

**ACADÉMIE D'ORLÉANS-TOURS
UNIVERSITÉ DE TOURS**

FACULTE DE PHARMACIE « Philippe-Maupas »

Année 2021-2022

N° 104

**THÈSE D'EXERCICE
pour le
DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

Par SARIOĞLU Atakan

**Allergies aux pollens : impact de la pollution
atmosphérique et conséquences
épidémiologiques et économiques**

**PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT
LE 30 NOVEMBRE 2021**

JURY

Président

Mr CLASTRE Marc, Professeur, Biologie cellulaire et biochimie végétale,
faculté de pharmacie - TOURS

Membres du jury :

Mme GLEVAREC Gaëlle, Maître de Conférences, Faculté de Pharmacie
- TOURS

-Mr CHABBI Amine Ahmed, Docteur en pharmacie, Pharmacie Rouget
de l'Isle, Choisy le roi

-Mme ÖZDEMİR Melek, Docteur en pharmacie, Pharmacie Mandoraise,
Villemandeur

*Nous n'héritons pas de la terre de nos parents,
Nous l'empruntons à nos enfants.*

ANNEE : 2021 - 2022

Directrice : Pr Véronique MAUPOIL

Directeur Adjoint : M. Hervé MARCHAIS

Assesseurs : Pr Daniel ANTIER, M. Matthieu JUSTE, Pr Karine MAHEO, Mme Audrey OUDIN

ENSEIGNANTS

12 PROFESSEURS D'UNIVERSITÉ

ALLOUCHI	Hassan	Chimie Physique
BOUDESOCQUE-DELAYE	Leslie	Pharmacognosie
BRAND	Denys	Microbiologie Immunologie-Bio épidémiologie
CHEVALIER	Stéphane	Biochimie Générale & Biothérapie
CHOURPA	Igor	Chimie Analytique & Hydrologie
CLASTRE	Marc	Biologie Cellulaire & Biochimie Végétale
DIMIER-POISSON	Isabelle	Immunologie Parasitaire
ENGUEHARD-GUEIFFIER	Cécile	Chimie Thérapeutique
MAHEO	Karine	Physiologie
MAUPOIL-DAVID	Véronique	Pharmacologie
VIAUD-MASSUARD	Marie-Claude	Chimie Organique
MUNNIER	Émilie	Pharmacie Galénique

7 PROFESSEURS D'UNIVERSITÉ ET PRATICIENS HOSPITALIERS

ANTIER	Daniel	Pharmacie Clinique
ARLICOT	Nicolas	Biophysique & Bioinformatique
EMOND	Patrick	Biophysique & Bioinformatique
GIRAUDAU	Bruno	Santé publique, Biostatistiques & Épidémiologie
LANOTTE	Philippe	Microbiologie – Immunologie - Bioépidémiologie
POUPLARD	Claire	Hématologie
THIBAUT	Gilles	Microbiologie – Immunologie – Bioépidémiologie

2 PROFESSEURS ÉMERITES

GUILLOTEAU	Denis	Biophysique & Mathématiques
BARIN	Francis	Microbiologie – Immunologie – Bioépidémiologie

37 MAITRES DE CONFÉRENCES

ALLARD-VANNIER	Emilie	Pharmacie Galénique
AUBREY	Nicolas	Biochimie Générale & Biothérapie
BAKRI	Françoise	Hygiène Sante Publique & Toxicologie
BESSON	Pierre	Physiologie
BIRER-WILLIAMS	Caroline	Biologie Cellulaire & Biochimie Végétale
BONNIER	Franck	Chimie Analytique & Hydrologie
BORDY	Romain	Pharmacologie
BOUVIN-PLEY	Mélanie	Microbiologie-Immunologie-Bioépidémiologie
BRAIBANT	Martine	Microbiologie-Immunologie-Bioépidémiologie
BREDELOUX	Pierre	Pharmacologie
DAVID	Stéphanie	Pharmacie Galénique
DEBIERRE-GROCKIEGO	Françoise	Immunologie Parasitaire
DELAYE	Pierre-Olivier	Chimie Thérapeutique
DENEVAULT	Caroline	Chimie Thérapeutique
DOUZIECH-EYROLLES	Laurence	Affaire Règlementaire / Management Qualité
DUMAS	Jean-François	Biochimie Générale Et Biothérapie Qualité
GERMON	Stéphanie	Immunologie Parasitaire
GLEVAREC	Gaëlle	Biologie Cellulaire & Biochimie Végétale
HERVE-AUBERT	Katel	Chimie Analytique & Hydrologie
JUSTE	Matthieu	Immunologie Parasitaire
LAJOIE	Laurie	Microbiologie-Immunologie-Bioépidémiologie
LANOUE	Arnaud	Biologie Cellulaire & Biochimie Végétale
MARC	Jillian	Biomolécules Et Biotechnologies Végétales
MARCHAIS	Hervé	Pharmacie Galénique
MAVEL	Sylvie	Chimie Thérapeutique
OMBETTA-GOKA	Jean-Edouard	Chimie Organique
ODIN	Audrey	Biologie Cellulaire & Biochimie Végétale
PASQUALIN	Côme	Pharmacologie
PRIE	Gildas	Chimie Organique
SOUCE	Martin	Chimie Analytique & Hydrologie
TAUBER	Clovis	Biophysique & Mathématiques
VELGE-ROUSSEL	Florence	Immunologie Parasitaire
VERCOUILLIE	Johnny	Biophysique & Mathématiques
VERGOTE	Jackie	Affaire Règlementaire / Management Qualité
VIERRON	Emilie	Biophysique & Mathématiques
ZHANG	Bei-Li	Pharmacologie

2 maitres de conférences et praticiens hospitaliers

FOUCAULT-FRUCHARD	Laura	Pharmacie Clinique
RESPAUD	Renaud	Chimie Analytique & Hydrologie

2 AHU (assistant hospitalier Universitaire)

FOUCAULT	Amélie	Biophysique & Mathématiques
MARLET	Julien	Microbiologie – immunologie – Bioépidémiologie

1 PRAG

WALTERS-GALOPIN	Susan	Anglais
-----------------	-------	---------

1 ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche)

HILALI	Soukaïna	Pharmacognosie
--------	----------	----------------

3 Chargés De Recherche

EPARDAUD	Mathieu	INRAE
MEVELEC	Marie-Noëlle	INRAE
MOIRE	Nathalie	INRAE



SERMENT DE GALIEN

En présence des Maîtres de la Faculté, je fais le serment :

D'honorer ceux qui m'ont instruit(e) dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle aux principes qui m'ont été enseignés et d'actualiser mes connaissances ;

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de Déontologie, de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers la personne humaine et sa dignité ;

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels ;

De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession ;

De faire preuve de loyauté et de solidarité envers mes collègues pharmaciens ;

De coopérer avec les autres professionnels de santé ;

Que les Hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert(e) d'opprobre et méprisé(e) de mes confrères si j'y manque.

Date : Le 30 Novembre 2021

L'étudiant Mr SARIOGLU Atakan

*Le Doyen de la Faculté Professeur
Véronique Maupoil*

Remerciements

À Madame GLEVAREC Gaëlle, directrice de thèse

Merci de m'avoir accompagné sans hésiter dans ce sujet passionnant. Merci de votre disponibilité, de vos conseils et de votre réelle implication. C'est par vos heures d'enseignements que j'ai été inspiré par ce sujet, je vous en suis très reconnaissant.

À M. CLASTRE Marc, président du jury

Merci d'avoir accepté la présidence de ma thèse.

À M. CHABBI Amine et OZDEMIR Melek, membre du jury de thèse, Docteur en pharmacie

Merci de me faire l'honneur d'être mes jurys de thèse.

À mes parents, ma sœur, mon frère

Annem, Babam, je ne peux que vous remercier du plus profond de mon cœur. Mes parents, sans qui, je n'aurai jamais pu avoir la force, la détermination, l'ambition de réussir. Vous êtes ma raison d'être. Vous êtes ceux qui ont cru en moi, toute ma vie, même dans les moments les plus difficiles. Merci pour toutes les valeurs que vous m'avez transmises. Ma plus grande fierté est de vous rendre fier.

Merci à ma Sibel et mon Ayhan. Mes deux amours qui m'ont toujours accompagné dans les moments difficiles. Nous avons tous les trois passé des moments très forts. Vous êtes tous les deux ma plus grande fierté.

À ma Eya, ma vie, mon amour

Merci à ma raison de vivre, ma femme, à travers qui j'ai trouvé une raison de réussir. Eya, sans qui cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Merci de m'avoir encouragé dans les moments les plus difficiles et de m'avoir accompagné depuis notre rencontre, et de m'accompagner pour le restant de ma vie.

À ma famille

Merci à mes quatre grands-parents qui ont su par leur amour m'encourager et m'accompagner.

Merci à tous mes oncles de France et Turquie qui sont chacun d'entre eux uniques et qui ont tous su me donner la force et l'encouragement durant mes études.

Merci à tous mes cousins, en particulier Ersin et Erhan pour la force que vous m'avez donnée et tous les moments inoubliables que nous avons passé ensemble. Nous avons eu des souvenirs uniques, et d'autres sont encore à créer. Bu üçlü çok güçlü !

À Dr KOCAK Zeliha

Je ne peux que profondément te remercier de ton aide, tes conseils, ton encouragement. Je te dois une partie de ma réussite. Je te promets d'aider et encourager les jeunes comme tu l'as fait pour moi.

À tous mes amis

Je remercie tous mes amis les plus proches Othmane, Younes, Chaima, Cécile, Hanane, Romain, Fatih, Halil, qui m'ont apporté leur soutien moral et leur bienveillance durant toutes mes années d'étude et avec qui j'ai passé des moments incroyables.

À Dr PERROTIN Dominique

Merci profondément de m'avoir fait confiance. Vous m'avez permis de réaliser mon objectif de vie. Je vous avais promis de tout faire pour réussir, vous m'avez cru et avez eu confiance en moi. Veuillez trouver ici le témoignage de ma plus profonde reconnaissance.

Tables des matières

LISTE DES ENSEIGNANTS	3
SERMENT DE GALIEN.....	6
REMERCIEMENTS	7
TABLES DES MATIERES	9
LISTE DES ABREVIATIONS	11
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	12
PARTIE 1. INTRODUCTION	14
PARTIE 2. LES ALLERGIES AUX POLLENS.....	16
I. LES ALLERGIES (1-4)	17
1) <i>Les acteurs de l'allergie au pollen</i>	<i>17</i>
2) <i>Manifestations cliniques des allergies au pollen.....</i>	<i>19</i>
3) <i>Les traitements.....</i>	<i>19</i>
II. LE POLLEN (3,5-9)	21
1) <i>Définition.....</i>	<i>21</i>
2) <i>Caractéristique et structure du pollen</i>	<i>22</i>
3) <i>Type de pollinisation.....</i>	<i>23</i>
4) <i>Allergénicité des pollens</i>	<i>23</i>
5) <i>Les espèces les plus impliquées.....</i>	<i>24</i>
PARTIE 3. LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	25
I. LES ACTEURS DE LA POLLUTION (10,11)	26
1) <i>Les oxydes d'azote</i>	<i>27</i>
2) <i>Les matières particulaires (PM).....</i>	<i>28</i>
3) <i>L'ozone (O₃).....</i>	<i>29</i>
4) <i>Les oxydes de soufre (SO_x)</i>	<i>30</i>
5) <i>Les Composés Organiques Volatils (COV)</i>	<i>31</i>
6) <i>Le cas du dioxyde de carbone (CO₂).....</i>	<i>31</i>
II. L'IMPACT DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LE POLLEN	34
1) <i>La présence de particules atmosphériques sur le grain de pollen</i>	<i>34</i>
2) <i>Altération physique du grain de pollen.....</i>	<i>37</i>
3) <i>Modification de la fraction lipidique pollinique.....</i>	<i>40</i>
4) <i>Autres sources de pollution impactant le pollen.....</i>	<i>41</i>
III. L'IMPACT DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LES PLANTES.....	43
1) <i>Physiologie de la pollution de la plante.....</i>	<i>43</i>
2) <i>Les effets du réchauffement climatique sur la plante.....</i>	<i>47</i>

IV. L'IMPACT DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LA SANTE HUMAINE	52
1) <i>Physiologie respiratoire</i>	52
2) <i>Impact des différents polluants</i>	54
3) <i>L'asthme allergique et la pollution (62)</i>	58
V. EST-IL DEVENU DANGEREUX DE RESPIRER ?	60
PARTIE 4. LES CONSEQUENCES	61
I. LE DOUBLE IMPACT.....	62
II. LE COUT HUMAIN DE LA POLLUTION	63
1) <i>Les effets à court terme de l'exposition à la pollution atmosphérique</i>	63
2) <i>Les effets à long terme</i>	71
III. LE COUT FINANCIER DE LA POLLUTION	74
1) <i>Le coût socio-économique actuel</i>	74
2) <i>La prévention</i>	76
IV. LE COUT HUMAIN DES ALLERGIES AUX POLLENS	77
1) <i>Epidémiologie des pollinoses</i>	77
2) <i>L'augmentation de la prévalence</i>	79
3) <i>L'avenir</i>	80
V. LE COUT FINANCIER DES POLLINOSES.....	82
1) <i>Le cout insoupçonné des allergies</i>	82
2) <i>L'augmentation de nouvelles personnes allergiques, l'augmentation de la nécessité de soigner</i>	85
PARTIE 5. DES SOLUTIONS ?.....	86
I. POLITIQUE PUBLIQUE	87
1) <i>Le Plan National Santé-Environnement (PNSE) (127)</i>	87
2) <i>Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique(44)</i>	90
II. LA PLACE DU PHARMACIEN	92
1) <i>Les conseils</i>	92
2) <i>L'information patientèle(130)</i>	92
PARTIE 6. CONCLUSION	93
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	95

Liste des abréviations

AASQA : Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air
ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de L'alimentation
ANSM : L'Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des Produits de Santé
ATIH : Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation
AVC : Accident vasculaire Cérébral
BPCO : Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive
CFC : chlorofluorocarbures
CO : Monoxyde de carbone
CO₂ : Dioxyde de carbone
COV : Composé Organique Volatile
HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques
IL : interLeukines
LAURE (Loi) : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie
LT NK : Lymphocyte T Natural Killer
MEB : Microscope Électronique à Balayage
MET : Microscope Électronique à Transmission
NO₂ : Dioxyde de d'azote
NO_x : Oxyde de soufre (*x=nombre d'oxygène*)
O₃ : Trioxyde de soufre ou ozone
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
PIB : Produit Intérieur Brut
PM_{2,5} / PM₁₀ : Particulate Matter (*pour Particule en suspension*) 2,5 ou 10µm
PNB : Polynucléaire Basophile
PNE : Polynucléaire Eosinophile
PNN : Polynucléaire Neutrophile
PNSE : Plan National Santé & Environnement
Ppm : Partie Par Million
PRSE : Plan Régional Santé-Environnement
PSAS : programme de surveillance Air et Santé
RA : Rhinite Allergique
RNSA : Réseau National de Surveillance Aérobiologique
SO₂ : Dioxyde de soufre
TNF : Tumor Necrosis Factor (*pour facteur de nécrose tumorale*)
UVA/B/C : rayon Ultra-violet de type A, B ou C
ARS : Agence Régionale de Santé

