connaître l'impact des polluants sur les différents systèmes du corps humain
- Reconnaître les personnes à risque et les conseiller pendant les pics de pollution
- Répondre aux questions des patients, plus particulièrement en ce qui concerne l'exercice physique

## Les polluants et leurs sources

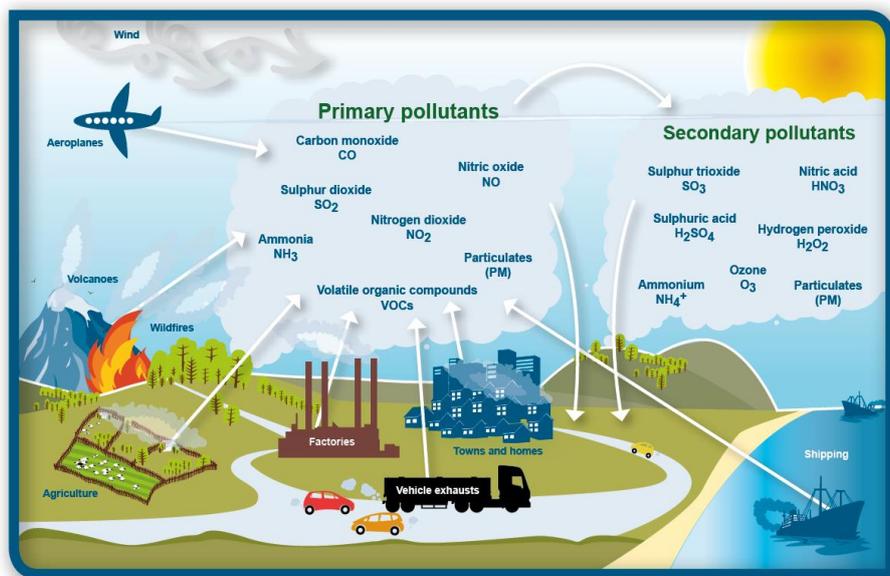


Figure 4. Les polluants primaires et secondaires et leurs sources

Les sources des polluants de l'air sont multiples (Fig4). Les polluants primaires sont directement émis par les sources et les polluants secondaires sont des polluants formés par l'interaction/agrégation des polluants primaires.

### *Les particules fines*

Les particules primaires sont classées par taille et appelées PM pour "particle matter" ou communément appelées particules fines. Les PM 10 ont un diamètre <10 µm et les PM 2,5 ont un diamètre <2,5 µm. Elles sont donc facilement inhalées (Fig 5).

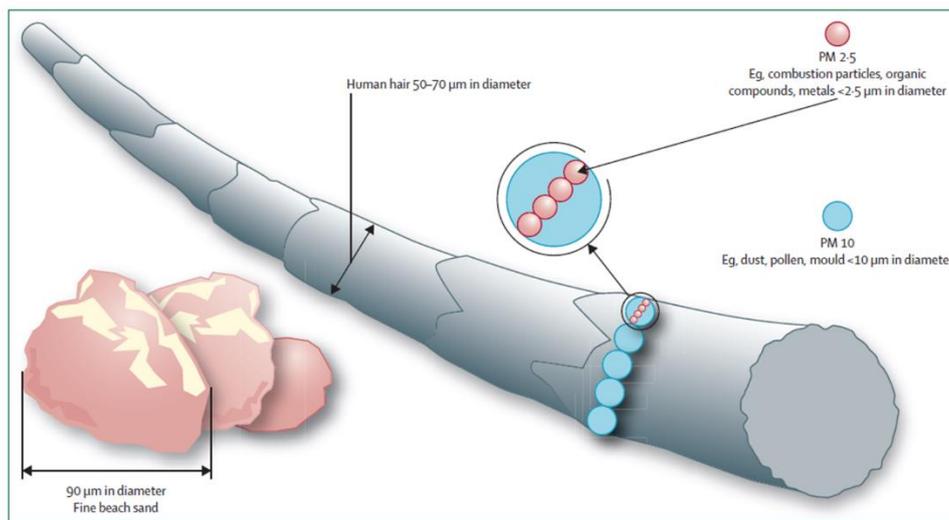


Figure 3: Particulate matter size  
Image modified with permission from the US Environmental Protection Agency. PM=particulate matter.

*Figure 5. Cette image vous donne idée de la taille des particules fines. Le diamètre d'un cheveu humain est de environ 60µm.*

*Cela explique que ces particules sont très facilement inhalées dans le système respiratoire humain.*

Les particules fines sont d'origines diverses et peuvent former des agrégats dont la structure adhère beaucoup plus et plus longtemps au tissu pulmonaire (Fig. 6). La plupart des particules sont dérivées des suspensions ou re-suspensions de poussières provenant des sols, des routes, des véhicules, fermes, mines, tempêtes ou volcans. En ville les principales sources de particules fines sont le trafic routiers (38% à Bruxelles) et la combustion résidentielle (50% à Bruxelles). Ces particules incluent également les sels de mer, pollens, moisissures, spores ou autres matériaux biologiques.

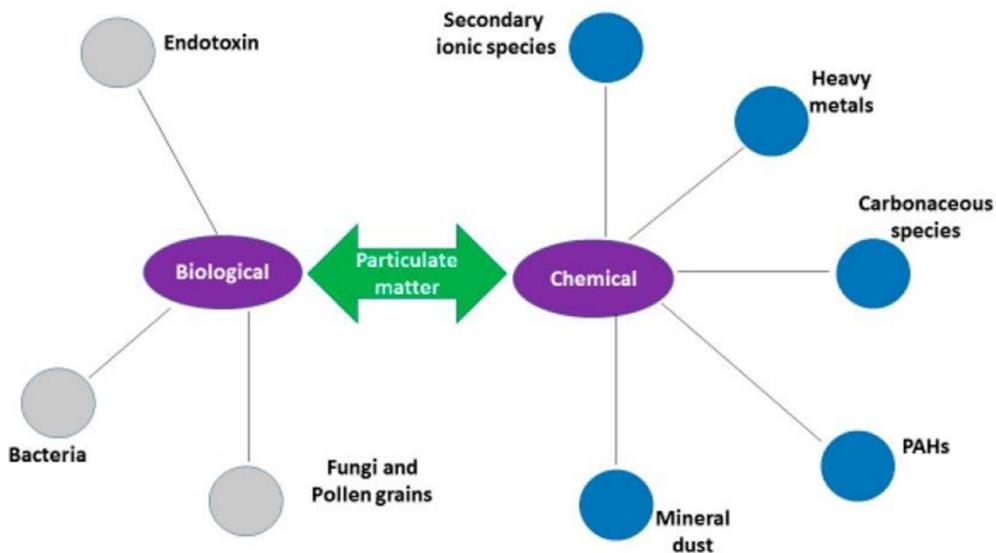


Figure 6. Cette image vous donne une idée de la complexité des agrégats particulaires et de leurs composants.

### *Les oxydes d'azote*

C'est une famille de gaz qui inclut le NO et le NO<sub>2</sub>. Le voile brun que l'on voit au-dessus des villes est essentiellement composé de ces gaz. Les principaux émetteurs sont les transports routiers, surtout les moteurs diesels. Ce sont eux qui sont au cœur du scandale DIESELGATE. Les NO<sub>x</sub> sont principalement émis par la combustion à haute température. Le trafic routier est une source dominante de NO<sub>x</sub>. En plus de leurs effets sur la santé, les composés soufrés et azotés émis dans l'air sont potentiellement acidifiants et peuvent nuire aux écosystèmes terrestres ou aquatiques sensibles.

### *Le dioxyde de soufre*

Le SO<sub>2</sub> est un gaz incolore qui est produit par réaction chimique ou thermique entre des composants soufrés (charbon, pétrole) et de l'oxygène. Il trouve son origine essentiellement dans la production industrielle.

Depuis les années 70 les émissions ont fortement diminué en raison de l'amélioration des carburants et de la diminution de la pollution industrielle (Fig7). Il est donc la preuve qu'il est possible de diminuer les émissions de polluants de l'air s'il y a une volonté politique.

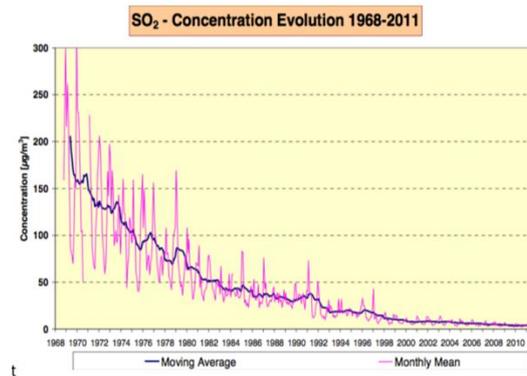


Figure 7. Le bon exemple. Diminution des émissions de SO<sub>2</sub> depuis les années 60

### L'ammoniac

Le NH<sub>3</sub> ou ammoniac est un gaz incolore ayant une odeur forte et qui est principalement émis par l'industrie Agricole. C'est un composé chimique émis par les déjections des animaux et les engrais azotés utilisés pour la fertilisation des cultures. Il peut se recombinaison dans l'atmosphère avec des oxydes d'azote et de soufre pour former des particules fines (PM<sub>2,5</sub>) et contribue ainsi aux pics de particules fines au début du printemps, période d'épandage de fertilisants et d'effluents d'élevage (Fig. 8).