Liste des Figures et Tableaux

Figures

FIGURE 1 COUPE D'UNE ETAMINE AVEC SES SACS POLLINIQUES AVANT LA DEHISCENCE (A) ET APRES DEHISCENCE (B) (5)	21
FIGURE 2 FECONDATION DES PLANTES A FLEURS (6).....	21
FIGURE 3 MOYENNE ANNUELLE DE CONCENTRATION EN NO ₂ DANS LA VILLE D'ORLEANS SUR L'ANNEE 2018. (15).....	27
FIGURE 4 EXEMPLE D'UN HYDROCARBURE POLYCYCLIQUE, LE BENZOPYRENE.....	32
FIGURE 5 ÉVOLUTION DE L'EMISSION D'HYDROCARBURES AROMATIQUE POLYCYCLIQUE DE 2014 A 2019. NOUS CONSTATONS EN EFFET UNE EMISSION MAJORITAIREMENT RESIDENTIELLE (20)	33
FIGURE 6 POLLEN DE PLATANE OBSERVE AU MEB. NOUS Y CONSTATONS LA FIXATION DE PARTICULE RESIDUELLE POUVANT PARFOIS AVOIR UNE TAILLE TRES IMPORTANTE(23).	35
FIGURE 7 – OBSERVATION AU MEB D'UN POLLEN DE CYPRES D'ARIZONA (<i>CUPRESSUS ARIZONICA</i>) EXPOSE A LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE. ILS ONT ETE OBSERVES AVANT MEME LEUR DISPERSION A PARTIR L'ETAMINE(29).	38
FIGURE 8 CONCENTRATION DE LA PROTEINE Amb A1 EN FONCTION DE CONCENTRATION CROISSANTE DE CO ₂ . ÉTUDE REALISEE SOUS CHAMBRE. LES CONCENTRATIONS DE L'ALLERGENE Amb A1 SONT DETERMINEES PAR ELISA SUR DES QUANTITES DE PROTEINES EQUIVALENTES(33).	42
FIGURE 9 : (A) ESTIMATION DU NOMBRE DE GRAINS DE POLLEN PAR ARBRE (10 ⁹) EN FONCTION DES CONCENTRATIONS EN CO ₂ (B) NOMBRE DE GRAINS DE POLLEN PAR CHATON (10 ⁶) EN FONCTION DES CONCENTRATIONS EN CO ₂ (38).	45
FIGURE 10 (A) POIDS DES GRAINS DE POLLEN PAR CHATON EN GRAMME EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN CO ₂ (B) TAILLES DES POLLENS EN µm EN FONCTION DES CONCENTRATIONS EN CO ₂ (39)	46
FIGURE 11 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN DIOXYDE DE CARBONE DANS L'ATMOSPHERE DE 1700 A 2017. L'ENREGISTREMENT ET L'ESTIMATION DES TAUX DE CO ₂ DEPUIS L'AGE PREINDUSTRIELLE PERMETTENT D'AVOIR UN APERÇU DE CETTE TRES FORTE AUGMENTATION, PARTICULIEREMENT IMPORTANTE DEPUIS CES DERNIERES DECENNIES (40).....	47
FIGURE 12 ÉVOLUTION DES ANOMALIES DE TEMPERATURE, C'EST A DIRE DE L'ECART PAR RAPPORT A LA MOYENNE DE 1850 A 2020(42).....	48
FIGURE 13 : INDEX POLLINIQUE ANNUEL DU BOULEAU ET EVOLUTION DES MOYENNES DE TEMPERATURE ANNUELLE DE 1989 A 2020 DANS SIX VILLES FRANÇAISES (LYON, STRASBOURG, PARIS, AMIENS, TOULOUSE ET MONTLUÇON) (44).	49
FIGURE 14 POURCENTAGE MOYEN DES PARTICULES DEPOSEES DANS LES VOIES AERIENNES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE (50).....	54
FIGURE 15 GRAPHIQUES (A) DE L'IMPACT D'UNE GREVE DES TRANSPORTS EN COMMUN SUR LE TEMPS DE PARCOURS DE J-1 A J+2 ET (B) L'IMPACT D'UNE GREVE DES TRANSPORTS EN COMMUN SUR LE NOMBRE DE VEHICULES SUPPLEMENTAIRE AU COURT D'UNE JOURNEE(78).	65
FIGURE 16 OBSERVATION DE L'EMISSION EN µg/m ³ DE MONOXYDE DE CARBONE CO (A) ET DE PARTICULES FINES DE MOINS DE 2,5µm PM _{2,5} (B) AVANT, PENDANT ET DEUX JOURS APRES UNE GREVE DES TRANSPORTS EN COMMUN(78).	65
FIGURE 17 VARIATION DU NOMBRE D'ADMISSION PAR MILLION D'HABITANT AUX URGENCES DE J-1 A J+2 D'UNE INTERRUPTION DES TRANSPORTS EN COMMUN(79).	66
FIGURE 18 PART EN POURCENTAGE DE L'AUGMENTATION DE LA MORTALITE NON ACCIDENTELLE A LA SUITE DE L'AUGMENTATION DE 10µg/m ³ DE PM ₁₀ EN FONCTION DE L'AGE ET DES SAISONS SUR LA PERIODE 2007-2010(86).	69
FIGURE 19 PYRAMIDE DES EFFETS A LONG TERME DE L'EXPOSITION A LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE AINSI QUE LEURS CONSEQUENCES SUR LEURS PRISES EN CHARGE(95).	71

FIGURE 20 APERÇU DU COUT SOCIO ECONOMIQUE DE L'EXPOSITION A LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE(106).....	75
FIGURE 21 - RISQUE D'EXPOSITION ALLERGO-POLLINIQUE EN FRANCE VIS A VIS DU POLLEN DE (A) BOULEAU ET DU (B) CYPRES AU COURS DE L'ANNEE 2021(44).....	78
FIGURE 22 REPARTITION DE L'AMBROISIE EN FRANCE EN 2005, 2010 ET 2017. CHAQUE POINT REPRESENTA UNE COMMUNE AYANT SIGNALE LA PRESENCE DE L'AMBROISIE(119).....	80
FIGURE 23 PROJECTION DE L'ECART DU NOMBRE DE JOURS DE VAGUE DE CHALEUR PAR RAPPORT AUX MOYENNES DE 1976-2015 POUR LES HORIZONS 2021-2050 ET 2071-2100 SELON DIFFERENTS MODEL(120).	81
FIGURE 24 REPARTITION DU POURCENTAGE DES COUTS DIRECTS ET INDIRECTS CHEZ LES PATIENTS ATTEINTS DE RA(124)	84
FIGURE 25 UNITES DE PRODUITS ANTI ASTHMATIQUE VENDU DE 2009 A 2014(126)	85
FIGURE 26 SCHEMA D'UN CAPTEUR DE HIRST(129)	90

Tableaux

TABLEAU I TABLEAU DE L'EMISSION PAR SECTEUR DE HAP EN TONNE PAR ANNEE (20)	33
TABLEAU II AVANCE DES PERIODES DE POLLINISATION DE CERTAINES ESPECE ENTRE 1970 ET 2000 ET ESTIMATION DU NOMBRE DE JOURS D'AVANCE DE LA PERIODE DE POLLINISATION ENTRE 2000 ET 2099 (45).....	51
TABLEAU III EXCES DU RISQUE DE MORTALITE SUITE A L'AUGMENTATION DE 10 µG/M ³ DE DIFFERENT POLLUANT ATMOSPHERIQUE SUR UNE DUREE ALLANT DE LA VEILLE A CINQ JOURS AVANT (83).....	68
TABLEAU IV MOYENNE ET MAXIMUM D'EXPOSITION JOURNALIERE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE URBAINE A TOURS ETUDIEE SUR DEUX ANNEES (85).	70

Partie 1. Introduction

Depuis ces dernières décennies, une augmentation très importante de la prévalence des allergies est nettement observée. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) classe les allergies à la quatrième position des pathologies chroniques, derrière les affections cardiovasculaires, les cancers et le diabète.

Les allergies peuvent être causées par différentes sources. Il existe en effet plusieurs types d'allergènes tels que les allergènes respiratoires (pollens, acariens, poils d'animaux, moisissures), les allergènes alimentaires, les médicaments ou encore les allergènes de contact (nickel).

Dans le cadre de cette thèse, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux allergies liées aux pollens encore appelées pollinoses, en mettant en évidence leur corrélation avec la pollution atmosphérique ainsi que leurs nombreuses conséquences.

En France, des millions de personnes souffrent d'allergies aux pollens. En France, ce sont près de 20% des enfants et 30% des adultes qui seraient concernés par les allergies aux pollens. Ces allergies peuvent être plus ou moins invalidantes et entraînent des conséquences en santé publique non négligeables. En effet, les allergies respiratoires sont la première cause de perte de productivité dans le monde, surpassant les maladies cardio-vasculaires.

Bien que l'incidence des allergies soit très élevée de nos jours, nous pouvons constater que cela n'a pas toujours été le cas. En effet, il y a eu une importante augmentation des allergies aux pollens en France et dans le monde, plus particulièrement dans les pays industrialisés.

La pollution de l'air est définie par l'OMS comme étant une contamination de l'environnement par un agent chimique, biologique ou physique, modifiant ainsi les caractéristiques naturelles de l'atmosphère. Les acteurs de la pollution atmosphérique sont très nombreux et leurs sources sont très variables. Lorsque nous parlons d'impact de la pollution atmosphérique, il s'agit des effets directs des polluants atmosphériques, mais aussi de l'impact du changement climatique qui en découle. En effet, les acteurs de la pollution ont un impact direct sur les êtres vivants, mais aussi sur le réchauffement climatique. Cela entraîne un double impact sur le règne du vivant sur terre.

Nous savons qu'il y a un lien entre la pollution atmosphérique et les allergies aux pollens. En effet, celle-ci intervient à travers trois processus :

- Les effets sur la santé humaine. La pollution atmosphérique provoque une hyperréactivité bronchique ainsi qu'une inflammation chronique des bronches, favorisant un terrain allergique.
- Les effets sur les végétaux. Certaines plantes auront une modification de leur physiologie en réponse à l'agression par certains polluants atmosphériques.

Introduction

En effet, certaines plantes produiront plus une quantité plus importante de pollens. Le réchauffement climatique provoqué par ces mêmes polluants aura aussi un impact très important sur la physiologie des végétaux. Les périodes chaudes étant plus longues, les périodes de pollinisation le seront aussi.

- Les effets sur le pollen de façon directs. L'agression par certains polluants atmosphériques du pollen provoque de très importantes altérations du grain de pollen, aussi bien au niveau structural que chimique. Il en résulte parfois un pollen beaucoup plus agressif.

L'augmentation de la prévalence des pollinoses s'explique en partie par ces trois processus. Des liens très significatifs sont mis en évidence entre l'augmentation de la pollution atmosphérique et les allergies aux pollens.

Ainsi, les conséquences qui découlent de l'augmentation de ces deux fléaux sont très importantes. En effet, même pris séparément, la pollution atmosphérique et les allergies aux pollens ont des impacts économiques, sociologiques, démographiques, géographiques très importants.

À travers cette thèse, pour mettre en évidence tous les liens et les conséquences qui en découlent, nous commencerons par rappeler les fondamentaux des allergies aux pollens. Par la suite, nous étudierons les différents acteurs de la pollution atmosphérique ainsi que leurs sources pour mettre ensuite en évidence leurs impacts sur le grain de pollen, sur les plantes ainsi que sur la santé humaine. Une fois que tous les liens auront été établis, nous étudierons les conséquences sur la santé publique en terme de coûts humain et financier. Pour finir, nous parlerons des différentes solutions adoptées par les pouvoirs publics mais aussi les conduites à tenir.

Le but de cette thèse est de mettre en évidence le rôle de la pollution atmosphérique dans l'augmentation de la prévalence des allergies aux pollens et de souligner les très nombreuses conséquences. Ceci afin de rendre compte de l'intérêt du combat que l'on doit mener contre la pollution et le dérèglement climatique.

Partie 2.

Les allergies aux pollens

I. Les allergies (1–4)

Le système immunitaire est un ensemble complexe de cellules et de médiateurs ayant pour but de défendre l'organisme humain contre des agents pathogènes tels que des virus, des bactéries ou encore des parasites. Cependant, il peut arriver que le système immunitaire réagisse de manière excessive à un agent extérieur ou antigène non-infectieux voire inoffensif. Il s'agit le plus souvent de pollen, de moisissures, d'acariens, ou d'aliments.

Ainsi, il en découle une rupture de la tolérance naturelle du système immunitaire vis-à-vis d'agents extérieurs totalement bénins. C'est cette hyperréactivité du système immunitaire qui définit ce qu'est une allergie.

Les grains de pollen peuvent ainsi être plus ou moins allergisant. Deux notions permettent de rendre compte du pouvoir allergisant du grain de pollen d'une espèce : Le potentiel allergisant et le risque allergique.

- Le potentiel allergisant : c'est la capacité d'une plante à avoir un grain de pollen capable de déclencher une réaction allergique. C'est donc un critère qualitatif du grain de pollen.
- Le risque allergique : c'est la quantité de pollen émise par une plante. C'est donc un critère quantitatif.

Le potentiel allergisant et le risque allergique d'une plante sont quantifiés sur une échelle de 1 (nul) à 5 (très élevé). Par conséquent, ce sont les plantes avec un risque allergique de 5 et un potentiel allergisant de 5 qui seront les plus problématiques.

1) Les acteurs de l'allergie au pollen

Suivant la classification de Gell & Coombs, l'allergie au pollen est une réaction d'hypersensibilité de type I ou immédiate(3).

a) Hypersensibilité de type I ou immédiate

Cette hypersensibilité est liée à la production anormale d'immunoglobulines de type E (IgE). Elle est dite aussi hypersensibilité IgE-dépendante.

Lors du déroulement d'une hypersensibilité de type I, il y a d'abord une phase de sensibilisation durant laquelle il y a un premier contact avec l'allergène (antigène). Ainsi, l'antigène sera pris de manière classique par le système immunitaire. Ce sont les cellules présentatrices d'antigènes (CPA) qui vont prendre en charge l'antigène pour présenter des fragments à leur surface aux lymphocytes T dit naïfs. Une réponse TH2 va ainsi s'engager et va conduire à la maturation de lymphocytes B spécifiques de l'antigène pour devenir des plasmocytes producteurs d'IgE. La réaction allergique se caractérise par cette production d'immunoglobulines de type E.

Lors de la phase effectrice, c'est-à-dire lors du deuxième contact avec l'allergène, celui-ci entre en contact avec les mastocytes sensibilisés. C'est ainsi durant la phase effectrice que les mastocytes qui ont des sites de reconnaissance de l'allergène à leurs surfaces vont pouvoir reconnaître l'Ag et ainsi libérer leurs médiateurs, ce qui va entraîner les nombreux effets cliniques. Cette dégranulation des mastocytes est provoquée par les IgE.

Les allergies aux pollens

Beaucoup d'éléments interviennent dans le déclenchement d'une hypersensibilité de type I. Tout d'abord, la génétique joue un rôle dans cette réponse. En effet, des prédispositions familiales peuvent expliquer des manifestations allergiques, ce qui est défini comme l'atopie (prédisposition génétique). L'exposition à des polluants peut aussi provoquer non seulement une altération du système immunitaire favorisant des réponses TH2, mais peut aussi altérer les pollens eux-mêmes et avoir des effets délétères sur la santé.

Nous retrouvons les pneumallergènes dans lesquels se trouvent les pollens. Ce sont les allergènes qui sont inhalés et ayant un impact sur le système respiratoire. Les pollens sont des pneumallergènes saisonniers avec des concentrations très élevées à certains moments de l'année et dans certaines régions. À contrario, il y a les pneumallergènes perannuels qui sont présents toute l'année comme les acariens ou encore les animaux.

b) Les médiateurs préformés

i. L'histamine

L'histamine est synthétisée par les polynucléaires basophiles (PNB). C'est la principale molécule médiatrice impliquée dans le phénomène d'allergie. L'histamine est une molécule vasodilatatrice augmentant la perméabilité capillaire. Au niveau respiratoire, elle provoque une bronchoconstriction et hyperproduction de mucus pouvant être à la base de crise d'asthme.

L'histamine est majoritairement stockée dans les mastocytes. Ainsi, lors d'une réponse IgE-dépendante, la dégranulation de ces cellules libère d'importantes quantités d'histamine responsable des différents symptômes de l'allergie pollinique.

ii. Enzyme protéolytiques

Parmi les enzymes protéolytiques, il y a les tryptases ou les superoxydes dismutases. Elles sont libérées par les PNB et les mastocytes. Elles ont un rôle important dans le phénomène d'inflammation.

Ce phénomène inflammatoire qui se produit dans les premières secondes à premières minutes entraîne des vasodilatations ainsi que l'augmentation de la perméabilité vasculaire. Ceci s'explique par le fait que tous ces médiateurs sont déjà préformés dans les granules, puis libérés en très grande quantité à l'extérieur de la cellule. Dans ces granules, nous retrouvons aussi des cytokines et chimiokines. Tout cela entraîne l'activation de médiateurs néoformés.

c) Les médiateurs néoformés

Cette réponse est de l'ordre de 24 heures. On retrouve dans ces médiateurs néoformés des leucotriènes et des prostaglandines. Ils ont un rôle très important dans la bronchoconstriction et sont à l'origine des symptômes allergiques.

2) Manifestations cliniques des allergies au pollen

Les manifestations cliniques des allergies polliniques sont variables selon les individus. Elles touchent la sphère ORL avec les voies aériennes supérieures ce qui provoque des rhino-sinusites allergiques voire des crises d'asthme. Cela peut être souvent associé à des laryngites provoquant des toux. Les premiers signes observés sont généralement un écoulement de nez, des larmoiement et démangeaisons oculaires, des éternuement, de la toux. Lorsque ces symptômes s'étendent, ils peuvent faire apparaître des difficultés respiratoire.

Ces symptômes peuvent apparaître à tout âge. Ils peuvent durer plus ou moins longtemps et apparaître plus ou moins de manière soudaine.

3) Les traitements

a) Les traitements symptomatiques

i. Antihistaminique

Les antihistaminiques sont les traitements les plus fréquemment utilisés. Ils permettent de bloquer les récepteurs H1 à l'histamine. Ce sont en effet des antagonistes spécifiques et compétitifs. Ils sont utilisés en 1^{ère} intention dans la prise en charge de la rhinite allergique, la conjonctivite et manifestations cutanées.

On distingue les antihistaminiques de première et deuxième générations. Ils diffèrent par leur cinétique. Les antihistaminiques de première génération ont des effets centraux avec un passage de la barrière hémato-encéphalique et des effets anticholinergiques. Pour cette raison, ce sont les antihistaminiques de deuxième génération qui sont les plus utilisés.

Bien qu'ils soient très utilisés, les antihistaminiques ne sont pas toujours suffisants pour contrôler une allergie. Dans ce cas, il est parfois nécessaire d'associer aux antihistaminiques des corticoïdes.

ii. Corticoïde

Les corticoïdes ont une action anti-inflammatoire en inhibant la voie des phospholipases A2, ce qui permet de bloquer la synthèse des médiateurs impliqués dans l'allergie tels que les prostaglandines ou les leucotriènes. Ils peuvent être utilisés de manière locale pour un traitement de fond. Les effets indésirables sont minimes lorsque les corticoïdes sont utilisés localement. Dans les cas où il y a des manifestations plus sévères, les corticoïdes sont utilisés par voie orale ou injectable pour les plus sévères. Dans ce cas, ils sont utilisés sur de courtes périodes afin de minimiser les effets indésirables.

iii. Anti Leucotriène

Les antileucotriènes agissent par antagonisme des récepteurs CysLT1 aux leucotriènes. Ils ont une efficacité comparable aux antihistaminiques, mais moins efficaces que les corticoïdes. Ils sont utilisés dans le traitement de l'asthme persistant léger à modéré non contrôlé par corticoïdes inhalés.

iv. Biothérapies

Les biothérapies sont basées sur une action anti-IgE. En effet, les immunoglobulines E jouent un rôle central dans le déclenchement des réactions allergiques. Ainsi, il est possible d'utiliser des anticorps anti-IgE qui empêchent donc l'interaction des IgE avec les récepteurs à la surface des cellules du système immunitaire.

Ils sont utilisés dans le traitement de l'asthme allergique sévère et persistant non contrôlé avec des traitements de dernière intention.

Ces traitements sont les traitements les plus chers étant donné qu'il s'agit de biothérapie ciblée faisant intervenir des anticorps monoclonaux.

II. Le pollen (3,5–9)

1) Définition

Le pollen est présent chez toutes les plantes à graines, aussi appelées spermatophytes. Elles regroupent les gymnospermes (conifères par exemple) et les angiospermes (toutes les plantes à fleurs). Le pollen est contenu dans les anthères situées à l'extrémité des étamines qui forment l'appareil reproducteur mâle. Chaque anthère est constituée de deux loges polliniques contenant chacune deux sacs polliniques. (Figure 1).

Lorsque les pollens sont matures, ils sont libérés par déhiscence (ouverture) des anthères. C'est ce qui est appelé la pollinisation. Ces pollens, libérés dans l'atmosphère, finissent par se déposer sur l'appareil reproducteur femelle (au niveau du stigmate précisément) d'une fleur de la même espèce pour ainsi permettre la fécondation.

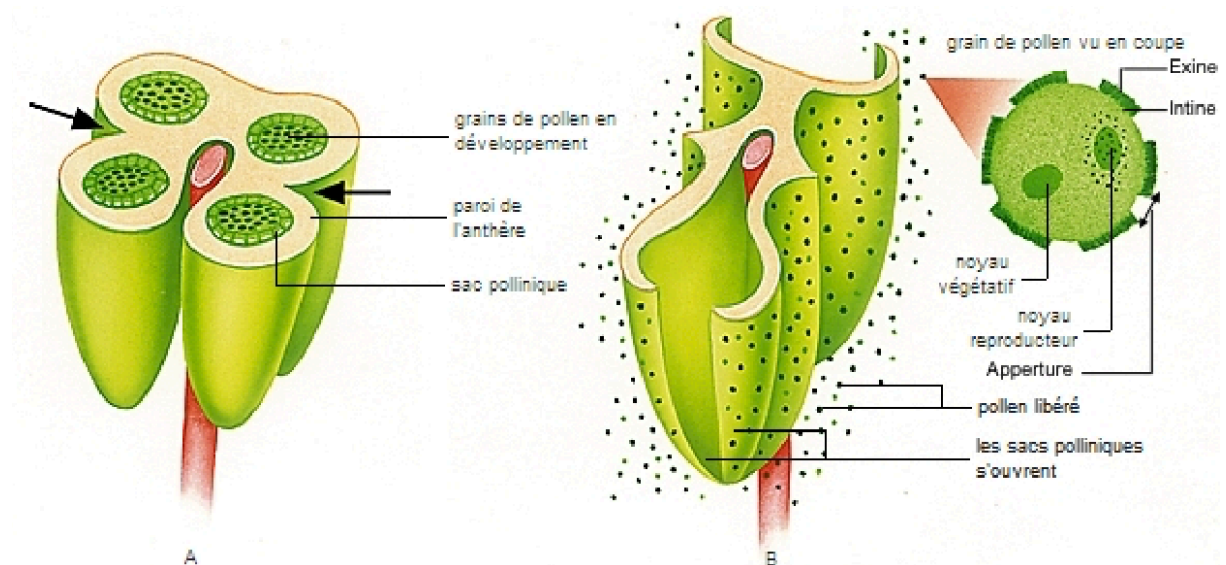
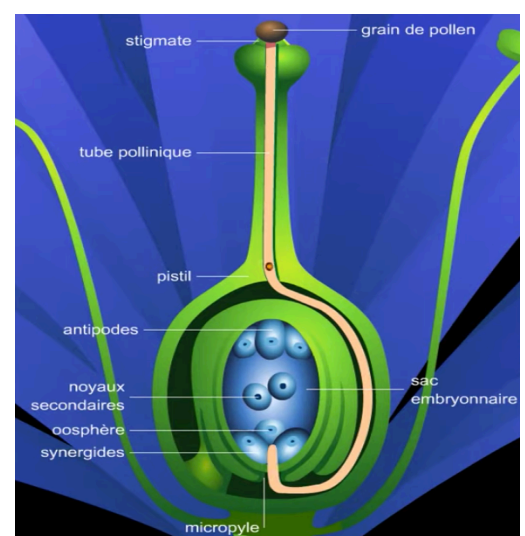


Figure 1 Coupe d'une étamine avec ses sacs polliniques avant la déhiscence (A) et après déhiscence (B) (5)

Lors du contact du grain de pollen avec les stigmates, le grain de pollen germe et émet un tube pollinique jusqu'à l'ovule contenu dans l'ovaire. Ce tube pollinique permet d'acheminer les gamètes mâles jusqu'à l'ovule pour la fécondation.

Après la fécondation, l'ovule va donner une graine et l'ovaire donnera le fruit.

Figure 2 Fécondation des plantes à fleurs (6)



2) Caractéristique et structure du pollen

a) Caractéristique physique

Le grain de pollen est libéré dans l'atmosphère sous forme de grain solitaire ou sous forme aggloméré en dyade (par deux), tétrade (par quatre) ou polyades (plus de quatre). La taille d'un grain de pollen peut être très variable en fonction des espèces. Ils ont une taille comprise entre 5 et 200µm. La moyenne est cependant comprise entre 20 et 40µm. Même si la majorité des grains de pollen sont de forme sphérique, il en existe aussi des longitudinaux.

Le grain de pollen est comparable à une cellule car il est formé d'un cytoplasme et de deux noyaux dont l'un a pour fonction la reproduction. Les grains de pollen ont aussi une paroi comportant deux couches. Cette paroi confère une protection physique et chimique pour protéger le matériel génétique contenu dans le grain de pollen. La paroi se distingue par deux couches (Figure 2):

- Une couche interne appelée intine. Elle contient le cytoplasme du grain de pollen. Elle n'est visible qu'au niveau des ouvertures¹.
- Une couche externe appelée exine. Principalement constituée de sporopollénine, elle confère au grain de pollen une rigidité qui lui permet d'acquies une résistance vis-à-vis de l'environnement extérieur.

Cette structure du pollen est un critère important d'identification. En effet, les ouvertures ainsi que l'ornementation sont un critère d'identification des pollens. Ainsi, il existe une classification des pollens permettant de distinguer les ouvertures sous forme de pores, de sillons ou encore avec les deux.

Au moment de la libération du grain de pollen mature de la plante, les sucres, protéines et lipides issus de la dégénérescence des cellules de l'anthere tapissent la surface du grain de pollen et constitue ainsi un manteau pollinique. Ce manteau pollinique est le premier à entrer en contact avec nos cellules immunitaires. Ainsi, nous verrons par la suite qu'une pollution altérant le manteau pollinique aura d'importantes conséquences en terme d'allergénicité.

b) Composition

La composition qualitative des grains de pollens est peu variable. En effet, ils contiennent généralement :

- De l'eau
- Des vitamines tels que la vitamine E, B3, C, etc.
- Des protéines. Il est important de noter que ce sont les protéines qui sont allergènes et donc impliquées dans les réactions allergiques.
- Des caroténoïdes et de la sporopollénine. Ils sont aussi impliqués dans une moindre mesure dans les réactions allergiques.
- Des glucides
- Des minéraux tels que du fer, magnésium, calcium, etc.

¹ L'ouverture est une zone dépourvue d'exine. C'est une ouverture au niveau de la paroi du grain de pollen, permettant la sortie du tube pollinique.

3) Type de pollinisation

a) Pollinisation anémophile

C'est une pollinisation par le vent. Utilisée par les Poacées et de nombreux arbres, elle est réalisée grâce au vent. Étant donné le critère aléatoire et peu efficace de ce type de pollinisation, les plantes produisent alors une quantité importante de pollen. De plus, le diamètre des grains de pollen impliqués est souvent compris entre 10 et 40µm. Ainsi, transporté par le vent, le pollen peut être retrouvé à plusieurs centaines de mètres de la plante. Étant donné la grande quantité de pollen et la petite taille des grains de pollen, ce sont les plantes avec ce type de pollinisation qui sont le plus impliquées dans les réactions allergiques du fait que de nombreux pollens se trouvent à hauteur des voies respiratoires

b) Pollinisation zoophile

Cette pollinisation se caractérise par un transport du grain de pollen par une espèce vivante telle qu'un insecte (pollinisation entomophile) ou encore un oiseau (pollinisation ornithophile).

Ce sont des fleurs attractives qui utilisent ce type de pollinisation. En effet, les couleurs vives et les odeurs attirent les espèces qui viennent polliniser et ainsi permettent une diffusion du pollen de fleur en fleur. Ce type de pollinisation est donc efficace, ce qui fait que la production de pollen est beaucoup plus faible que pour la pollinisation anémophile. De plus, le pollen est généralement de grande taille, aggloméré et avec de nombreuses ornementsations sur l'exine. Ils sont donc beaucoup moins impliqués dans des réactions allergiques du fait que peu de pollen se trouve à hauteur de nos voies respiratoires

4) Allergénicité des pollens

Tous les pollens n'ont pas le même potentiel allergisant, c'est à dire sa capacité à provoquer une allergie pour une partie de la population. Certains seront totalement inoffensifs quand d'autres seront impliqués dans des allergies plus sévères.

Les pollens sont des particules d'une taille importante. Ils sont donc rapidement arrêtés par la muqueuse nasale. Ainsi, les effets sont observables principalement au niveau des voies aériennes supérieures, mais aussi au niveau des yeux par contact avec la conjonctive. Ils peuvent provoquer des symptômes beaucoup plus sévères tels que des crises d'asthme. Cela peut être le cas des constituants du grain de pollen qui, de par leur taille, ont la capacité de pénétrer très profondément dans la sphère respiratoire. Ces constituants sont normalement contenus dans le grain de pollen. Nous verrons par la suite qu'une fragilité du grain de pollen peut induire une rupture du grain et libérer son contenu. La petite taille du contenu des grains de pollens peuvent ainsi pénétrer jusqu'aux voies aériennes inférieures.