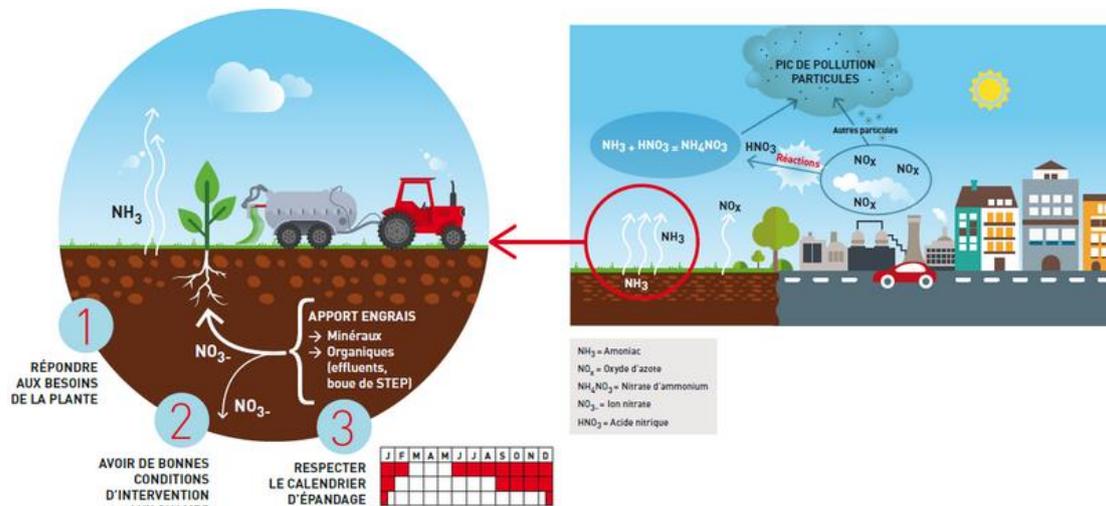


Figure 8. Les pics de pollution sont influencés par les émissions de NH<sub>3</sub> d'origine agricole

### L'ozone

L'ozone est un gaz incolore et inodore composé de trois atomes d'oxygène. Il est présent à la fois dans la haute atmosphère terrestre (stratosphère) et au niveau du sol (troposphère).

Dans la stratosphère, l'ozone protège la surface de la Terre des rayons ultraviolets du rayonnement solaire. L'ozone troposphérique constitue un problème de santé. L'ozone au niveau du sol est créé en présence de la lumière du soleil par une réaction chimique complexe

entre les NOx et les VOCS. Dans un environnement saturé en NOx, la concentration en ozone diminue avec l'augmentation des émissions de NOx.

Ainsi, au voisinage de fortes sources d'émission de NOx, l'ozone a tendance à être « épuré ». C'est un paradoxe : les concentrations d'ozone sont souvent plus faibles dans les centres urbains, en particulier le long des grands axes de circulation, et plus élevés dans les zones suburbaines et rurales.

## **Ce qui influence la qualité de l'air**

### *Les facteurs météorologiques*

Il y a une corrélation significative entre les concentrations de PM<sub>2,5</sub> et de PM<sub>10</sub><sup>21</sup> et la vitesse du vent, la température et l'humidité relative. La haute vitesse du vent et la température élevée diminuent les concentrations de particules fines car, à mesure que la température et la vitesse du vent augmentent, la capacité de diffusion augmente également. L'humidité relative augmente les concentrations de particules fines.

D'autre part les pluies intenses peuvent lessiver l'atmosphère en rabattant les polluants au sol.

### *L'inversion thermique*

En règle générale, la température en haute altitude est plus froide. Le phénomène inverse se produit en condition d'inversion de température ou inversion thermique (Fig. 9) : la température à quelques centaines de mètres d'altitude est supérieure à celle mesurée au niveau du sol. Les polluants, qui se dispersent vers le haut en situation normale, se trouvent alors bloqués sous une "couche d'inversion" qui joue le rôle de couvercle thermique. Si, au même moment, il y a peu de vent, la dispersion horizontale est également limitée. Les polluants et les particules émis s'accumulent dans un volume d'air restreint, ce qui entraîne une augmentation rapide des concentrations.

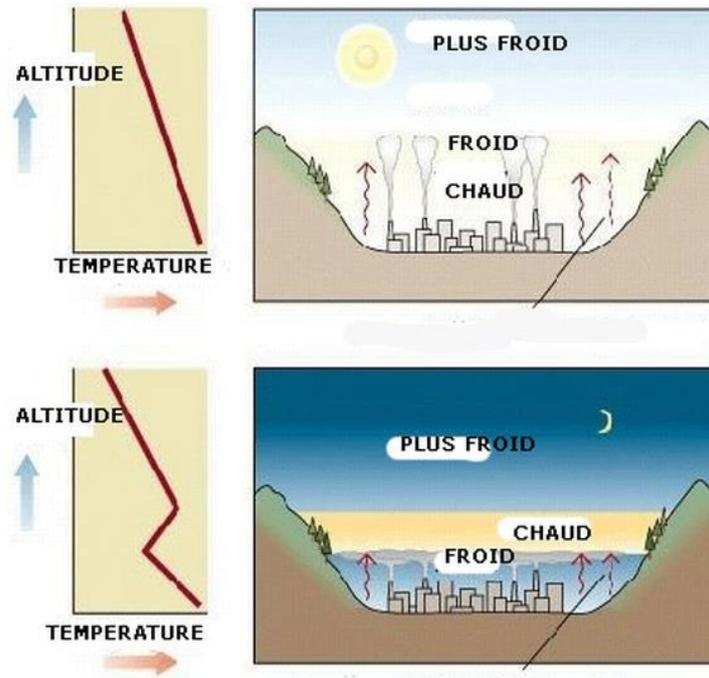


Figure 9. L'inversion thermique

### *L'activité agricole*

À la suite de l'épandage à grande échelle de lisier sur les champs dans les régions rurales il peut y avoir un pic de pollution. Des particules émanant de l'agriculture peuvent donc de façon significative influencer les concentrations dans une région urbaine.

### *Les transports routiers*

Même lors des journées sans voiture, la concentration en polluants de l'air reste élevée de manière constante. En réalité, une très grande partie de la pollution aux particules fines est attribuée aux transports de longues distances. C'est la pollution de fond, auxquelles viennent s'ajouter des contributions régionales et locales. Dans les zones industrielles ou les grandes agglomérations la contribution locale est beaucoup plus importante. Les dépassements journaliers sont cependant attribués aux émissions locales.

### *Les rues Canyon*

Aux abords des axes routiers, en zones urbaines, la topographie urbaine et le microclimat induit peuvent contribuer à des conditions de moindre dispersion de l'air et conséquemment à une exposition accrue. Des niveaux de pollution accrue ont été observés dans les rues canyons, terme qui correspond aux rues bordées de bâtiments des deux côtés (Fig. 10).

Dans ces rues, les piétons, les cyclistes, les conducteurs et les résidents sont exposés à des concentrations de polluants plus élevées.

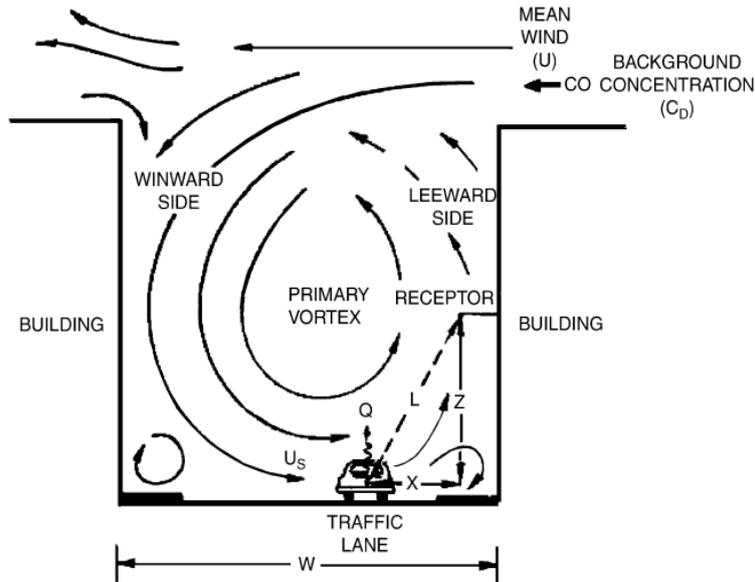


Fig. 1. Pollutant dispersion in a regular street canyon (Dabberdt et al., 1973).

Figure 10. Dispersion des polluants dans une rue canyon

### Les effets sur la santé

En fonction de leur taille, les polluants vont pénétrer dans l'arbre bronchique plus ou moins profondément (Fig. 11). L'arbre respiratoire est la porte d'entrée de ces polluants. Les effets bronchiques et pulmonaires sont logiquement très importants mais la pénétration des gaz et particules au niveau des alvéoles constituera la porte d'entrée au système sanguin et l'accès à tous les organes du corps.

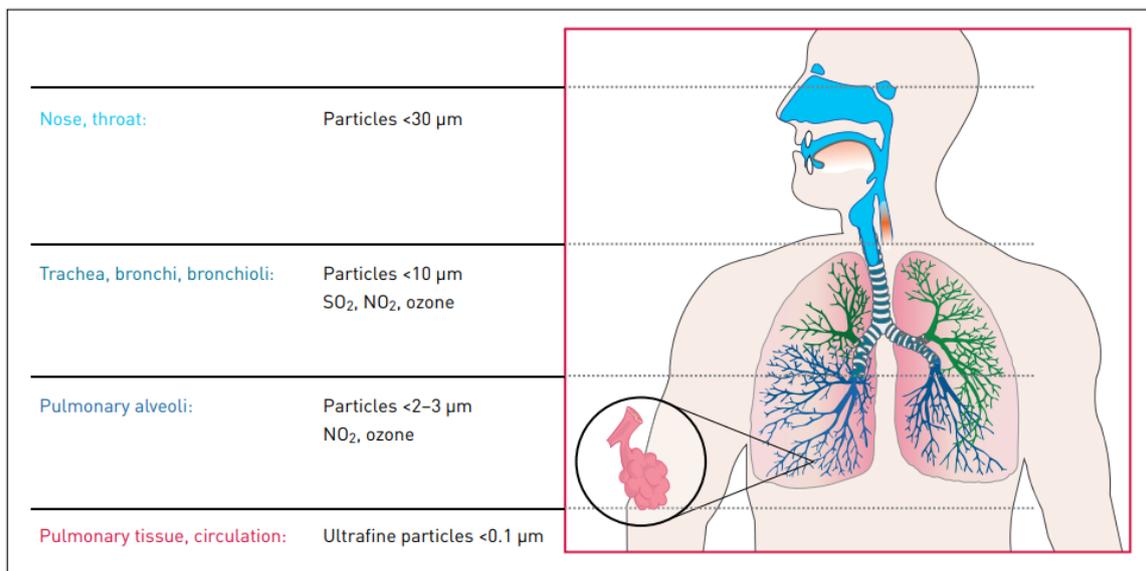


Figure A2.1. Penetration depth of pollutants in the respiratory tract

Figure 11. Pénétration des polluants dans l'arbre bronchique

Tous ces polluants ont des effets sur la santé, essentiellement bronchiques et pulmonaires (tableau 1) mais aussi sur d'autres systèmes et organes. La littérature sur le sujet est de plus en plus abondante. Nous détaillerons plus bas les effets, système par système.

Tableau 1. Les sources et effets des différents polluants

POLLUANT	ABRÉVIATION	SOURCE	EFFET SANTÉ
PARTICULES FINES	PM10, PM2,5	Produits par les processus d'érosion ou de combustion. Automobiles, transports routiers, industries, construction, combustion	↑Mortalité respiratoire chez les enfants ↓Fonction pulmonaire ↑Maladies cardio-vasculaires ↑Risque de cancer, mutations génétiques ↑Inflammation chronique des tissus y compris cerebral
OXYDES D'AZOTE	NOx, NO,NO2	Combustion à haute température. Automobiles, transport routier, combustion fossile.	Irritation bronchique ↓Fonction pulmonaire ↑Risque asthme ↑Risque de maladies neuro-degeneratives
OZONE	O3	Réaction entre les rayons de soleil et les composants NOx et VOCs	Irritation bronchique ↓Fonction pulmonaire ↑Risque asthme
DIOXYDE DE SULFURE	SO2	Industries, combustion de charbons et huiles	Pluies acides, maladies respiratoires
AMMONIAC	NH3	Agriculture	Toxique, contribue aux pics de PM
COMPOSÉS VOLATILES ORGANIQUES	VOCs	Vapeurs et solvants d'hydrocarbures	Voies respiratoires, allergènes, cancerigènes
MONOXYDE DE CARBONE	CO	Produit de la combustion incomplète de combustibles tels que le gaz naturel, le charbon ou le bois. Automobiles.	Séquelles neurologiques, céphalées, maladies pulmonaires

### La réaction macroscopique

Les grosses particules s'arrêtent au niveau des cavités nasales, grâce au poils nasaux. A long terme, l'irritation des voies respiratoires supérieures va donner lieu à une inflammation chronique avec une augmentation des sécrétions de mucus riches en cellules immunitaires. Cela se traduit à ce niveau par des rhinites chroniques, des conjonctivites, des sinusites.

Au niveau bronchique, cela se traduit par de la toux, l'inflammation des bronches et le développement progressif de pathologies chroniques telles que l'asthme, les bronchites chroniques ou même des cancers.

Le contact des bronches avec des corps étrangers donne lieu à une inflammation chronique répétée, responsable d'un remodelage des voies aériennes, et favorise la fibrose des tissus bronchiques.

## *La réaction microscopique*

### Niveau alvéolaire

Au niveau des alvéoles, les particules fines et ultrafines traversent la barrière alvéolaire et se retrouvent dans la circulation sanguine. Les études montrent que les particules ultrafines pénètrent plus facilement du poumon vers les vaisseaux sanguins et donc vers les autres organes du corps. On peut les retrouver dans les organes tels que le cerveau (pathologies neuro-dégénératives) ou dans le placenta des femmes enceintes (Malformations congénitales). La vulnérabilité de ces organes face aux particules fines favorise les conséquences cardiovasculaires, inflammatoires et génétiques.

### Niveau cellulaire

Au niveau cellulaire, les polluants ont un effet oxydant. L'équilibre oxydant/antioxydants est perturbé par l'apport extérieur de polluants. Le stress oxydatif correspond à un déséquilibre entre oxydants et antioxydants, se traduisant par la production de radicaux libres responsables d'altérations de la structure et des fonctions cellulaires : diminution de l'activité enzymatique, lésions cellulaires, mutation au niveau de l'ADN et modification des récepteurs, oxydation des lipoprotéines circulantes. Il peut être aggravé par certaines carences nutritionnelles ou lors de l'exercice physique, par le tabagisme, l'exposition aux radiations ionisantes et ultraviolets. Le stress oxydatif peut également être la cause initiale de la pathologie (cancer, BPCO, asthme) ou provoquer l'aggravation d'une maladie déjà existante.

À côté du stress oxydatif, des phénomènes dits épigénétiques peuvent modifier les gènes qui régulent les réponses immunologiques de l'inflammation allergénique.

L'activation des voies de signalisation intracellulaires peut déclencher la production de superoxyde et de peroxyde d'hydrogène par l'activation des oxydases liées à la membrane, et des dommages aux mitochondries peuvent entraîner la production de superoxyde.

La présence des particules fines augmente les cytokines pro-inflammatoires, généralement associées à diverses pathogénèses de maladies aiguës et chroniques. Elles augmentent diverses voies de signalisation telles que l'inflammation, le cancer, la régulation du cycle cellulaire et d'autres maladies, notamment le diabète de type II, la polyarthrite rhumatoïde, la maladie de Huntington, la sclérose latérale amyotrophique et le lupus érythémateux disséminé.<sup>22</sup>

## Le système cardio-vasculaire

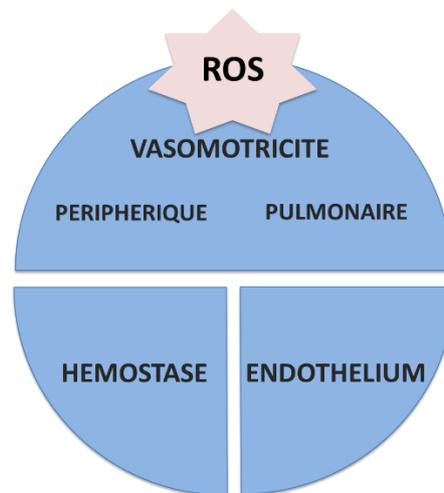


Figure 12. Les polluants : déclencheurs d'évènements cardiovasculaires

Cette illustration du Docteur Aurélien WAUTERS (auteur d'une thèse sur les effets cardiovasculaires des polluants, essentiellement particules fines et gaz diesels) représentant la triade de Virchow ou les éléments favorisant la thrombose vasculaire, illustre bien les trois axes d'impact des polluants au niveau cardiovasculaire : Action sur la vasomotricité périphérique et pulmonaire, notamment par le mécanisme d'oxydation cellulaire ; action sur l'hémostase et sur les vaisseaux artériels via l'endommagement de l'endothélium.

Ces études in vivo après exposition aux gaz diesels et particules fines montrent :

Vasomotricité :

- Une diminution de la perfusion artérielle périphérique
- Une vasoconstriction pulmonaire

Dysfonction endothéliale :

- Une diminution de la perfusion artérielle médiée par la production augmentée des superoxydes au niveau de l'endothélium.

Hémostase :

- Activation plaquettaire
- Dysfonctions plaquettaires

Cette étude reflète très bien ce qu'on retrouve dans la littérature en ce qui concerne les effets cardiovasculaires de la pollution de l'air.

- 34% des décès par **accident vasculaire cérébral** et 27 % des décès par **infarctus** sont liés à la pollution de l'air<sup>23</sup>.

- La pollution de l'air favorise les **maladies cérébro-vasculaires** et le risque de mortalité par maladies cérébro-vasculaires<sup>24</sup>.
- Elle favorise l'**insuffisance cardiaque chronique** et les pics de pollution favorisent les évènements aigus (STEMI)<sup>25</sup>.
- Elle favorise l'**athérosclérose**<sup>26</sup>.
- Ainsi que les **troubles du rythme** cardiaque<sup>26</sup>.

Comme évoqué dans l'introduction, en termes de DALYS, le risque lié à la pollution de l'air pour les maladies cardiovasculaires est plus élevé que le cholestérol élevé ou un BMI élevé.