Les acteurs du déclenchement des réactions allergiques sont entre autres les glycoprotéines. Bien que beaucoup de protéines soient contenues dans les grains de pollens, seules certaines ont la capacité d'entrer en interaction avec le système immunitaire et provoquer une réaction allergique. D'autres constituants du grain de pollen tels que les lipides peuvent avoir un potentiel allergisant.

5) Les espèces les plus impliquées

En France, de nombreuses espèces sont responsables d'allergies polliniques. Les espèces les plus surveillées sont celles avec un potentiel allergisant et un risque allergique très élevé tels que le cyprès, le bouleau verruqueux, le pâturin des prés, la fléole des prés ou encore l'ambroisie. Cette dernière fait même l'objet d'un Arrêté de lutte contre cette espèce en France.

Partie 3.

La pollution Atmosphérique

I. Les acteurs de la pollution (10,11)

Même si la pollution demeure invisible, elle reste l'un des ennemis les plus redoutables du 21^e siècle. Cet adversaire invisible s'infiltré dans nos villes, nos maisons mais elle intègre également le corps humain, jusqu'au plus profond de nos poumons.

Pourtant cet ennemi n'a pas toujours été imperceptible. En effet, avant même les années 1950, les dégagements industriels révèlent d'épaisses fumées noires composées principalement de soufre. Aujourd'hui, quand bien même les industries ont diminué leurs émissions de pollution « visible », celle-ci ne prend plus naissance seulement au niveau industriel, mais aussi de par la circulation automobile, l'aviation, les transports maritimes qui ont connu une véritable explosion ces dernières décennies.

Afin de contrer cet ennemi, il faut établir et respecter certains seuils. Ces valeurs limites peuvent être définies comme étant la concentration maximale d'un polluant dans l'atmosphère permettant d'éviter, de prévenir ou de diminuer les effets d'une de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement. Elles sont établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Cependant, même si ces seuils sont plus ou moins respectés dans certains pays, à travers le monde en 2016, ce n'est pas moins de 91% de la population qui vivait dans des milieux où les lignes directrices de L'OMS sur la qualité de l'air n'étaient pas respectées (12).

C'est en 1996 que la loi sur L'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (Loi LAURE) a rendu obligatoire la surveillance de la qualité de l'air ainsi que l'information au public en France. Ainsi, en s'appuyant sur les recommandations de l'OMS, cette loi a mis en œuvre des seuils (12)(13). Depuis, toutes les normes ainsi que les critères de qualité de l'air sont régis par le Code de l'environnement.

Parmi les polluants, nous retrouvons les oxydes d'azotes (NO_x), les matières particulaires (PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$), l'ozone (O_3), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les hydrocarbures aromatiques et certains métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic, nickel).

De plus, il faut distinguer les polluants primaires des polluants secondaires, ces dernières étant formées à partir de réactions chimiques et de polluants primaires. Ainsi, les polluants primaires correspondent au monoxyde de soufre (SO), au dioxyde de soufre (SO_2), au monoxyde de carbone (CO) et certaines particules en suspension. Issus des réactions chimiques, les indicateurs secondaires sont représentés par l'ozone (O_3) et le dioxyde d'azote (NO_2). Ces polluants secondaires peuvent à leur tour être à la base de la formation d'autres polluants tels que les trioxydes de soufres ainsi que les composés organiques volatiles.

En se basant sur les valeurs de l'OMS, le code de l'environnement a établis deux niveaux de pollution en France: le seuil de recommandation (ou d'information) et le seuil d'alerte. À partir du moment où le seuil d'information est franchi, des recommandations peuvent être prises afin de ne pas atteindre le niveau supérieur qui est le seuil d'alerte. Si ces mesures ne suffisent pas à éviter le seuil d'alerte, des recommandations plus strictes sont appliquées. Par ailleurs, certaines mesures viennent diminuer voir arrêter l'émission du polluant concerné lorsqu'il s'agit d'une émission industrielle.

La pollution Atmosphérique

Par exemple, s'agissant d'un polluant émis par la circulation automobile, des modifications de la limitation de la vitesse, ou des circulations alternées peuvent être instaurées.

Depuis la mise en place de ces seuils, une importante diminution de l'émission de certains de ces polluants a été enregistrée. Cependant, 5 des 12 polluants¹ réglementés au niveau européen ont notifié un dépassement des valeurs limites en 2018. Quand bien même ces dépassements sont en baisse, on constate que les seuils sont largement franchis et ce de manière récurrente pour certains polluants tels que les oxydes d'azote, les matières particulaires ou encore l'ozone. En France en 2018, ils correspondent respectivement à 3, 11 et 40 agglomérations (14).

1) Les oxydes d'azote

c) Les sources

Les oxydes d'azote, habituellement représentés par la formule chimique NO_x , se forment lors de combustion à haute température de combustibles fossiles tels que le gazole, l'essence, le fioul. Ainsi, il se produit une oxydation de l'azote contenu dans l'air pour former du monoxyde d'azote (NO), qui finit par former du dioxyde d'azote (NO_2). Ainsi, la circulation automobile est une source très importante d'émission de NO_2 . Les axes routiers denses sont donc des zones à travers lesquelles, des niveaux plus élevés en pollution au dioxyde d'azote sont observés.

De par la source principale des oxydes d'azote, leur concentration en intérieur est plus faible que celle de l'air extérieur.



Figure 3 Moyenne annuelle de concentration en NO_2 dans la ville d'Orléans sur l'année 2018. Les concentrations les plus élevées sont en effet observées aux abords des axes routiers où les concentrations peuvent dépasser les $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (15)

¹Oxydes d'azote (NO_x), particules fines en suspension (PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$), dioxyde de soufre (SO_2), ozone (O_3), monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils (benzène C_6H_6 ...), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic et nickel)

Cela dit, au sein d'un espace intérieur, les principales sources de NO_2 sont entre autres les cuisinières à gaz, les cheminées ou encore la fumée provenant du tabac(2).

Par conséquent, dans des locaux mal aérés, des pics dépassant très largement les seuils d'alertes, peuvent être constatés. En effet, des études ont enregistré dans des cuisines mal ventilées et équipée d'une cuisinière à gaz, des pics de concentration de NO_2 pouvant alors atteindre 1000 à 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en une heure(16).

d) Les normes (12,17)

À l'échelle mondiale, l'OMS propose des valeurs guides.

En France, le Code de l'environnement établit des normes identiques à celles de l'OMS :

- Objectif de qualité : **40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne annuelle civile
- Seuil de recommandation (ou d'information) : **200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne horaire
- Seuil d'alerte :
 - **400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne horaire et dépassé durant trois heures consécutives
 - Si le seuil de recommandation et d'information est franchi la veille et le jour même et qu'il est prévu un nouveau risque de déclenchement pour le jour suivant, le seuil d'alerte sera à **200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne horaire.

2) Les matières particulaires (PM)

a) Les sources

Les matières particulaires (ou PM pour Particulate Matter) sont des substances en suspension dans l'air. Celles-ci proviennent de différentes origines:

- Biologique : ce sont toutes les particules issues d'organisme biologique comme les pollens, mais aussi les bactéries, les virus ou encore les champignons.
- Mécanique : nous retrouvons entre autres les poussières, les résidus de broyages, d'érosion des surfaces ou des sols, éruption volcanique, embruns marins, etc.
- Chimique : il s'agit de particule en suspension issue de réaction chimique, par évaporation et condensation. Par exemple, les feux de forêts en sont une source très importante. Autrement, l'humain en est responsable à travers des procédés industriels mais aussi de par la circulation automobile. En effet, les particules diesel représentent une quantité très importante des PM présentes dans les villes.

Toutes ces particules se trouvent dans l'atmosphère sous forme d'aérosol. On y retrouve principalement des sulfates, de l'ammoniaque, des nitrates, du carbone, et bien plus encore.

Les matières particulaires peuvent être catégorisées selon leur taille. Ainsi, nous retrouvons les matières particulaires d'un diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$ ou PM_{10} et les matières particulaires avec un diamètre inférieur à $2,5\mu\text{m}$ ou $\text{PM}_{2,5}$. Par ordre de comparaison, un cheveu mesure environ $60\mu\text{m}$ de diamètre. En outre, les matières particulaires les plus fines sont plus nocives pour la santé du fait de leur importante pénétration dans les voies aériennes inférieures. On estime que les matières particulaires affectent plus de personnes que tous les autres polluants.

b) Les normes (12,17)

En France, les objectifs de qualité fixés par le code de l'environnement sont légèrement plus souples que les recommandations de l'OMS.

Concernant les PM₁₀, l'OMS suggère une moyenne annuelle inférieure à 20 µg/m³ et une moyenne journalière inférieure à 50 µg/m³. En France, les normes sont les suivantes :

- Objectif de qualité : **<30 µg/m³** en moyenne annuelle
- Seuil de recommandation (ou d'information) : **50 µg/m³** en moyenne journalière.
- Seuil d'alerte : **80 µg/m³** en moyenne journalières

De plus, nous pouvons citer des valeurs limites pour la protection de la santé :

- **50 µg/m³** : c'est la moyenne journalière qu'il ne faut pas dépasser plus de 35 fois sur une année
- **40 µg/m³** : c'est la moyenne annuelle à ne pas dépasser.

Cependant, les PM_{2,5} n'ont pas de réglementation avec des seuils d'alerte ou de recommandation. Pour ces dernières, des objectifs de qualité sont envisageables. En France, l'objectif de qualité en moyenne annuelle est de **10 µg/m³**.

Il y a néanmoins une valeur limite de **25 µg/m³** en moyenne annuelle.

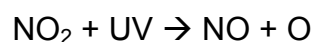
3) L'ozone (O₃)

a) Les sources

De formule chimique O₃, l'ozone, composé de trois atomes d'oxygène, est un gaz naturellement présent dans la stratosphère à environ 30 à 40 km d'altitude. Formant la couche d'ozone, celle-ci filtre plus de 95% des rayons ultraviolets (UV) solaires (surtout UVC et UVB), ce qui permet une protection des êtres vivants. En effet, une surexposition à des rayons UV peut avoir des effets très néfastes sur la santé humaine mais également sur l'écosystème. De plus, l'amincissement ou la disparition dans certaines zones de la couche d'ozone peut avoir de graves conséquences sur l'homme et l'écosystème.

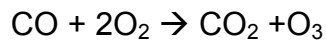
Cela dit, lorsqu'il se trouve dans les couches basses de l'atmosphère, l'ozone est un polluant. Contrairement au dioxygène (O₂), celui-ci a une odeur caractéristique et peut avoir un impact négatif sur la santé de l'Homme et sur la planète.

Contrairement aux autres polluants évoqués, l'ozone n'est pas émis par l'activité humaine mais se forme à partir d'autres polluants présents dans l'atmosphère avec entre autres une influence de l'activité solaire. Parmi les précurseurs, nous retrouvons les dioxydes d'azote qui subissent l'action des rayonnements solaires de courte longueur d'onde (*entre 280 et 430nm*) pour former un monoxyde d'azote et de l'oxygène. Ce dernier se combine avec le dioxygène pour former l'ozone :



La pollution Atmosphérique

Les feux de forêt ainsi que les combustions incomplètes de matière première fossile, dégagent dans l'atmosphère d'importante quantité de monoxyde de carbone. En présence de dioxyde d'azote en tant que catalyseur, celui-ci forme de l'ozone selon la réaction suivante :



Par conséquent, les villes les plus industrialisées et très ensoleillées sont très polluées par l'ozone.

b) Les normes (12,17)

En France, l'objectif de qualité de concentration d'ozone pour la protection de la santé humaine se situe à **120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne sur 8 heures. Cette valeur s'aligne sur les anciennes recommandations de l'OMS. Cependant, en s'appuyant sur des liens observés entre la mortalité journalière et les concentrations d'ozone dans l'air, l'OMS a abaissé la valeur du seuil d'ozone à 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donc 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de moins qu'en France. Ce seuil de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ne doit pas être dépassé plus de 25 jours/an.

Le seuil de recommandation ou d'information est fixé à **180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne horaire. Le seuil d'alerte pour la protection de la santé humaine est de **240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** de moyenne horaire.

Pour le seuil d'alerte, nous retrouvons trois niveaux pour la mise en œuvre de mesure d'urgence :

- 1^{er} seuil : **240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** dépassé plus de trois heures consécutives
- 2^e seuil : **300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** dépassé plus de trois heures consécutives
- 3^e seuil : **360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

4) Les oxydes de soufre (SO_x)

a) Les sources

Parmi les oxydes de soufre, nous pouvons principalement citer le dioxyde de soufre de formule SO_2 . Les volcans ainsi que certains procédés industriels utilisant la combustion du soufre contenu dans certains pétroles, charbons émettent d'importante quantité de dioxyde de soufre. En présence de dioxyde d'azote (NO_2), on observe une oxydation du dioxyde de soufre (SO_2) pour générer du trioxyde de soufre (SO_3) et de l'acide sulfurique (H_2SO_4) en présence d'eau qui se trouve être à la base des pluies acides.

En France, les émissions de SO_2 ont été divisées par cinq entre 2000 et 2019. Cela s'explique par la désindustrialisation et la délocalisation, mais aussi la production d'électricité par procédé nucléaire qui a nettement remplacé le fioul et le charbon(18).

b) Les normes (12,17)

Légèrement plus souple que les recommandations de l'OMS (<20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), en France, l'objectif de qualité est de **50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne annuelle. Les seuils fixés en France sont les suivants :

- Seuil de recommandation : **300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne sur une heure.
- Seuil d'alerte : **500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** .

La pollution Atmosphérique

Les valeurs limites pour la protection de la santé humaine sont :

- **350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** : Moyenne horaire qu'il ne faut pas dépasser plus de 24 fois par an
- **125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** : Moyenne journalière qu'il ne faut pas dépasser plus de 3 fois par an

Le niveau critique à respecter pour la protection de l'écosystème et la végétation est de **20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** .

Les concentrations de dioxyde de soufre ne doivent pas excéder **500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en moyenne sur une période de 10 minutes. En effet, une exposition d'une durée de 10 minutes seulement suffit à altérer les fonctions pulmonaires d'un asthmatique.

5) Les Composés Organiques Volatils (COV)

Ayant la particularité d'avoir des points d'ébullition très bas, les composés organiques volatils (COV) sont des éléments chimiques constitués de carbone. Ils sont retrouvés dans l'atmosphère sous forme de gaz. Les COV proviennent de source humaine et de source naturelle.

Toutes les manipulations ou productions d'hydrocarbures dans le milieu industriel d'hydrocarbure en plein air émettent dans l'atmosphère des COV. Parmi les principaux émetteurs, on peut citer le raffinage de pétrole qui est un important émetteur, la circulation automobile, le stockage, ou encore l'application de peintures ou de solvants.