Dans la pratique, il faudra être vigilants avec les patients ayant des antécédents cardiovasculaires. Par exemple en les interrogant sur leur lieu de vie, proche ou loin de grands axes routiers, salubrité des bâtiments, systèmes de chauffage. Mais aussi tenir compte des pics de pollution chez les patients très fragilisés, notamment les insuffisants cardiaques.

### **Le système respiratoire**

Les mécanismes impactant le système respiratoire sont multiples mais il en existe 4 principaux :

- Le stress oxydatif
- Le remodelage des voies aériennes
- Les mécanismes inflammatoires et leur réponse immunologique
- L'augmentation des sensibilisations aux allergènes

La pollution agit sur les gènes qui régulent ces quatre mécanismes<sup>27</sup>.

Il en résulte donc :

- Apparition ou exacerbation de l'asthme
- BPCO
- Bronchites
- Cancer du poumon
- Allergies

Une étude réalisée en Belgique a évalué le nombre de médicaments respiratoires prescrits et mis en parallèle avec la concentration de particules fines et de NOx. Dans cette étude une corrélation est établie entre le nombre de prescriptions de médicaments et les concentrations de polluants. Une augmentation des concentrations de polluants entraînerait une augmentation des prescriptions de médicaments respiratoires<sup>28</sup>. Par ailleurs, les enfants seraient plus impactés par les polluants gazeux NO2 et les adultes par les particules fines PM10. Les NO2 sont essentiellement issus du trafic automobile tandis que les PM10 sont issus du trafic

mais également des systèmes de chauffage. Dans la pratique, cela paraît compréhensible, vu qu'un adulte passe plus de temps dans le trafic routier et un enfant sera, par exemple, en période de froid, enfermé dans des bâtiments chauffés et mal ventilés.

### **Le système neurologique**

Le stress oxydatif, l'athérosclérose sont les mécanismes de l'effet neurologique de la pollution de l'air. Ils ont un impact tant sur le développement cérébral des enfants que sur la dégénérescence cérébrale des personnes âgées.

Dans la littérature on retrouve un lien entre la pollution de l'air et :

- une **diminution du QI**<sup>29</sup>
- une augmentation du trouble d'hyperactivité avec déficit de l'attention (**TDAH**)<sup>29</sup>
- Diminution de la capacité de **mémorisation**<sup>30</sup>
- La maladie d'**Alzheimer**<sup>31</sup>

Les effets neurologiques de la pollution de l'air font l'objet de nombreuses recherches émergentes. Les conclusions ne sont pas encore très claires. Les années à venir nous apporteront sans doute beaucoup de nouvelles informations sur les troubles comportementaux et cognitifs et leur lien avec les polluants de l'air. En Chine par exemple, la pollution de l'air est vraiment très importante et on a pu montrer un lien avec l'état dépressif<sup>32</sup>.

### **La reproduction**

Il a été démontré que les polluants tels que les particules fines et les gaz issus du diésel se retrouvent dans le **placenta**<sup>33</sup>. Cette exposition et le contact des polluants avec le placenta stimulent l'inflammation, la production de radicaux libres et influence le développement génétique et protéomique des cellules placentaires et embryonnaires, cela favorise, entre autre, un **faible poids de naissance**<sup>34</sup>.

Il a aussi été démontré que l'exposition accrue aux PM 2.5 pendant la période de péri-conception, 1 mois avant et 1 mois après, augmente le risque de **malformations congénitales**<sup>35</sup>. Une revue systématique publiée en 2019 confirme également le lien significatif entre la pollution de l'air et l'infertilité féminine ainsi que le **risque de fausses couches**<sup>36</sup>.

La qualité des spermatozoïdes est également affectée, avec une diminution du **nombre de spermatozoïdes de morphologie** normale mais une augmentation de la concentration, peut-être due à un phénomène de compensation<sup>37</sup>. Cela pourrait avoir un impact important au niveau de la fertilité d'une population entière.

## Le système endocrine

Le diabète.

Les mécanismes biologiques reliant la pollution de l'air au diabète ou plutôt à la résistance à l'insuline sont l'inflammation pulmonaire avec libération de cytokines pro-inflammatoires dans le système sanguin<sup>38</sup>; le stress au niveau du réticulum endoplasmique (voies de signalisation vers une augmentation de la résistance à l'insuline), l'altération du métabolisme du glucose (diminution de la phosphorylation de la tyrosine dans les cellules hépatiques) et des lipides (augmentation de la taille des adipocytes et effet pro-inflammatoire entraînant une résistance à l'insuline)<sup>38</sup> ainsi que l'activation du système nerveux central (inflammation de l'hypothalamus et perturbation de l'homéostasie du glucose)<sup>39</sup>.

La relation entre la concentration en PM2.5 et le risque de diabète étudié dans une cohorte de 1 729 108 participants sur une période de 8,5 ans (IQR 8,1-8,8)) a montré qu'une augmentation de 10 µg / m<sup>3</sup> était associée à un risque accru de diabète (HR 1,15, IC 95%: 1-8-1 · 22). Globalement, les PM2.5 amènent **3.2 millions nouveaux cas de diabètes** par an, ce qui représente 14 % des nouveaux cas ce qui signifie **1 cas sur 7**.

Les polluants de l'air agissent également comme des perturbateurs endocriniens, mais ceci fait l'objet d'un travail à part que vous pourrez retrouver dans un autre e-learning.

## Les personnes à risque

Comme nous l'avons vu plus haut, il existe une pollution de l'air de fond qui correspond à la pollution issue des transports internationaux mais aussi du transport par l'air de la pollution émise dans les pays voisins. Le risque lié à la pollution de l'air est donc constant mais pendant les pics de pollution il faudra être particulièrement vigilant avec les patients plus vulnérables :

Les personnes atteintes de maladies respiratoires :

- BPCO
- Bronchite chronique
- Asthme

Les personnes atteintes de maladies cardiovasculaires :

- Maladies des vaisseaux coronaires ou arythmies cardiaques
- Antécédants cardio-vasculaires (Infarctus et AVC)
- Patients hypertendus

Les femmes enceintes

Les personnes âgées

Et Surtout les enfants

- Agés de moins de 1 an
- Souffrant de pathologies respiratoires

Voici les recommandations lors des pics de pollution :

- Rester à l'intérieur et garder les fenêtres et portes fermées
- Ne pas fumer ni fréquenter les zones fumeurs
- Ne pas faire d'exercice physique intense ou prolongé
- Ne pas laisser les enfants à l'extérieur
- Consulter le médecin de famille pour une éventuelle adaptation des traitements respiratoires ou lors de l'apparition d'une aggravation de symptômes cardio-vasculaires ou respiratoires

### **La particularité des enfants**

Les organes des enfants sont immatures et en croissance et par conséquent plus vulnérables aux effets des polluants, ce qui fait que leurs tissus pulmonaires et bronchiques sont particulièrement sensibles. Il a été démontré que la pollution, même à faible dose, ralentit le développement pulmonaire. Le nombre de consultation en urgence pour crise d'asthme augmenterait de 15% lors des pics de pollution atmosphérique<sup>40</sup>.

De plus, les enfants inspirent des volumes d'air supérieurs en proportion de leur poids corporel. Je vais illustrer ici la vulnérabilité des enfants par une vignette clinique correspondant à des questions qui m'ont été posées à plusieurs reprises au cabinet.

#### *Vignette clinique*

Vous voyez en consultation, une maman et son jeune enfant de 3 ans, Thibault. Ils viennent de déménager dans un nouvel appartement au 3ième étage dans un immeuble qui donne sur les toits des autres habitations. Le logement est situé dans une rue parallèle à un grand axe routier, mais la rue est située en face d'un parc public. Depuis 3 mois, Thibault tousse plus souvent, surtout la nuit. Il a un petit frère qui a 1 an. La maman est fatiguée, les nuits sont difficiles. Elle se plaint de céphalées et de rhinite depuis quelques semaines. Il n'y a pas de contagé familial, pas de fièvre. Thibault avait déjà été diagnostiqué avec un asthme de l'enfant lorsqu'il avait 1 an mais depuis 2 ans il n'était plus symptomatique. Il n'y a pas d'antécédents particuliers dans la famille. Les parents ne fument pas.

A l'examen clinique :

Thibault est en excellent état général, il est souriant et collaborant, il jouait dans la salle d'attente.

ORL: Gorge légèrement érythémateuse, tympanes clairs, nez encombré.

Poumons : Leger wheezing bilatéral

Cœur: B1B2, pas de souffle

SaO2: 98%, Pas de fièvre.

En approfondissant l'anamnèse, vous apprenez que les voisins du dessous, âgés de 70 ans, se chauffent au bois toute la journée et toute la nuit. La cheminée sur leur toit donne sur la fenêtre de l'appartement de la patiente. Elle n'ose pas vraiment ouvrir ses fenêtres car elle sent tout de suite l'odeur de la fumée. Elle vous demande si cela pourrait être mauvais pour sa santé et celle de ses enfants.

Une toux qui dure depuis plus de 4 semaines chez l'enfant doit faire penser à une autre cause qu'une IVRS. Après avoir exclu les étiologies principales, l'on peut envisager d'autres causes dont l'asthme. Mais notons que la symptomatologie est réapparue il y a 3 mois, ce qui correspond au moment où la famille a emménagé dans le nouvel appartement. Il serait utile de savoir si le nouvel appartement et l'environnement de celui-ci jouent un rôle dans l'exacerbation asthmatique. De plus, la maman a également une rhinite chronique d'apparition récente.

Investiguer le contexte environnemental est utile.

Pensez-vous que la réapparition de cette symptomatologie pourrait être liée à ces éléments ?

- Fumée de cheminée donnant sur la terrasse ?

- Proximité d'un grand axe routier ?

Comme nous l'avons vu précédemment les fumées de cheminées et les systèmes de chauffage en général sont responsables en grande partie des émissions de particules fines : PM2,5, PM10 et particules ultrafines.

### L'exposition aux polluants et l'asthme chez l'enfant

Des études ont confirmé que des expositions élevées au dioxyde d'azote (marqueur de la pollution de l'air liée au trafic) et aux particules fines d'un diamètre aérodynamique compris entre 2,5 et 10 micromètres étaient associées à une augmentation du wheezing chez les enfants asthmatiques<sup>41</sup>.

### La proximité des grands axes routiers et la capacité respiratoire

D'autres études confirment une diminution de la fonction pulmonaire (FEV et CVF) observée sur une durée de 8 ans chez les enfants de 10 à 18 ans vivant près d'un grand axe routier comparé aux enfants vivants à distance d'un axe routier. Chez les enfants qui vivaient à moins de 500 m d'une autoroute, la croissance après 8 années a été significativement réduite par rapport aux enfants qui habitent à au moins 1500 m d'une autoroute<sup>42</sup>.

Ceci veut dire que l'exposition aux polluants pendant l'enfance, quand le tissu pulmonaire se forme, a un impact sur la fonction pulmonaire pour tout le reste de la vie du futur adulte.

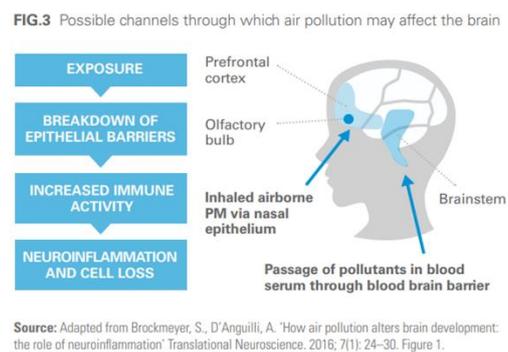
### La proximité des grands axes routiers et les capacités intellectuelles

La pollution de l'air impacte également les fonctions intellectuelles et motrices des enfants.

La pollution atmosphérique affecte le cerveau des enfants par plusieurs mécanismes. Tout d'abord, les particules peuvent causer un phénomène neuro-inflammatoire en endommageant la barrière hémato-encéphalique<sup>43</sup>(Fig13) .

Plusieurs études montrent également que les composés aromatiques polycycliques et hydrocarbures (HAP), formés par la combustion de combustibles fossiles contribuent à la perte de substance blanche dans le cerveau.

D'autres études ont trouvé des associations directes entre l'exposition à la pollution de l'air et les résultats cognitifs verbaux, non verbaux et le QI ainsi que des pathologies comportementales.



*Figure 13. Mécanisme par lequel les polluants affectent le cerveau*

Une étude réalisée dans des écoles primaires à Barcelone (39 écoles, 2715 enfants de 7 à 10 ans), montre l'effet de la pollution de l'air (NO<sub>2</sub>) sur le développement cognitif des enfants. La conclusion est que les enfants qui fréquentent des écoles où la pollution de l'air liée au trafic est plus élevée ont un moins bon développement cognitif, surtout en ce qui concerne le travail de mémorisation(Fig14)<sup>30</sup>.

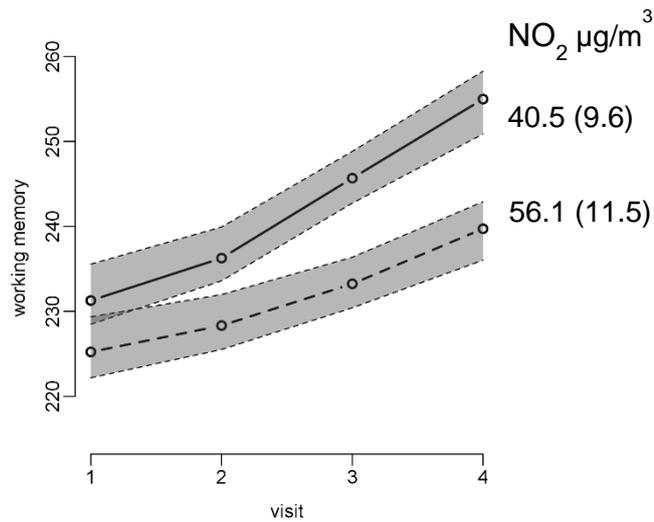


Figure 14. Développement de la mémoire de travail dans les écoles à fortes ou faible pollution atmosphérique.

### Conclusion de la vignette clinique

En conclusion, ce cas clinique nous apprend que :

- La pollution atmosphérique aggrave l’asthme et augmente le nombre de crises d’asthme.
- L’enfant est plus vulnérable que l’adulte face aux effets de la pollution de l’air.
- Le lieu d’habitation mais également de fréquentation scolaire ont un impact important sur la santé des enfants : il est conseillé de s’informer sur la proximité des axes routiers et sur le lieu de vie des patients (urbain, rural).
- Les traitements respiratoires doivent être adaptés pendant les pics de pollution.
- L’exposition chronique à la pollution atmosphérique diminue la fonction respiratoire à long terme et a un impact neurologique chez les enfants : la réduction de la pollution atmosphérique est une question de santé publique.

### La question du sport

#### *Est-il bon de faire du sport dans une ville polluée ?*

Des études sur l’effet du cyclisme et du jardinage sur les voies respiratoires dans les zones fortement polluées ont montré que la réduction de la mortalité l'emporte sur le risque associé à une exposition accrue à la pollution de l'air pendant l'activité physique<sup>44</sup>. Il faut donc encourager nos patients à maintenir une activité physique quel que soit leur âge.

Mais, il faut rester vigilant avec les personnes à risques (voir plus haut). Par exemple, cet effet bénéfique est annulé pour les personnes de plus de 60 ans selon une autre étude<sup>45</sup>.

Dans ce cas il faut toujours encourager l'exercice physique mais en dehors des lieux fortement pollués (salles bien ventilées) et des pics de pollution.

### Localisation

Eviter les rues canyons et les lieux à forte densité automobile, privilégier les zones vertes, si possible en périphérie des zones urbaines.

### Moment

Les heures de pointe sont des moments à plus haut risque. Il vaut mieux faire du sport en dehors de ces heures ou le week-end quand le trafic est moindre.

### Saison

En hiver, lorsqu'il fait très froid, le phénomène d'inversion favorise la stagnation des particules dans l'air que l'on respire. Il vaut mieux éviter de faire du sport pendant ces périodes ou privilégier les zones ouvertes ou intérieures bien ventilées.

En périodes de forte chaleur et temps sec, il y a moins de vent et donc moins de circulation d'air. Les concentrations d'ozone sont plus élevées en été et dans l'après-midi en raison du phénomène photochimique.

Si cela se combine à une forte densité automobile, le danger viendra des NOx, toxiques bronchiques et pulmonaires.

### Rythme

Plus le sport est intensif, plus les poumons ventilent, plus ils absorbent de polluants.

### *Qui sont les usagers les plus exposés à la pollution de l'air ?*

Les cyclistes, les automobilistes ou les piétons ?

Les cyclistes ont une ventilation par minute 2 fois plus importante que les usagers passifs. Il n'existe pas de masques qui protègent des microparticules. Mais l'avantage de faire du cyclisme est supérieur au risque de l'exposition. L'exercice physique protège contre les méfaits de la pollution en renforçant la capacité pulmonaire<sup>46</sup>.

L'exposition aux microparticules (black carbon) est plus élevée pour les automobilistes et les usagers du bus. Les concentrations sont deux fois moins élevées pour les piétons ou les cyclistes. Cependant, du fait de la ventilation plus élevée chez les usagers actifs, la dose de polluants inhalée par minute est plus importante (Fig. 15)<sup>47</sup>. Le temps de trajet influe également fortement et est plus court pour les cyclistes. Ce qui fait qu'au final, ce sont quand

même les cyclistes qui sont les moins exposés, puis les usagers de bus, ensuite les automobilistes puis les piétons. L'air est également très pollué dans les métros.

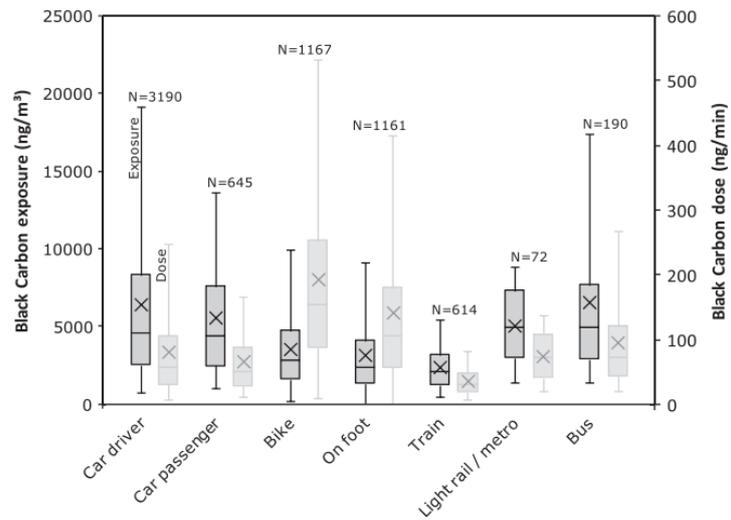


Figure 15. L'exposition personnelles et la dose inhalée dans les différents moyens de transport<sup>47</sup>

Cette liste des effets de la pollution de l'air sur la santé n'est, bien entendu, pas exhaustive mais reflète ce que l'on retrouve dans la littérature qui chaque semaine s'enrichit de nouveaux articles qui, généralement, confirment voire aggravent ces effets.