6) Le cas du dioxyde de carbone (CO_2)

c) Une définition contradictoire

Le code de l'environnement définit comme polluant « *toute substance présente dans l'air ambiant et pouvant avoir des effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble* »(17). Quand bien même le dioxyde de carbone possède les caractéristiques pour être considéré comme un polluant, la loi française ne le considère pas comme tel. Par conséquent, celui-ci ne possède pas de réglementation avec des seuils d'alerte ou des seuils de recommandation. Néanmoins, l'émission de CO_2 est, quant à elle, très réglementée et devient de plus en plus stricte.

Il sera constaté par la suite, que l'impact du dioxyde de carbone est considérablement important sur la santé humaine, sur les plantes ainsi que sur le pollen.

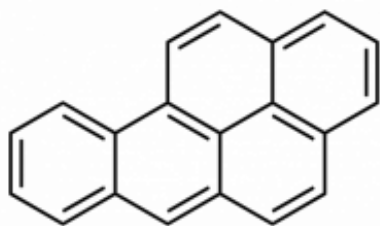
Le trafic routier est la principale source d'émission de CO_2 . Le confort thermique ménagé (*climatisation, chauffage, etc.*) est une autre source considérable de rejet de CO_2 .

d) Les normes(19)

En France, même si aucun seuil d'alerte ou de recommandation (ou information) n'est pas fixé, les émissions de dioxyde de carbone sont quant à elles bien réglementées. Pour la circulation automobile, des malus écologiques sont ainsi appliqués pour de nouvelles immatriculations de véhicules qui ne respectent pas les normes d'émission.

Ainsi, les véhicules immatriculés à partir du 1^{er} janvier 2021, il y a application du malus écologique à partir de 133 grammes d'émission de CO₂ par kilomètre contre 133 g/km en 2020. À ce niveau, la taxation commence à 50€ de malus écologique et évolue par tranche. La dernière tranche étant à 30 000€ pour des taux supérieurs à 218 g/km contre 20 000€ en 2020. Nous constatons donc des malus toujours plus sévères. D'ici 2023, les véhicules excédant une émission de 225 g/km pourront avoir un malus écologique s'élevant à 50 000€.

e) Les hydrocarbures aromatiques polycyclique



Les Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique (HAP) sont des hydrocarbures aromatiques, c'est à dire constitué d'atome d'hydrogène et de carbone (hydrocarbure) et d'au moins deux cycles aromatiques condensés¹ (avec des carbones en commun entre deux cycles).

Les HAP sont considérés comme des polluants prioritaires par l'OMS ainsi que par la communauté européenne.

Figure 4 Exemple d'un hydrocarbure polycyclique, le benzopyrène

i. Les sources

Malgré leur toxicité, les HAP sont malheureusement très présents dans l'environnement.

Ils se forment par combustion incomplète de matières organiques contenant des atomes d'hydrogène et de carbone. Ces matières organiques peuvent être entre autres du méthane ou d'autres hydrocarbures, mais aussi des lipides, des glucides, etc.

Ils se forment aussi par pyrolyse ou thermolyse de matières organiques, c'est-à-dire la décomposition chimique de ce composé par la chaleur.

Aujourd'hui, en France, l'origine principale des hydrocarbures aromatiques polycycliques est pyrolytique. Sa source principale provient de l'utilisation de combustible pour le chauffage domestique, le charbon, le bois ou encore le fuel. En seconde place de l'émission de HAP, on retrouve les transports routiers qui rejettent d'importante quantité de HAP, notamment les moteurs diesel. Par ailleurs, parmi les émetteurs de HAP il existe les industries manufacturières, l'agriculture, etc.

¹ Un cycle aromatique est condensé lorsqu'il y a des carbones en commun entre des cycles.

Tableau I Tableau de l'émission par secteur de HAP en tonne par année (20)

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Transports	18,78	18,62	18,54	18,05	17,36	16,67
Résidentiel	37,69	38,78	40,35	38,01	36,16	32,5
Autre	11,47	11,58	11,49	11,48	11,48	11,49

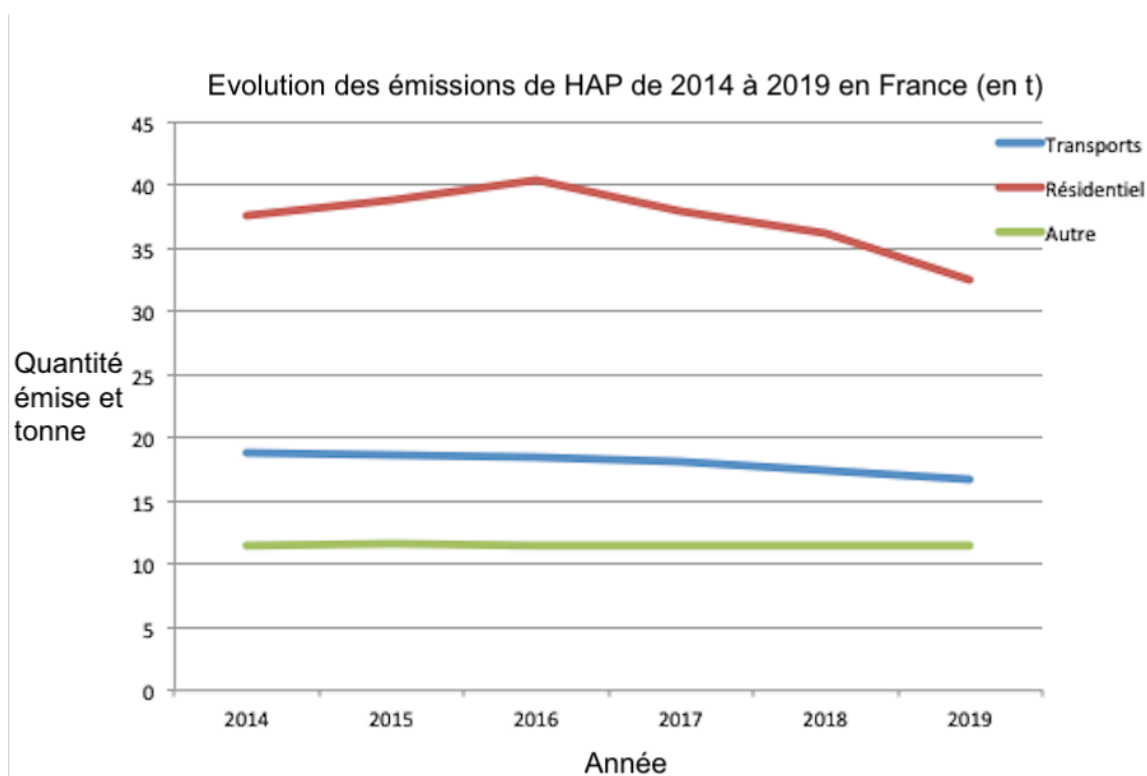


Figure 5 Évolution de l'émission d'hydrocarbures aromatique polycyclique de 2014 à 2019. Nous constatons en effet une émission majoritairement résidentielle (20)

ii. La convention d'Aarhus

La convention d'Aarhus est adoptée en 1998 en faisant suite à la convention de Genève sur la pollution atmosphérique. Ce traité interdit la fabrication ainsi que l'utilisation de certaines substances chimiques en raison de leurs toxicités. On y trouve 16 polluants, dont des hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Cette convention vise en effet à réduire les émissions de différents HAP, mais sans limite précise ou pénalité.

En effet, leurs concentrations dans l'atmosphère sont très variables (d'environ 10 pg/m^3 à plusieurs centaines de ng/m^3 dans les zones les plus polluées). De plus, cette variabilité dépend aussi de la période hivernale ainsi que des conditions météorologiques qui peuvent favoriser la condensation d'HAP.

II. L'impact de la pollution atmosphérique sur le pollen

La corrélation entre la pollution atmosphérique et les pollinoses se fait par au moins trois voies : l'impact de la pollution sur la santé, sur la plante et sur la pollen. En effet, la pollution atmosphérique a des effets directs sur le pollen en entraînant des modifications physiques (ou structurales), chimiques et biologiques.

Pour une meilleure compréhension de l'impact de la pollution sur les pollens, les recherches sont axées sur la modification de la fraction lipidique et des protéines du pollen. Les conséquences de ces modifications du pollen provoquent certaines fois des conséquences considérables sur l'agressivité des pollens. En effet, cette fragilisation occasionne des ruptures du grain de pollen, qui a pour finalité, une libération de son contenu allergène.

1) La présence de particules atmosphériques sur le grain de pollen

Le voyage d'un grain de pollen dans l'atmosphère ne se fait jamais seul. Lorsque celui-ci est en suspension dans l'air, il peut entrer en contact avec des matières particulaires (PM). De cette rencontre peut découler une adhésion des matières particulaire sur le pollen (21).

La fixation de matières particulaires sur le grain de pollen a été mise en évidence grâce à trois approches expérimentales différentes :

- La collecte directe des grains de pollen sur les anthères
- L'exposition massive de grain de pollen aux particules fines
- Le prélèvement direct du pollen en suspension dans l'atmosphère durant les période de pollinisation

Ainsi, en combinant ces trois approches, l'observation des grains de pollen au microscope électronique à balayage (MEB) a permis de mettre en évidence l'adhésion des PM au niveau du grain de pollen.

a) Processus d'adhésion particulaire

Quatre processus permettent d'expliquer le dépôt de matières particulaires à la surface des grains de pollens des plantes :

- Avant la pollinisation, il peut y avoir une adhésion des particules aux anthères ainsi qu'au pollen avant ou pendant la déhiscence.
- Pendant la pollinisation, la rencontre ou la collision dans l'atmosphère des grains de pollen et des particules en suspension peuvent entraîner une adhésion du polluant.
- Un pollen qui se dépose sur une surface, un sol, ou une végétation qui est déjà polluée par des PM peut entraîner une pollution du grain de pollen. Lorsque celui-ci se retrouve à nouveau dans l'air sous forme d'aérosol, il sera ainsi pollué et donc agressif.
- Lorsque l'on respire, du pollen et des particules en suspension dans l'air peuvent être inhalées et adhérer lors de la descente vers les voies aériennes respiratoires.

À ce jour, les recherches ne permettent pas de mettre en évidence la prédominance d'une de ces voies de contamination par rapport à une autre. Ceci s'explique par des études majoritairement qualitatives plutôt que quantitatives.

De plus, un facteur pouvant influencer l'adhésion de particules en suspension dans l'air est aussi le « Pollenkitt » qui est une substance qui permet l'agrégation des grains de pollen entre eux. Il joue un rôle important dans l'adhésion du pollen, mais peut être aussi responsable de l'adhésion de PM (22).

Ce qui en résulte est une adhésion du polluant ou un dépôt de celui-ci sur le grain de pollen. Quelles que soit la nature de cette interaction entre le polluant et le grain de pollen, les conséquences qui en résulteraient seraient liées aux propriétés de ces derniers. Ainsi, cela peut favoriser d'une part la libération d'allergène par fragilisation de la paroi, d'autre part entraîner une réaction inflammatoire plus rapide par la présence de PM.

b) Observation de grain de pollen pollué

Parmi les espèces incriminées en France dans les pollinoses, nous pouvons retrouver entre autres le bouleau verruqueux (avec un risque et un potentiel allergisant très élevé) et le platane (avec un potentiel allergisant très élevé et un risque allergisant élevé). Plusieurs observations au MEB de leur pollen ont permis de démontrer une adhésion de particules fines à leurs surfaces (*figure 6 et 7*):

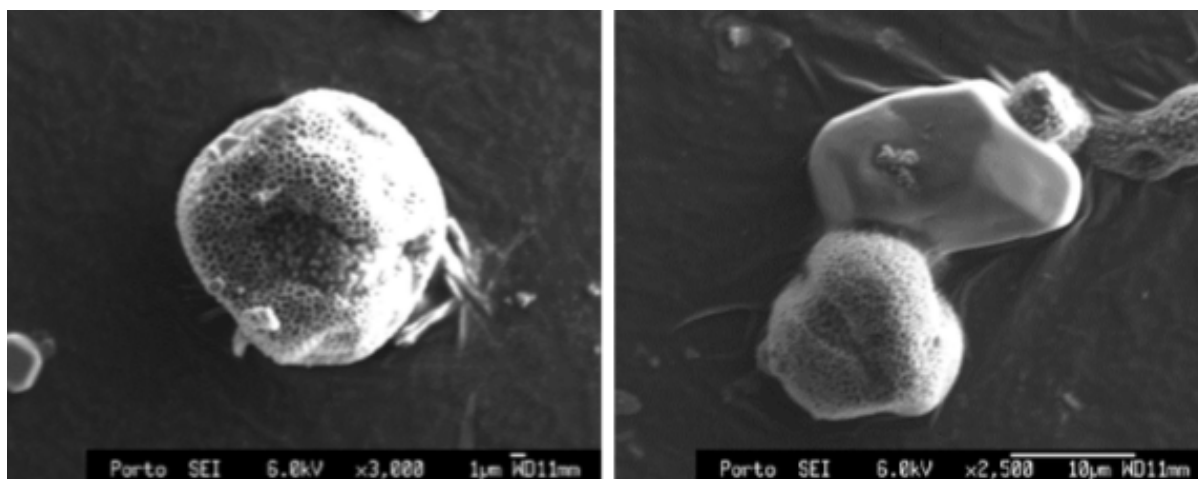


Figure 6 Pollen de platane observé au MEB. Nous y constatons la fixation de particule résiduelle pouvant parfois avoir une taille très importante(23).

Généralement, lors des prélèvements de pollens issus de zones polluées, ceux-ci présentent des contaminations particulières. Inversement, lorsque ces prélèvements sont réalisés en zone moins polluée, les pollens présentent moins ou pas de contamination particulière.

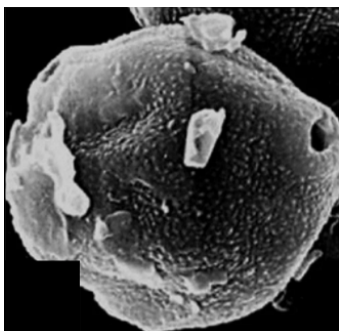


Figure 3 Observation au MEB d'un pollen de bouleau verruqueux(24)

c) Composition particulière

La composition particulière d'un pollen lorsque celui-ci est en suspension dans l'air dépend de nombreux facteurs tels que la température (du jour ainsi que de la veille), le vent ou l'humidité.

Lorsqu'ils sont en suspension dans l'air, les pollens acquièrent une couche particulière étrangère qui est principalement composée de sodium, magnésium, chlore, potassium et silicium. Sans insister dans cette partie sur les effets sur la santé humaine, l'OMS considère la silice cristalline comme étant cancérigène pour l'Homme.

Dans une étude de 2013 (25), l'analyse de la composition des pollens par microsonde de Castaing¹ ou analyse EPMA a permis de mettre en évidence des pourcentages massiques d'éléments sur la paroi pollinique considérablement différentes en fonction du grain de pollen. En effet, une augmentation très importante d'éléments chimiques a été mise en évidence par rapport au pollen témoin. Nous y retrouvons principalement du chlore, du magnésium, du sodium, du potassium et du silicium. Secondairement, sont retrouvés de l'azote, calcium, soufre, phosphore.