## « Take home » message

Pense-bête à l'usage des médecins généralistes

### *L'impact de la pollution atmosphérique sur les différents organes du corps*

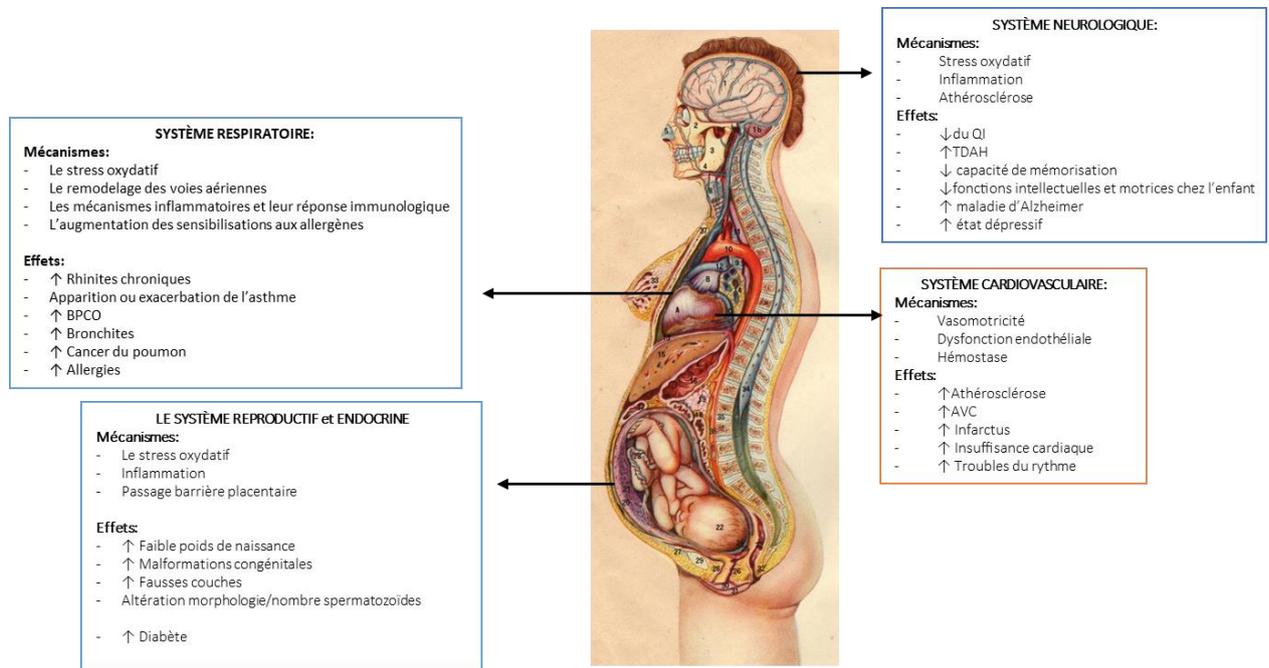


Figure 16. Les effets et mécanismes de la pollution atmosphériques sur les organes du corps

## Ce qui influence la qualité de l'air : géographie et saisons

Tableau 2. La pollution de l'air en fonction des saisons et de la géographie

SAISON	GÉOGRAPHIE	EFFET
HIVER	URBAIN	<p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>chauffage de maison</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>phénomène d'inversion thermique</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>phénomène de rues canyon</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due à la <b>proximité des grands axes routiers</b></p>
	RURAL	<p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>chauffage de maison</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>phénomène d'inversion thermique</b></p>
PRINTEMPS	URBAIN	<p>↑ des [PM] et [NH3] due aux <b>épandages.</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>phénomène de rues canyon</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due à la <b>proximité des grands axes routiers</b></p>
	RURAL	<p>↑ des [PM] et [NH3] due aux <b>épandages.</b></p>
ETE	URBAIN	<p><b>Photochimie</b> : augmentation des [O3] si chaleur/soleil(UV), hautes températures, peu de vent, [précurseurs] élevées.</p> <p><b>En fin de journée, destruction de l'O3 par les concentrations élevées de NOx</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due au <b>phénomène de rues canyon</b></p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due à la <b>proximité des grands axes routiers</b></p>
	RURAL	<p><b>Photochimie</b> : augmentation des [O3] si chaleur/soleil(UV), hautes températures, peu de vent, [précurseurs] élevées. <b>Pas de destruction O3 car [NOx] moins élevées.</b></p>
AUTOMNE	URBAIN	<p>(En fonction des facteurs météorologiques)</p> <p>La pluie et le vent « lessivent » l'atmosphère (toutes saisons)</p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due au phénomène de rues canyon</p> <p>↑ des [PM] et [Nox] due à la proximité des grands axes routiers</p>
	RURAL	<p>(En fonction des facteurs météorologiques)</p> <p>La pluie et le vent « lessivent » l'atmosphère (toutes saisons)</p>

## DISCUSSION

La littérature concernant les polluants de l'air et leur impact sur la santé est de plus en plus importante. Depuis 1999, année durant laquelle 9 études avaient été publiées, jusqu'en 2017, année durant laquelle 370 études étaient publiées<sup>48</sup>, l'évolution est linéairement croissante. Cela reflète l'importance de ce problème et son impact sur la santé humaine.

Et pourtant, il n'existe pas de formation en médecine environnementale pour les médecins alors que l'impact sur la santé est énorme.

Actuellement le FNRS a décidé de consacrer 20 millions d'euros à la recherche sur des solutions pratiques contre le changement climatique. Les questions d'environnement seront de plus en plus présentes dans toutes les sociétés. Quelle est la place des professionnels de la santé et des médecins généralistes plus particulièrement dans ces domaines ? N'y aurait-il pas la nécessité de stimuler l'enseignement sur les questions environnementales mais également la recherche clinique sur ces sujets d'importance grandissante. Pour cela il faudrait augmenter le nombre de formations et surtout commencer dès le début, dans les auditoires de médecine, auprès des infirmiers et des kinésithérapeutes.

En participant à l'élaboration de cet e-learning sur la qualité de l'air que respirent nos patients j'ai eu l'occasion de faire partie d'un projet neuf et de grande ampleur en médecine environnementale. J'ai pris conscience de l'importance du problème, de l'ampleur des impacts mais aussi du lien intime entre les problèmes de santé liés à l'environnement et nos modes vie ainsi que de l'inadéquation entre tout cela et les politiques actuelles.

Pendant ces deux années d'implication dans ma pratique j'ai pu effectuer beaucoup de recherches bibliographiques qui m'ont permis d'élaborer des outils de compréhension pour les patients, les collègues médecins, infirmiers, kinésithérapeutes mais aussi professeurs d'écoles, professeurs de gymnastique et même politiciens. Ensuite j'ai pu approfondir mes recherches afin de réaliser le module de e-learning destiné aux professionnels de la santé mais il était évidemment impossible d'être exhaustif. J'ai d'ailleurs été très étonnée de l'ampleur du problème. J'avoue même que cette ampleur m'a rendue désespérée par moment. Il serait facile de se dire que tout est perdu, que cette situation est sans issue et que, en tant que médecins généralistes nous ne pouvons rien y faire. Bien sûr, en quoi cela va-t-il nous aider de savoir que la pollution de l'air est néfaste pour le système respiratoire, pour le système cardiovasculaire ? Il n'y a pas de thérapie contre la pollution de l'air, il y en a contre les maladies induites par la pollution de l'air.

Pour lutter contre le diabète, on peut préconiser un régime alimentaire, contre l'hypertension on peut également préconiser des mesures préventives et hygiéno-diététique. Comment prévenir les maladies liées à la pollution de l'air ? On peut encourager les patients à arrêter de fumer mais pas à arrêter de respirer. Nous nous retrouvons bien démunis. Quel est notre rôle ? C'est là aussi la question que pose le présent travail ainsi que l'e-learning.

Pour ma part je me suis sentie investie d'une mission, dans mon quartier, ma commune, ma région. Cela m'a menée à participer à la création de groupes de patients à la maison médicale, à des groupes citoyens pour mesurer la qualité de l'air dans les communes de Molenbeek et de Saint-Josse. Des communes à grande mixité culturelle mais aussi pauvres. J'ai également appris que la pollution de l'air touche les personnes défavorisées plus que les personnes d'un statut social élevé. Bien que les populations pauvres ne vivent pas toujours dans des zones plus fortement polluées en Europe et que cela varie de pays en pays et de ville en ville. Les études qui ont été effectuées en Europe montrent que indépendamment du niveau d'exposition à l'air pollué, les pauvres sont plus affectés par la pollution de l'air<sup>49</sup>. Une étude effectuée à Paris a montré que les personnes vivant dans les quartiers défavorisés avaient 3 fois plus de risque de mourir à cause de la pollution de l'air<sup>50</sup>.