Lorsqu'il se trouve en suspension dans l'air, les pollens entrent en contact avec des composants et sont capables d'absorber ou adsorber diverses matières particulières pouvant ainsi contribuer à aggraver les effets sur la santé humaine.

d) Effet germinatif (26)

Au-delà des effets sur la santé, la fixation de particules sur les grains de pollen peut entraîner des effets sur la germination du pollen, en particulier une diminution de la capacité de germination.

En fonction de la plante, les pollens auront des sensibilités différentes aux polluants particuliers, c'est à dire qu'ils seront plus ou moins résistants à certaines particules. En France, des tests réalisées sur des pollens de *Betula verrucosa* (ou bouleau verruqueux) et de *Dactylis glomerata* (ou Dactyle aggloméré) ont démontré une perte très importante des fonctions biologiques et de reproduction du pollen lorsqu'ils sont exposés à un très fort trafic routier en seulement deux jours d'exposition (par exemple proche des zones routières industrielles).

Ces résultats ont été obtenus grâce à des tests de viabilité et de germination² qui ont permis de démontrer un taux de viabilité de 70% et un taux de germination de 87% pour ces deux espèces végétales.

¹ Inventée en 1951, la microsonde de Castaing ou analyse EPMA consiste à un bombarder avec des électrons un échantillon afin d'en analyser son spectre de rayon X émis.

² La viabilité d'un pollen ainsi que son taux de germination sont des paramètres biologiques très significatifs pour démontrer l'impact de la pollution sur le pollen. La mesure de la viabilité d'un pollen se fait par coloration de son cytoplasme (par du carmin acétique par exemple). Si le cytoplasme d'un pollen fixe le colorant, il est considéré comme viable. La capacité de germination *in vitro* sur des milieux de cultures nous donne des taux de germination. La germination est aussi mise en évidence par microscopie par en observant la formation et la longueur des tubes polliniques.

Des tests sur le pollen du *Fagus Sylvatica* (hêtre commun) ont démontré une viabilité de 45 à 70% en fonction de la zone plus ou moins polluée contre un peu moins de 80% de viabilité pour les témoins. Même si ce n'est pas toujours une diminution très importante, elle peut être parfois significative.

Les matières particulaires ne sont pas les seules à induire des effets négatifs sur la germination. En effet, nous observons que les taux de germination sont inversement proportionnels aux doses de certains polluants tel que l'ozone pour lequel une exposition de 30 ppm/6h suffit à influencer négativement la germination, ou encore le dioxyde d'azote qui influence négativement le taux de germination des grains de pollen à partir de 34 ppm/6h.

2) Altération physique du grain de pollen

L'altération physique compte parmi les effets les plus visibles de la pollution sur le grain de pollen. Ces observations sont largement citées dans les récents travaux de recherche. En effet, lorsqu'ils sont collectés dans des zones polluées, les grains de pollen présentent d'importantes altérations physiques.

a) L'impact direct du NO₂ et du SO₂

Lorsqu'un grain de pollen est en contact avec une concentration élevée de dioxyde de soufre (SO₂) et/ou de dioxyde d'azote (NO₂), il présente d'importantes perturbations et une fragilité considérable de son exine (27).

Nous pouvons par exemple citer le pollen du chêne. Lorsque celui-ci est expérimentalement exposé à des concentrations de 0,5 ppm à 5 ppm de NO₂ et/ou SO₂ pendant une durée de 4 heures, il présente des altérations morphologiques importantes. En effet, les observations au microscope électronique à balayage révèlent des fissures de l'exine, pouvant aller jusqu'à sa rupture totale et donc la libération du contenu du grain de pollen.

De plus, en présence de NO₂ et SO₂, la viabilité du grain de pollen est considérablement diminuée, le SO₂ ayant une action légèrement plus nocive.

b) L'impact de l'ozone (O₃)

Situés sur l'exine, les constituants qui composent le manteau pollinique, c'est à dire les éléments incrustés au niveau de la paroi pollinique (*Voir « caractéristique et structure du pollen »*), jouent un rôle important dans les réactions allergiques. Ce manteau pollinique est en effet en première ligne des interactions entre nos cellules et le grain de pollen. Ainsi, une modification de ce manteau pollinique par la pollution atmosphérique peut avoir un impact important sur cette interaction pollen/cellule humaine.

Par exemple, une étude menée sur le pollen du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) exposé à des concentrations en ozone (O₃) a mis en évidence des réactions chimiques d'oxydation d'un bon nombre de constituants du manteau pollinique (28).

Dans cette étude, la production d'une vingtaine de composés a été observée sous l'action de l'ozone par rapport à un pollen non exposé à l'ozone. Le principal produit de la réaction d'oxydation par l'ozone est le 4-hydroxybenzaldéhyde. Ce produit est issu de l'ozonolyse de l'acide para-coumarique qui est présent dans le manteau pollinique ou du monomère d'acide coumarique contenu dans la structure de la sporopollénine, qui est l'un des principaux constituants de l'exine.

La pollution Atmosphérique

Ainsi, une dégradation de la sporopollénine par l'ozonolyse, peut faciliter la fragilisation voir la rupture du grain de pollen qui entraîne alors une dispersion des allergènes dans l'atmosphère.

Au-delà des effets sur sa paroi ou son manteau, l'action de l'ozone sur la paroi pollinique peut aussi induire des altérations de la capacité de reproduction du pollen. En effet, les constituants du manteau pollinique jouent aussi un rôle dans l'interaction pollen/stigmate.

c) Observation d'altération physique du grain de pollen

Afin de concevoir et d'observer de plus près cette altération physique du grain de pollen, le recours à la microscopie électronique à balayage est mise en place.

Ainsi, on peut observer la différence entre un grain de pollen issu de zone polluée et un grain de pollen issu de zone non polluée. Cette comparaison nous permet de mettre en évidence l'impact direct de la pollution, mais sans incriminer un polluant particulier.

Expérimentalement, il est plus facile d'étudier l'impact d'un polluant sur le pollen en observant le grain de pollen avant et après l'exposition.

Ci-dessous, l'observation de différents grains de pollen au MEB (Figure 5 et 6).

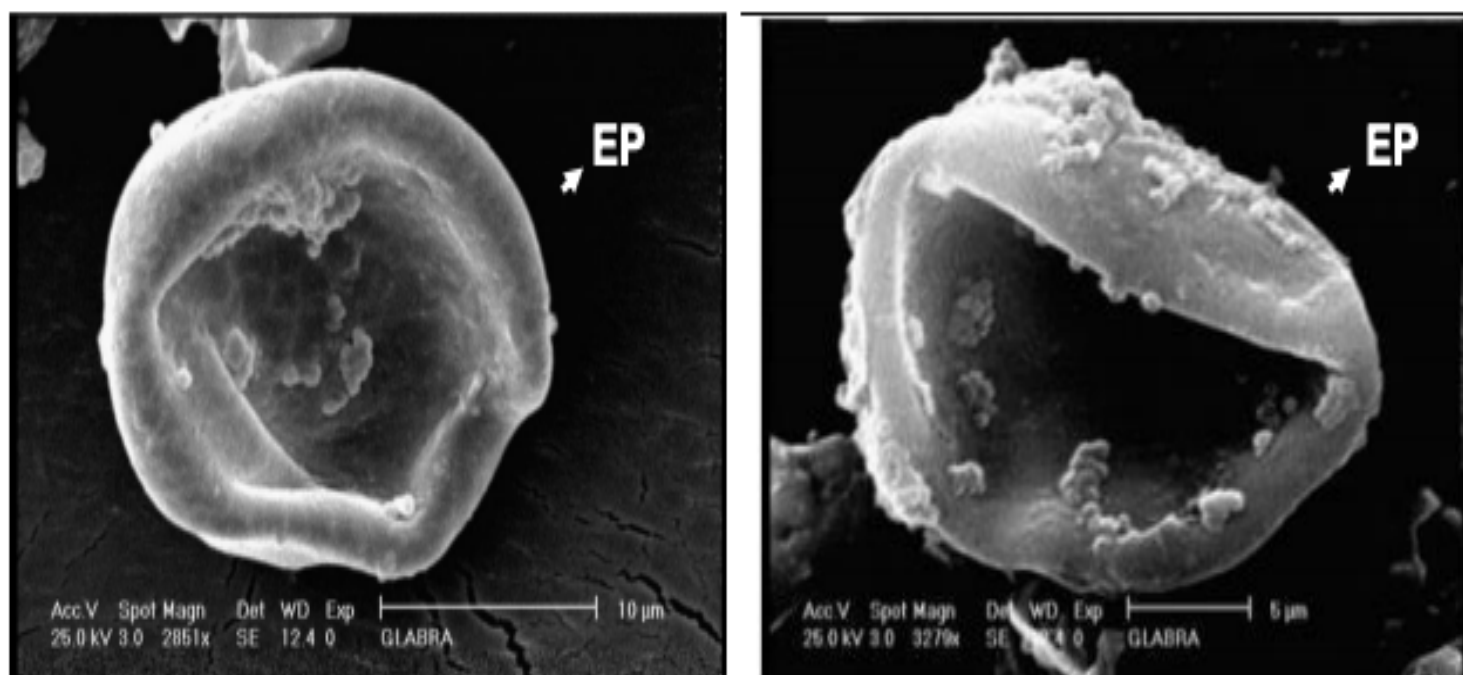


Figure 7 – observation au MEB d'un pollen de Cyprès d'Arizona (*Cupressus arizonica*) exposé à la pollution atmosphérique. Ils ont été observés avant même leur dispersion à partir l'étamine(29).

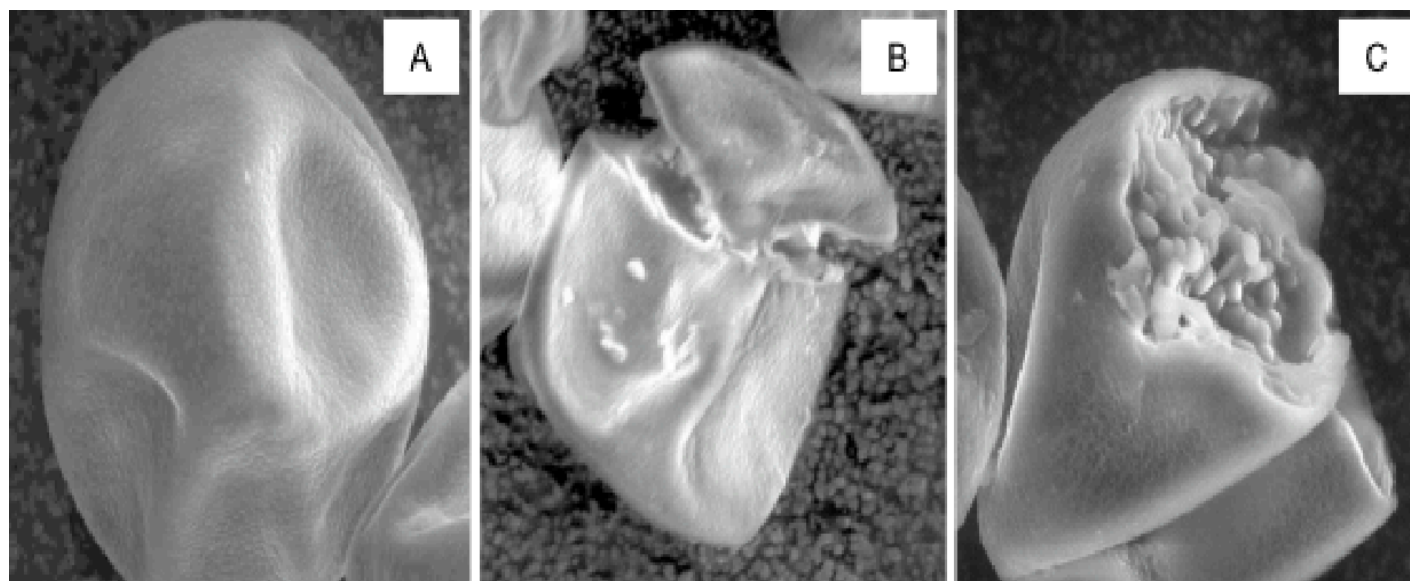


Figure 5 – Observation de pollen au MEB. Nous voyons sur l'image A un pollen non exposé à des polluants, il est intact. L'image B est un pollen exposé pendant 4heures à 2ppm de dioxyde d'azote (NO_2). L'image C est un pollen exposé à 0,7ppm d'ozone (O_3)(30).

d) Conséquence d'un pollen fragilisé

La conséquence d'un tel effet sur le grain de pollen exprime une libération de son contenu, c'est-à-dire des granules cytoplasmiques de pollen¹ ainsi que des fragments de grain. Ces particules ont une taille pouvant aller de $5\mu\text{m}$ à des tailles inférieures à $1\mu\text{m}$. Par ordre de comparaison, en moyenne, un grain de pollen mesure une trentaine de micromètres. Nous savons de plus, que la taille d'une particule influence sa pénétration dans les voies aériennes. Ici, de par leur taille beaucoup plus fine et leur quantité plus importante, les granules cytoplasmiques de pollen ont une pénétration favorisée vers les voies aériennes profondes. En plus de leur taille beaucoup plus petite, ces particules sont autant allergènes que le pollen entier entraînant de surcroît des réactions plus importantes. En effet, les seules granules cytoplasmiques du pollen entraînent des réactions immunitaires importantes et une réponse inflammatoire comparable à un pollen entier (31).

Ces résultats suggèrent donc que lors les pics de pollution atmosphérique peuvent augmenter l'incidence des allergies par une altération physique du pollen qui libère des quantités importantes de particules plus allergènes dans l'atmosphère.

¹ Des granules cytoplasmiques de pollen sont des microparticules d'une taille parfois inférieur à $5\mu\text{m}$ contenues à l'intérieur du grain de pollen. Elles peuvent être en quantité très importante dans le pollen.

3) Modification de la fraction lipidique pollinique

a) L'implication des lipides dans l'allergie

Étant capables d'être reconnue par les anticorps, les glycoprotéines polliniques se sont vues attribuer le statut des principales causes des réactions allergiques dans la littérature scientifique. Désormais, nous savons que les seuls responsables ne sont pas les glycoprotéines solubles. En effet, d'autres composés des grains de pollen ayant des propriétés immunomodulatrices sont également présents.

Parmi celle-ci, nous citons les lipides qui ont en effet la capacité de se lier aux récepteurs des cellules présentatrices d'antigène, plus précisément au niveau des récepteurs de type Toll¹ et PPAR² qui peuvent tout deux être présents à la surface de cellules présentatrice d'antigène. Cette liaison active par la suite les lymphocytes T NK (Natural Killer) capables par la suite d'induire des réactions d'hypersensibilité de type 2.

De plus, les lipides concernés peuvent aussi imiter les médiateurs lipidiques³ des mastocytes qui peuvent ainsi entraîner une cascade de réactions conduisant à leur dégranulation. Le mécanisme de l'inflammation allergique sera ainsi déclenché. Les lipides concernés peuvent être des glycophospholipides, des sphingolipides, des oxylipides et des stéroïdes.

Le manteau pollinique, situé à la surface du grain de pollen est constitué d'une fraction lipidique. Ces lipides peuvent être sources de réactions allergiques lors de l'interaction entre le pollen et les cellules humaines (8).