C'est pour toutes ces raisons qu'avec un groupe de médecins généralistes nous avons décidé d'agir pour sensibiliser la population et les acteurs politiques. Notamment par la rédaction d'une lettre des médecins généralistes au gouvernement bruxellois en collaboration avec l'organisation citoyenne CleanAir BXL, et qui fait suite à une lettre de 100 médecins déjà adressée en 2017, le but étant cette fois-ci de réunir 1000 médecins.

Je me suis également impliquée à l'école de mes enfants à Saint-Josse en mesurant la qualité de l'air avec les professeurs, les élèves et les parents. Nous avons par ce biais pu sensibiliser le bourgmestre de notre commune et avons même obtenu la première rue scolaire de Bruxelles. Cette rue scolaire, même si elle ne règle pas les problèmes de pollution de l'air, est un très bon signal symbolique qui a inspiré d'autres parents et communes partout dans la ville. Depuis plusieurs rues scolaires existent à Bruxelles.

J'ai également pu participer à un coaching citoyen en tant que médecin généraliste, destiné aux politiciens de tous les partis de la région bruxelloise afin d'élaborer leurs programmes électoraux (en matière de pollution de l'air et de mobilité) en meilleure connaissance de cause. Mon implication personnelle, en collaboration avec les associations et organisations actives dans ce domaine me permettra encore de participer à des conférences pour Bruxelles

Environnement concernant l'interdiction des véhicules diesels ET essence à Bruxelles. Lors du grand congrès « les états généraux de l'air », nous présenterons, avec le Dr PAULUIS, un atelier de formation destiné aux professionnels de la santé.

Tout cela m'a semblé faire partie de mon travail de médecin généraliste, car j'avais le sentiment que la sensibilisation et l'information étaient, à ce stade-ci de l'histoire, la meilleure manière de faire de la prévention. Cela pouvait peut-être, en toute modestie, avoir un impact sur les futures politiques en matière environnementale et donc sur la santé de nos patients.

Il existe d'ailleurs des exemples de médecins qui ont décidé de tenter d'agir sur les politiques environnementales dans d'autres pays.

En Angleterre, il existe un collectif de professionnels de la santé : « Doctors against Diesel » faisant campagne pour des politiques efficaces et coordonnées conduisant à une réduction progressive des principales sources de pollution. Cela inclut les zones de basses émissions, les restrictions de trafic aux abords des écoles et le renforcement de l'encouragement des voitures partagées, de la marche, du vélo et des transports en commun.

Plus globalement, « Inspire » : *Health Advocates for Clean Air* regroupe des professionnels de la santé dans le monde entier en leur donnant l'opportunité de plaider en faveur de politiques d'assainissement de l'air au nom des personnes qu'ils soignent. « Inspire » fournit à cette communauté mondiale un cadre et des outils pour faire progresser le programme de la qualité de l'air. Les cliniciens, les soignants et les scientifiques peuvent former des associations, partager des ressources, plaider en faveur de la compréhension du public et accroître la pression politique nécessaire pour faire avancer les politiques pour un air plus sain.

## CONCLUSION

La pollution de l'air est une question de santé publique car elle a un impact considérable sur la santé de nos patients, surtout les enfants et les personnes vulnérables. Cet impact ainsi que les coûts en santé qui en découlent justifient pleinement que les médecins généralistes soient mieux formés en médecine environnementale<sup>51</sup>. Ce travail a pour modeste ambition de fournir une aide à la compréhension de la problématique de la pollution de l'air mais aussi de fournir les outils pour la pratique quotidienne concernant les pathologie pulmonaires, cardiovasculaires, neurologiques et endocriniennes. Il pourra aussi vous aider à mieux identifier les personnes à risque et conseiller vos patients, de plus en plus demandeurs d'informations à ce sujet.

Il serait avantageux, économiquement et qualitativement de lutter contre la pollution de l'air mais pour cela les différents intervenants (professionnels de la santé, législateurs et acteurs politiques) devraient travailler ENSEMBLE.

Le médecin généraliste a aussi le devoir d'être informé et d'informer ses patients sur les risques encourus par l'exposition aux facteurs environnementaux.

Il a une place de choix, intermédiaire entre les citoyens -acteurs du changement- et les autorités compétentes, il peut agir en tant que lanceur d'alerte. Sa voix sera peut-être plus facilement écoutée par les autorités.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Whitehead M, Dahlgren G. What can be done about inequalities in health? *Lancet (London, England)*. 1991;338(8774):1059-1063. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1681366>. Accessed April 7, 2019.
2. Lelieveld J, Klingmüller K, Pozzer A, et al. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *Eur Heart J*. March 2019. doi:10.1093/eurheartj/ehz135
3. WHO | Metrics: Disability-Adjusted Life Year (DALY). WHO. 2014. [https://www.who.int/healthinfo/global\\_burden\\_disease/metrics\\_daly/en/](https://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/). Accessed April 7, 2019.
4. Mph B, Xie Mph Y, Li T, et al. *The 2016 Global and National Burden of Diabetes Mellitus Attributable to PM 2.5 Air Pollution*. Vol 2.; 2017. doi:10.1016/S2542-5196(18)30140-2
5. Forouzanfar MH, Afshin A, Alexander LT, et al. *Global, Regional, and National Comparative Risk Assessment of 79 Behavioural, Environmental and Occupational, and Metabolic Risks or Clusters of Risks, 1990–2015: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2015*. Vol 388.; 2016. doi:10.1016/S0140-6736(16)31679-8
6. Chanel O, Perez L, Nino @bullet, Nzli K, Medina S. The hidden economic burden of air pollution-related morbidity: evidence from the Aphekom project. *Eur J Heal Econ*. 17. doi:10.1007/s10198-015-0748-z
7. Health Organization Regional Office for Europe W. *Economic Cost of the Health Impact of Air Pollution in Europe C Le a n a i r , h e a l t h a n d w e a l t H*.; 2015. <http://www.euro.who.int/pubrequest>. Accessed April 7, 2019.
8. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, et al. *Global Warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty Summary for Policymakers Edited by Science Officer Science Assistant Graphics Officer Working Group I Technical Support Unit*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15\\_SPM\\_version\\_stand\\_alone\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf). Accessed April 7, 2019.
9. *MON AIR, MON ÉCOLE Étude Sur La Pollution de l'air Dans 222 Écoles Belges Résumé*. <http://buroblauw.nl/stikstofdioxide-in-basisscholen>. Accessed April 7, 2019.

10. Saenen ND, Bové H, Steuwe C, et al. Children's Urinary Environmental Carbon Load. A Novel Marker Reflecting Residential Ambient Air Pollution Exposure? *Am J Respir Crit Care Med*. 2017;196(7):873-881. doi:10.1164/rccm.201704-0797OC
11. Curieuzeneuzen Vlaanderen – Het grootste burgeronderzoek naar luchtkwaliteit ooit. <https://curieuzeneuzen.be/>. Accessed April 7, 2019.
12. Rôle du médecin généraliste dans les maladies liées à l'environnement - Fédération des maisons médicales. <https://www.maisonmedicale.org/Role-du-medecin-generaliste-dans.html>. Accessed April 12, 2019.
13. Breathelife - A global campaign for clean air. <http://breathelife2030.org/>. Accessed April 9, 2019.
14. La Cellule environnement-santé | OpenFed. <https://www.environnement-sante.be/fr/about-us-fr/le-nehap-sa-mission-ses-fonctions-ses-acteurs/la-cellule-environnement-sante>. Accessed April 7, 2019.
15. Le BRAL, c'est quoi ? | bral.brussels. <https://bral.brussels/fr/pagina/le-bral-cest-quoi>. Accessed April 9, 2019.
16. Aphekom.org.  
<http://aphekom.org/web/aphekom.org/home;jsessionid=7A4ED8B3FE950FAC8D99AACB9266B14B>. Accessed April 9, 2019.
17. Pollution de l'air en clair, la BD | Strasbourg Respire. <https://strasbourgrespire.fr/pollution-de-lair-en-clair-la-bd/>. Accessed March 13, 2018.
18. De Limelette C. *Entretiens de La SSMG*. <http://www.irceline.be/en>. Accessed April 12, 2019.
19. AirCasting.  
[http://aircasting.org/map#/map\\_sessions?map=%257B%2522zoom%2522:5,%2522lat%2522:37.09024,%2522lng%2522:-95.71289100000001,%2522mapType%2522:%2522roadmap%2522,%2522hasChangedProgrammatically%2522:false%257D&data=%257B%2522sensorId%2522:%2522Particulate%2520Matter-airbeam2-pm2.5%2520\(%25C2%25B5g%252Fm%25](http://aircasting.org/map#/map_sessions?map=%257B%2522zoom%2522:5,%2522lat%2522:37.09024,%2522lng%2522:-95.71289100000001,%2522mapType%2522:%2522roadmap%2522,%2522hasChangedProgrammatically%2522:false%257D&data=%257B%2522sensorId%2522:%2522Particulate%2520Matter-airbeam2-pm2.5%2520(%25C2%25B5g%252Fm%25). Accessed April 9, 2019.
20. da Schio N, Boussauw K, Sansen J. Accessibility versus air pollution: A geography of externalities in the Brussels agglomeration. *Cities*. 2019;84:178-189. doi:10.1016/j.cities.2018.08.006

21. Zhu L, Liu J, Cong L, Ma W, Ma W, Zhang Z. Spatiotemporal Characteristics of Particulate Matter and Dry Deposition Flux in the Cuihu Wetland of Beijing. *PLoS One*. 2016;11(7):e0158616. doi:10.1371/journal.pone.0158616
22. Abu-Elmagd M, Alghamdi MA, Shamy M, et al. Evaluation of the Effects of Airborne Particulate Matter on Bone Marrow-Mesenchymal Stem Cells (BM-MSCs): Cellular, Molecular and Systems Biological Approaches. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14(4). doi:10.3390/ijerph14040440
23. OMS | Respire la vie: la pollution de l'air, un tueur invisible. WHO. 2017. <http://www.who.int/phe/breathe-life/about/fr/>. Accessed March 13, 2018.
24. Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, et al. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: A review. *Environ Heal A Glob Access Sci Source*. 2013. doi:10.1186/1476-069X-12-43
25. Bourdrel T, Bind M-A, Béjot Y, Morel O, Argacha J-F. Cardiovascular effects of air pollution. *Arch Cardiovasc Dis*. 2017;110(11):634-642. doi:10.1016/j.acvd.2017.05.003
26. Crouse DL, Peters PA, van Donkelaar A, et al. Risk of Nonaccidental and Cardiovascular Mortality in Relation to Long-term Exposure to Low Concentrations of Fine Particulate Matter: A Canadian National-Level Cohort Study. *Environ Health Perspect*. 2012;120(5):708-714. doi:10.1289/ehp.1104049
27. Charpin D, Pairon J-C, Annesi-Maesano I, et al. La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. Document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF). *Rev Mal Respir*. 2016;33(6):484-508. doi:10.1016/j.rmr.2016.04.002
28. Casas L, Simons K, Nawrot TS, et al. Respiratory medication sales and urban air pollution in Brussels (2005 to 2011). *Environ Int*. 2016. doi:10.1016/j.envint.2016.06.019
29. Sram RJ, Veleminsky M, Veleminsky M, Stejskalová J. The impact of air pollution to central nervous system in children and adults. *Neuro Endocrinol Lett*. 2017;38(6):389-396. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29298278>. Accessed March 23, 2019.
30. Sunyer J, Esnaola M, Alvarez-Pedrerol M, et al. Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. 2015. doi:10.1371/journal.pmed.1001792
31. Clifford A, Lang L, Chen R, Anstey KJ, Seaton A. Exposure to air pollution and cognitive

- functioning across the life course – A systematic literature review. 2016. doi:10.1016/j.envres.2016.01.018
32. Zhang X, Zhang X, Chen X. Happiness in the air: How does a dirty sky affect mental health and subjective well-being? 2017. doi:10.1016/j.jeem.2017.04.001
  33. Luyten LJ, Saenen ND, Janssen BG, et al. Air pollution and the fetal origin of disease: A systematic review of the molecular signatures of air pollution exposure in human placenta. *Environ Res.* 2018;166:310-323. doi:10.1016/j.envres.2018.03.025
  34. Arroyo V, Díaz J, Salvador P, Linares C. Impact of air pollution on low birth weight in Spain: An approach to a National Level Study. *Environ Res.* 2019;171:69-79. doi:10.1016/j.envres.2019.01.030
  35. Ren S, Haynes E, Hall E, et al. Periconception Exposure to Air Pollution and Risk of Congenital Malformations. 2017. doi:10.1016/j.jpeds.2017.09.076
  36. Conforti A, Mascia M, Cioffi G, et al. Air pollution and female fertility: a systematic review of literature. doi:10.1186/s12958-018-0433-z
  37. Lao XQ, Zhang Z, Lau AK, et al. Exposure to ambient fine particulate matter and semen quality in Taiwan. *Occup Environ Med.* 2017. doi:10.1136/oemed-2017-104529
  38. Liu C, Ying Z, Harkema J, Sun Q, Rajagopalan S. Epidemiological and Experimental Links between Air Pollution and Type 2 Diabetes. doi:10.1177/0192623312464531
  39. Wolf K, Popp A, Schneider A, et al. Association Between Long-term Exposure to Air Pollution and Biomarkers Related to Insulin Resistance, Subclinical Inflammation, and Adipokines. *Diabetes.* 2016;65(11):3314-3326. doi:10.2337/db15-1567
  40. Quel est le rôle de la pollution atmosphérique dans l'asthme ? - Revue Médicale Suisse. <https://www.revmed.ch/RMS/2012/RMS-363/Quel-est-le-role-de-la-pollution-atmospherique-dans-l-asthme>. Accessed April 22, 2019.
  41. Mann JK, Balmes JR, Bruckner TA, et al. Short-Term Effects of Air Pollution on Wheeze in Asthmatic Children in Fresno, California. *Environ Health Perspect.* 2010;118(10):1497-1502. doi:10.1289/ehp.0901292
  42. Gauderman J, Vora H, McConnell R, et al. Effect of exposure to traffic on lung development from 10 to 18 years of age: a cohort study. *www.thelancet.com.* 2007;369. doi:10.1016/S0140
  43. Division of Data, Research and Policy Danger in the air. 2017. [https://www.unicef.org/environment/files/Danger\\_in\\_the\\_Air.pdf](https://www.unicef.org/environment/files/Danger_in_the_Air.pdf). Accessed January 9,

- 2018.
44. Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, et al. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet (London, England)*. 2014;383(9919):785-795. doi:10.1016/S0140-6736(13)62158-3
  45. Sinharay R, Gong J, Barratt B, et al. Respiratory and cardiovascular responses to walking down a traffic-polluted road compared with walking in a traffic-free area in participants aged 60 years and older with chronic lung or heart disease and age-matched healthy controls: a randomised, crossover study. *Lancet*. December 2017. doi:10.1016/S0140-6736(17)32643-0
  46. Zuurbier M, Hoek G, van den Hazel P, Brunekreef B. Minute ventilation of cyclists, car and bus passengers: an experimental study. *Environ Health*. 2009;8(1):48. doi:10.1186/1476-069X-8-48
  47. Dons E, Int Panis L, Van Poppel M, Theunis J, Wets G. Personal exposure to Black Carbon in transport microenvironments. *Atmos Environ*. 2012;55:392-398. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.03.020
  48. Dhital S, Rupakheti D. Bibliometric analysis of global research on air pollution and human health: 1998–2017. *Environ Sci Pollut Res*. March 2019;1-12. doi:10.1007/s11356-019-04482-x
  49. Deguen S, Zmirou-Navier D. Social inequalities resulting from health risks related to ambient air quality--A European review. *Eur J Public Health*. 2010;20(1):27-35. doi:10.1093/eurpub/ckp220
  50. Deguen S, Petit C, Delbarre A, et al. Neighbourhood Characteristics and Long-Term Air Pollution Levels Modify the Association between the Short-Term Nitrogen Dioxide Concentrations and All-Cause Mortality in Paris. 2015. doi:10.1371/journal.pone.0131463
  51. Pollution atmosphérique : des gains d'espérance de vie sont encore possibles - Revue Médicale Suisse. <https://www.revmed.ch/RMS/2013/RMS-370/Pollution-atmospherique-des-gains-d-esperance-de-vie-sont-encore-possibles>. Accessed April 12, 2019.

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1. Les déterminants de la santé de Dahlgren et Whitehead.</i> .....	7
<i>Figure 2. Excès de mortalité estimée attribué à la pollution de l'air en Europe et aux catégories de maladies associées.</i> .....	8
<i>Figure 3. Répartition régionale des taux estimés de surmortalité annuelle due aux maladies attribuées à la pollution atmosphérique. Ces taux sont des limites inférieures car les autres maladies non transmissibles ne sont pas incluses.</i> .....	9
<i>Figure 4. Les polluants primaires et secondaires et leurs sources.</i> .....	16
<i>Figure 5. Cette image vous donne idée de la taille des particules fines. Le diamètre d'un cheveu humain est de environ 60µm. Cela explique que ces particules sont très facilement inhalées dans le système respiratoire humain.</i> .....	17
<i>Figure 6. Cette image vous donne une idée de la complexité des agrégats particulaires et de leurs composants.</i> .....	18
<i>Figure 7. Le bon exemple. Diminution des émissions de SO2 depuis les années 60</i> .....	19
<i>Figure 8. Les pics de pollution sont influencés par les émissions de NH3 d'origine agricole</i> .....	19
<i>Figure 9. L'inversion thermique</i> .....	21
<i>Figure 10. Dispersion des polluants dans une rue canyon</i> .....	22
<i>Figure 11. Pénétration des polluants dans l'arbre bronchique</i> .....	23
<i>Figure 12. Les polluants : déclencheurs d'évènements cardiovasculaires</i> .....	25
<i>Figure 13. Mécanisme par lequel les polluants affectent le cerveau</i> .....	31
<i>Figure 14. Développement de la mémoire de travail dans les écoles à fortes ou faible pollution atmosphérique.</i> .....	32
<i>Figure 15. L'exposition personnelles et la dose inhalée dans les différents moyens de transport<sup>44</sup></i> .....	34

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Les sources et effets des différents polluants .....	23
Tableau 2. La pollution de l'air en fonction des saisons et de la géographie .....	36

## ANNEXE

Le e-learning n'est pas encore scénarisé dans sa totalité : vous le trouverez sur le lien suivant dans sa version actuelle : <https://360.articulate.com/review/content/8aad547e-f6b5-4b3f-8613-1c99ac4c1082/review>. Avec le mot de passe : « nehap ».

Dans la version power point ci-dessous, vous trouverez l'intégralité des informations.