Les lipides tels que les acides gras libres dans le manteau pollinique ou encore les stéroïdes peuvent effectivement être potentiellement très allergènes.

Au contact des muqueuses ou de la conjonctive, ils peuvent ainsi déclencher des réactions allergiques.

Comme précédemment évoqué, la rupture du grain de pollen peut libérer son contenu. Nous retrouvons dans cette libération de contenu des phospholipides liés à la membrane, des gouttelettes lipidiques, des sphingolipides et dérivés. Ces particules ayant une taille très petite, leur pénétration dans les voies aériennes est plus profonde et peut donc déclencher des réactions allergiques plus sévères avec notamment des crises d'asthme plus nombreuses et plus graves.

¹ Les récepteurs de type Toll ou Toll-like receptors sont une grande famille de récepteurs permettant une reconnaissance de motifs moléculaires du système immunitaire inné.

² Récepteur PPAR : Récepteur activé par la prolifération de peroxyssomes.

³ Les médiateurs de l'inflammation sont nombreux, parmi eux se trouvent les médiateurs lipidiques. Lors d'une inflammation, la Phospholipase A2 transforme les acides gras en prostaglandine, leucotriènes et PLA2. Ces derniers induisent le processus inflammatoire.

b) L'impact de l'ozone sur la fraction lipidique du pollen

Avec un potentiel allergisant et un risque allergique très élevé, le bouleau est une des espèces les plus incriminées en France et cause de nombreux problèmes allergiques en France. Ainsi, l'étude de son pollen peut être une source importante d'informations.

Récemment, des études ont démontré que l'ozone influence grandement le potentiel allergène des grains de pollen entre autres celui du bouleau (32)).

En effet, concernant le pollen du bouleau, un changement qualitatif ainsi que quantitatif important de sa composition lipidique est observé lorsque celui-ci est exposé à de l'ozone. Cela entraîne donc un changement dans ses interactions avec les cellules humaines. Il a été mis en évidence qu'une exposition importante à l'ozone se traduisait par un effet stimulant immunitaire plus élevé.

Par ailleurs, le changement climatique qui entraîne, entre autres, une augmentation des concentrations d'ozone dans l'atmosphère a d'importants liens avec l'augmentation des allergies dans le monde et en France ainsi qu'une sévérité plus accrue.

c) L'estimation expérimentale de l'allergénicité lipidique

Pour évaluer l'impact allergique de la modification de la composition lipidique d'un pollen, les chercheurs ont différents procédés.

Dans l'étude du grain de pollen du bouleau (32), les chercheurs ont observé l'effet immunostimulant du pollen en fonction de son exposition à un polluant (ici l'ozone). Ainsi, un pollen exposé entraîne une induction de la chimiotaxie des polynucléaires neutrophile, mais ont aussi une action sur la sécrétion de cytokine par les cellules dendritiques.

In vivo, cette allergénicité a été évaluée par des tests cutanés. Des patients connus comme étant allergiques aux pollens de bouleau ont subi un prick-tests cutané. Ainsi, des patients ont eu des injections de petite quantité de l'allergène incriminé préparé à partir d'échantillon de pollen exposé ou non à l'ozone. Après quinze minutes d'attente, il y a une observation de la réaction locale, c'est-à-dire l'apparition de papule ou de petit érythème.

4) Autres sources de pollution impactant le pollen

a) Le cas du dioxyde de carbone

De plus en plus présent au niveau atmosphérique, le dioxyde de carbone a des effets très importants au niveau des allergies. En effet, celui-ci a un impact au niveau de la plante, mais aussi au niveau du pollen. Il y a cependant une importante variabilité inter-espèces.

L'impact du dioxyde de carbone sur le grain de pollen reste encore un sujet de recherche en cours de développement. De récentes études ont démontré des liens entre l'allergénicité de grain de pollen et la concentration en dioxyde de carbone.

En France, comme dans beaucoup de pays, l'Ambroisie est une plante à très haut risque et potentiel allergique. L'exposition de son grain de pollen à des concentrations élevées en dioxyde de carbone ont été corrélées à l'augmentation de l'un de ses constituants particulièrement allergène (33).

En effet, la protéine Amb A1 est connue pour être un important allergène présent sur le grain de pollen de l'ambroisie. Une étude a cherché à démontrer l'impact de la production de ces allergènes en exposant le grain de pollen à des concentrations croissantes en dioxyde de carbone. Les résultats ont démontré une importante corrélation entre l'augmentation des concentrations en dioxyde de carbone et l'augmentation des concentrations en Amb A1 (*figure 8*)

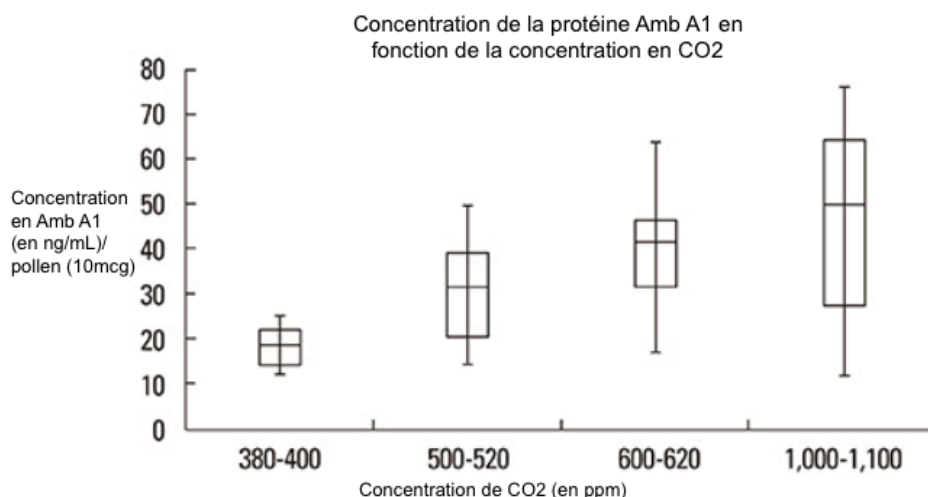


Figure 8 Concentration de la protéine Amb A1 en fonction de concentration croissante de CO₂. Étude réalisée sous chambre. Les concentrations de l'allergène Amb A1 sont déterminées par ELISA sur des quantités de protéines équivalentes(33).

Ainsi, ces résultats suggèrent une augmentation de la production de pollen de l'ambroisie de plus de 230% avec des niveaux de CO₂ qui continueront à augmenter de façon importante.

b) Des polluants du pollen encore peu connus

De très nombreuses études concernant les polluants les plus courants sont réalisées à l'heure actuelle. Cependant, l'impacts de divers polluants sur le pollen reste encore à ce jour assez peu documenté. De plus, même si l'impact d'un polluant sur le pollen est recherché, l'influence sur son allergénicité reste encore à démontrer.

Par exemple, les pesticides ont un impact sur le grain de pollen. En effet, ils ont des conséquences morphologiques, sur la capacité germinative, sur la viabilité du grain de pollen. Avec l'accident nucléaire plus récent de Fukushima, mais aussi celui de Tchernobyl, des études ont démontré un impact sur la viabilité et la morphologie du grain de pollen (34).

La présence d'espèces réactives à l'oxygène (ERO) peut aussi avoir un impact sur l'allergénicité du grain de pollen. En effet, ces ERO peuvent entraîner des réactions allergiques à la suite d'une réaction inflammatoire et d'importants dommages cellulaires après l'inhalation d'un grain de pollen.

Cela dit, la corrélation entre l'impact des différents polluants et leurs conséquences sur l'allergénicité du grain de pollen reste un domaine sur lequel nos connaissances sont encore insuffisantes.

III. L'impact de la pollution atmosphérique sur les plantes

Comme l'Humain, les plantes et l'écosystème sont très fortement touchés par la pollution atmosphérique. Chaque plante aura une réponse différente face à un polluant quelconque. Cette pollution peut influencer les caractéristiques physiologiques ainsi que biochimiques de la plante. Ces perturbations, qu'elles soient directement visibles ou non, auront irrémédiablement un impact sur l'ensemble de l'écosystème. Lorsque celui-ci est déséquilibré, l'impact est finalement beaucoup plus important. En effet, les impacts peuvent être observés notamment au niveau de l'interaction plante-insecte, ce qui à terme peut compromettre toute une chaîne alimentaire.

Le système de pollinisation n'est pas épargné non plus. En effet, les périodes de pollinisation peuvent être plus longues, des plantes allergènes peuvent être amenées à voir leurs nombres augmenter au détriment d'autres plantes subissant négativement la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique.

Bien que les plantes subissent la pollution engendrée par l'Homme, elles peuvent aussi être une autre source de pollution. En effet, plus fréquemment lors d'importantes chaleurs, les plantes émettent des quantités variables de composés organiques volatils (COV) à cause des conditions de stress. Les raisons pour lesquelles les plantes émettent plus de COV en condition de stress sont encore floues mais sont probablement liées à la réponse et la protection vis-à-vis du stress. Parmi ces composés organiques volatils, nous pouvons citer l'exemple des benzénoïdes qui sont des COV dans les parfums. Ainsi, la végétation est une source très importante de COV(35).

Les COV qui peuvent être eux-mêmes des précurseurs de gaz à effet de serre entraînent donc des effets considérablement importants sur la couche d'ozone. Il s'en suit donc un effet d'aggravation sur la végétation et l'impact sera donc général, c'est-à-dire sur tout l'écosystème et donc de façon directe ou indirecte des effets sur l'Homme.

1) Physiologie de la pollution de la plante

C'est par l'intermédiaire des feuilles que la pénétration de polluant a majoritairement lieu. Principalement par les stomates, les polluants de type gazeux empruntent la même voie que le dioxygène ou le dioxyde de carbone.

Cependant, les polluants plutôt organiques seront absorbés par la cuticule qui est la couche externe. La réaction qu'aura la plante lors du contact avec un polluant dépendra de sa nature mais aussi du polluant en question.

a) Les divers effets de l'ozone

Avec son pouvoir très oxydant, l'ozone, lorsqu'il se trouve dans la basse atmosphère (entre 0 et environ 10km) est un polluant. À cette altitude, il est aussi bien toxique pour l'Homme que pour l'écosystème.

i. L'effet de concentration basse en haute atmosphère

Bien que polluant lorsqu'il est en basse atmosphère, lorsque la concentration d'ozone diminue ou disparaît au niveau de la stratosphère, il ne peut plus remplir ses fonctions de protection. En effet, en filtrant les UVC, l'ozone protège l'ensemble des êtres vivants. Les UVC sont effectivement connus pour être profondément néfastes pour l'humain en provoquant des cancers de la peau, une affection du système immunitaire, etc. Les végétaux ne sont pas épargnés.

La destruction de la couche d'ozone, c'est-à-dire son amincissement ou même sa disparition totale dans certaines zones du globe est la conséquence directe de l'activité humaine. En effet, la libération dans l'atmosphère de gaz à effet de serre à pour conséquence de détruire la couche d'ozone. Parmi, ces acteurs, nous avons les CFC ou chlorofluorocarbures, le méthane, le CO₂, etc.

Les effets d'un trou dans la couche d'ozone peuvent être directs, mais ils peuvent aussi être indirects. En effet, un trou dans la couche d'ozone peut contribuer au réchauffement climatique, et ce de plusieurs manières.

En effet, les rayons qui sont censés être arrêtés par la couche d'ozone finissent par être absorbés au niveau de la surface terrestre, ce qui pourrait contribuer à un réchauffement climatique, même minime. L'impact sur le réchauffement climatique est surtout provoqué par les polluants qui provoquent justement des trous dans la couche d'ozone (36). Ces gaz à effet de serre ont justement pour conséquence un réchauffement climatique. Par exemple, les CFC interceptent de façon importante les infrarouges.

Les effets les plus importants à retenir ici étant le réchauffement climatique provoqué par l'ozone. Celui-ci ayant un impact considérable sur la plante ainsi que sur sa pollinisation.

ii. L'effet de concentration élevé dans l'atmosphère basse

Les manifestations d'une concentration élevée d'ozone en basse atmosphère sont visibles au niveau des feuilles sur lesquelles sont observées des nécroses. Ce phénomène peut s'expliquer entre autres par le stress oxydatif provoqué par l'ozone. Cette exposition, lorsqu'elle est chronique, peut entraîner la sénescence de la plante en question (37). L'activité photosynthétique des plantes est aussi très fortement compromise.

Les impacts sont donc très importants en agriculture, provoquant des pertes de productivité et donc des coûts économiques très importants.

b) Les effets du dioxyde de carbone sur la plante

Nous savons que le dioxyde de carbone a des effets directs sur le pollen. Malheureusement, le dioxyde de carbone a aussi des effets sur les autres sphères des pollinoses. En effet, au-delà d'avoir une influence négative sur l'allergénicité du pollen de façon directe, il a aussi des conséquences sur la plante en elle-même, mais aussi sur sa pollinisation, de façon directe et indirecte.

La pollution Atmosphérique

Contrairement à l'humain qui inspire du dioxygène et expire du dioxyde de carbone, les plantes absorbent le CO_2 en présence de rayons UV pour rejeter dans l'atmosphère du dioxygène. Ainsi, l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère a un impact direct sur la plante, mais l'étude de la quantification de l'impact du CO_2 sur les végétaux est parfois compliquée à mettre en évidence en raison d'importantes difficultés expérimentales.

De récentes études ont cependant réussi à démontrer un lien entre les concentrations en dioxyde de carbone et la pollinisation. C'est le cas du chêne du Japon (*Quercus acutissima*) qui a été placé par des chercheurs dans de grande sphère (ou chambre) dans lesquelles les concentrations en dioxyde de carbone étaient contrôlées(38).

Ainsi, le chêne du Japon a été mis dans trois sphères avec des concentrations croissantes en CO_2 :

- 1^{ère} sphère : Concentration normal en CO_2 , soit 400 ppm (x1)
- 2^e sphère : Concentration en CO_2 à 560 ppm (x1,4)
- 3^e sphère : Concentration en CO_2 à 720 ppm (x1,8)

Pour évaluer les différents impacts des concentrations croissantes de CO_2 , des chatons, c'est à dire une inflorescence, sélectionnés par arbres ont été recueillis. Ensuite, le nombre de grains de pollen par chaton ainsi que leur poids ont été calculés. Les caractéristiques des pollens ont également été étudiées. Le nombre total de grains de pollen par arbre a été estimé en multipliant le nombre de chatons observés par le nombre pollen par chaton sélectionné.

Les comptages ont montré une augmentation significative de près de 350 à 1300% du nombre de pollens avec des concentrations supérieures à 400 ppm (x1).

Les chercheurs ont aussi mis en évidence une légère augmentation de la taille des grains de pollen en fonction de la concentration en CO_2 . L'explication de cette augmentation reste néanmoins inconnue.

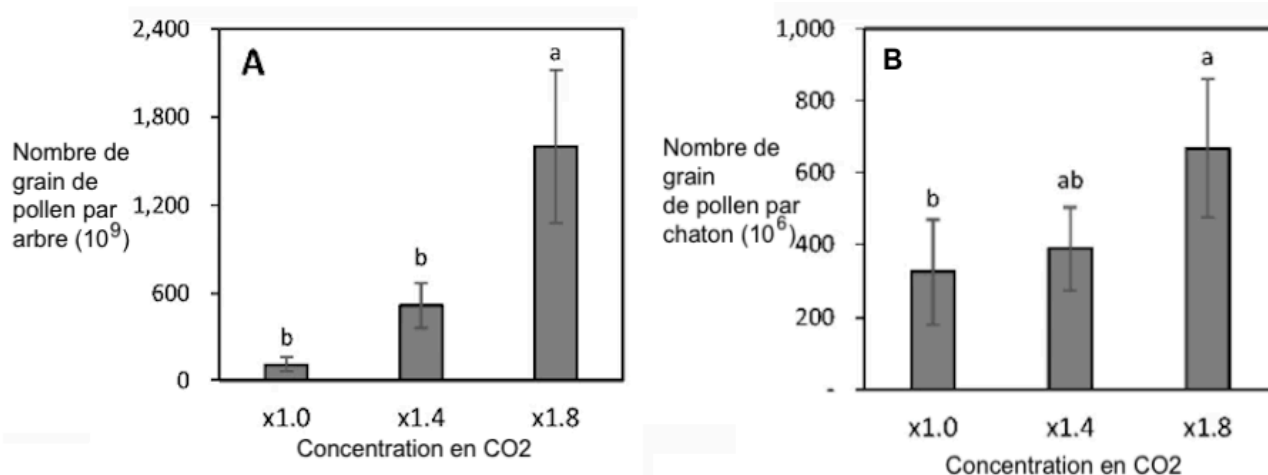


Figure 9 : (A) Estimation du nombre de grains de pollen par arbre (10^9) en fonction des concentrations en CO_2 (B) Nombre de grains de pollen par chaton (10^6) en fonction des concentrations en CO_2 (38).

La pollution Atmosphérique

De toute évidence, les résultats ci-dessus démontrent une corrélation importante entre le niveau de dioxyde de carbone et la pollinisation.

En effet, à des concentrations 1,4 fois au-dessus de la normale, nous observons une augmentation de 353% du nombre de pollens est observée. À des concentrations en CO₂ 1,8 fois au-dessus de la normale, le nombre de pollens est de près de 1300% supérieur à la normale.

Aussi, des concentrations significativement différentes en teneur de protéine allergènes à la surface du pollen sont observées, les effets pour l'individu sont ainsi loin d'être négligeables. En effet, les chercheurs ont aussi réussi à mettre en évidence une augmentation significative de la teneur en protéine allergène sur le pollen pour des concentrations supérieures à 1,4 fois la concentration normale en CO₂. Cependant, ces teneurs en protéines allergènes n'étaient pas significativement différentes entre une atmosphère à 560 et 720 ppm.

Un autre effet de la concentration croissante du dioxyde de carbone est aussi une tendance à la hausse du diamètre des grains de pollen.

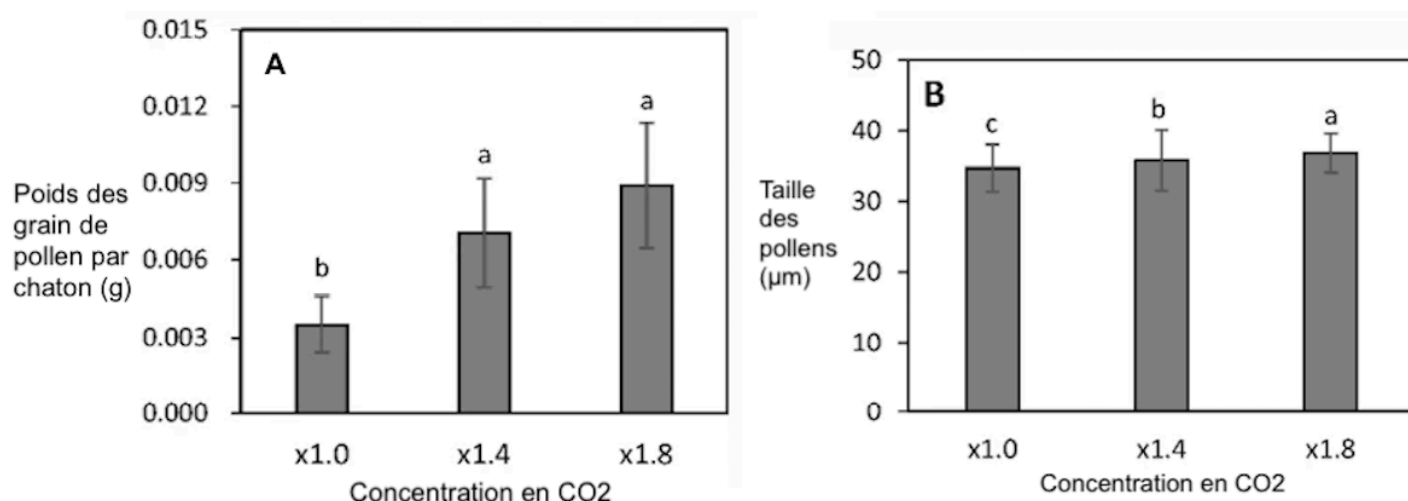


Figure 10 (A) Poids des grains de pollen par chaton en gramme en fonction de la concentration en CO₂ (B) Tailles des pollens en µm en fonction des concentrations en CO₂ (39)

La variabilité inter espèce ne nous permet pas de généraliser ces résultats à l'ensemble des plantes. Pour certaines plantes, l'impact du CO₂ n'aura pas autant d'importance, pour d'autres, l'impact pourrait être plus important.

L'ambrosie, l'espèce à abattre en France n'observe par exemple pas une augmentation aussi importante de sa pollinisation. Cependant, même si il n'est pas aussi important, nous pouvons observer une augmentation de la pollinisation de près de 320% pour des augmentations de la concentration en CO₂. La fléole, elle aussi très présente en France et avec un risque et un potentiel allergisant très élevé, augmente sa production de pollen de près de 200% pour des concentrations de CO₂ de 400 à 800 ppm (39). Cependant, même si l'augmentation de la production de pollen par l'ambrosie et le fléole n'a pas été aussi importante que celle du Chêne du Japon, ils ont respectivement enregistré une augmentation de 90 et 190% de leur concentration en protéine allergène.

Ainsi, sans même inclure les autres polluants, le dioxyde de carbone à lui seul augmente considérablement le nombre de pollen ainsi que leur agressivité.

2) Les effets du réchauffement climatique sur la plante

a) Le réchauffement climatique

L'étude de l'impact de concentrations élevées en dioxyde de carbone nous permet de simuler le comportement des végétaux face aux niveaux futurs de CO₂ atmosphérique. En effet, il nous est assez facile de prédire le niveau dans un futur plus ou moins proche des concentrations en dioxyde de carbone.

Les concentrations en dioxyde de carbone ont littéralement explosé ces dernières années. Des valeurs de plus en plus élevées, de triste record battu d'année en année sont enregistrées. En 2020, des taux allant jusqu'à 410 ppm sont enregistrés. Grâce à nos connaissances en géologie, le prélèvement de sédiments et de carottes glacières démontre que ces taux n'ont jamais été atteints depuis plusieurs millions d'années.

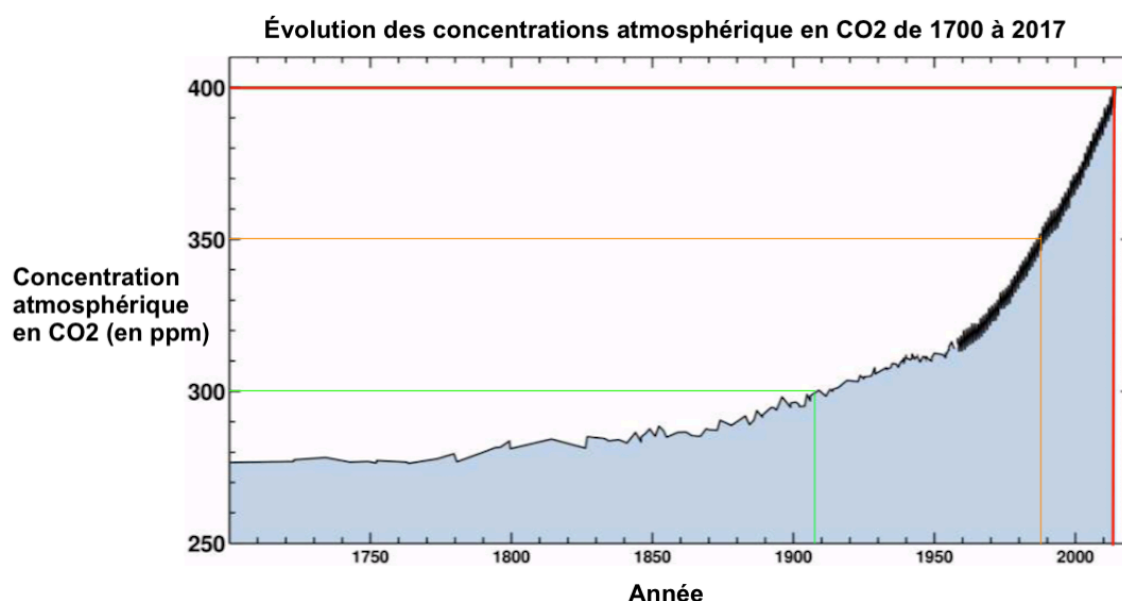


Figure 11 Evolution des concentrations en dioxyde de carbone dans l'atmosphère de 1700 à 2017. L'enregistrement et l'estimation des taux de CO₂ depuis l'âge préindustrielle permettent d'avoir un aperçu de cette très forte augmentation, particulièrement importante depuis ces dernières décennies (40)

De nos jours, le trafic routier ainsi que le confort thermique qui utilisent les combustibles fossiles entraînent d'importants rejets de CO₂ dans l'atmosphère. En 2019, les rejets de dioxyde de carbone issus de l'ensemble de l'activité humaine sont estimés à plus de 40 milliards de tonnes (41). Ces importantes émissions ont fait passer les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère de l'ordre de 270 ppm lors de l'air préindustriel à plus de 400 ppm en 2020.

Comme nous le savons, le dioxyde de carbone est un des principaux gaz à effet de serre avec le méthane. En effet, le dioxyde de carbone absorbe les rayonnements infrarouges et donc la chaleur, ce qui contribue à un réchauffement. Donc une augmentation des concentrations en dioxyde de carbone dans l'atmosphère entraîne irrémédiablement un réchauffement des températures de l'atmosphère et donc de la surface de la terre.

La pollution Atmosphérique

Ces températures augmentent en suivant l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Malheureusement, ces augmentations de température continuent à battre toutes les années de nouveaux records.

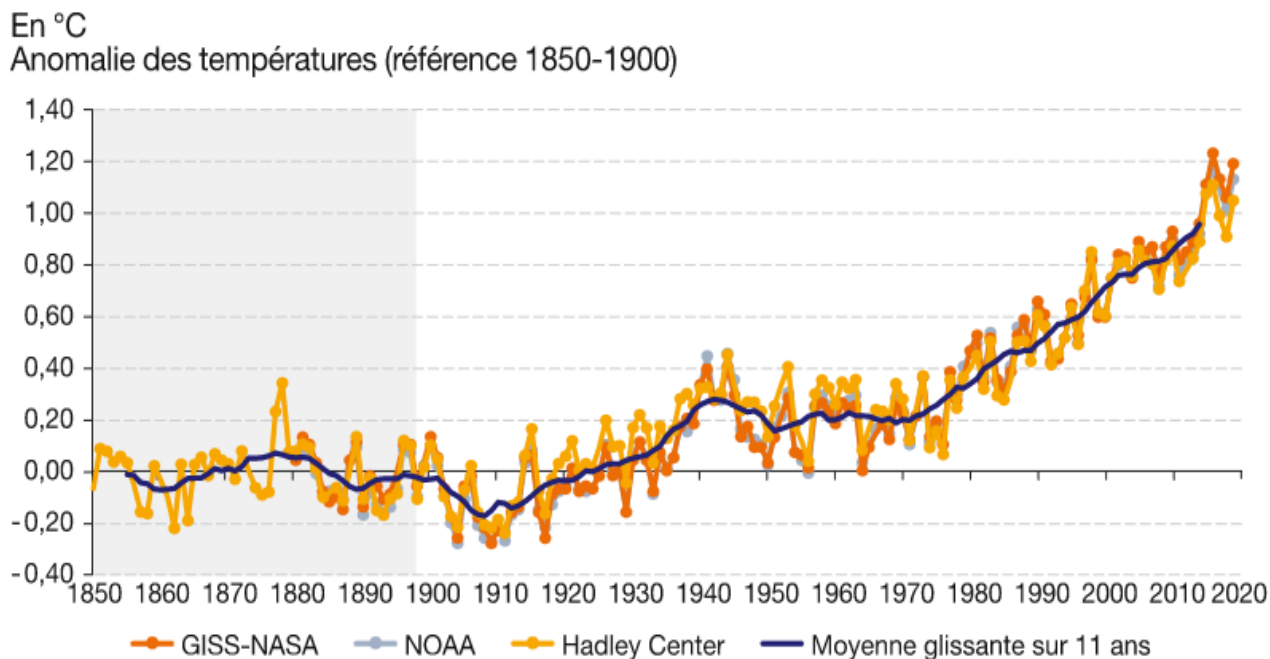


Figure 12 Évolution des anomalies de température, c'est à dire de l'écart par rapport à la moyenne de 1850 à 2020(42).

Les différentes sources de relevés des températures permettent d'avoir une moyenne glissante. Ainsi, il y a la mise en évidence d'une très nette augmentation depuis les années 1950. En conclusion, l'impact du dioxyde de carbone sur le réchauffement climatique est très bien connu et documenté.

Parmi les nombreux effets du CO₂ sur les pollinoses, nous pouvons en citer un qui est totalement indirect. En effet, l'augmentation du dioxyde de carbone provoque un effet de serre, et donc un réchauffement climatique. C'est ce réchauffement climatique qui va avoir une conséquence sur la pollinisation.

Quelque soit les acteurs du réchauffement climatique, celui-ci a un impact très important sur l'écosystème, et en particulier sur la pollinisation. En effet, qui dit réchauffement climatique, dit période chaude plus longue. Des périodes chaudes plus longues. Comme nous le savons, ce sont pendant les périodes chaudes que les plantes pollinisent. De surcroît, une augmentation des durées de période chaude entraîne logiquement des périodes de pollinisation plus longues.

Les dates de floraisons ainsi que de pollinisation des espèces pollinisatrices sont plus tôt dans l'année, et se terminent plus tard. Nous pouvons citer par exemple l'exemple du frêne, du cyprès, du bouleau, qui se sont vu avoir des périodes de pollinisation plus longue.

b) Des effets déjà très visible

L'année 2020 a justement été une période de pollinisation très élevée sur tout le territoire français. Malheureusement la plus élevée depuis le début des mesures des index polliniques¹. Ceci s'expliquant par les conditions climatiques très favorables à la pollinisation(43).

Par exemple, lorsqu'on met en parallèle l'index pollinique annuel et le réchauffement climatique, nous observons une importante corrélation.

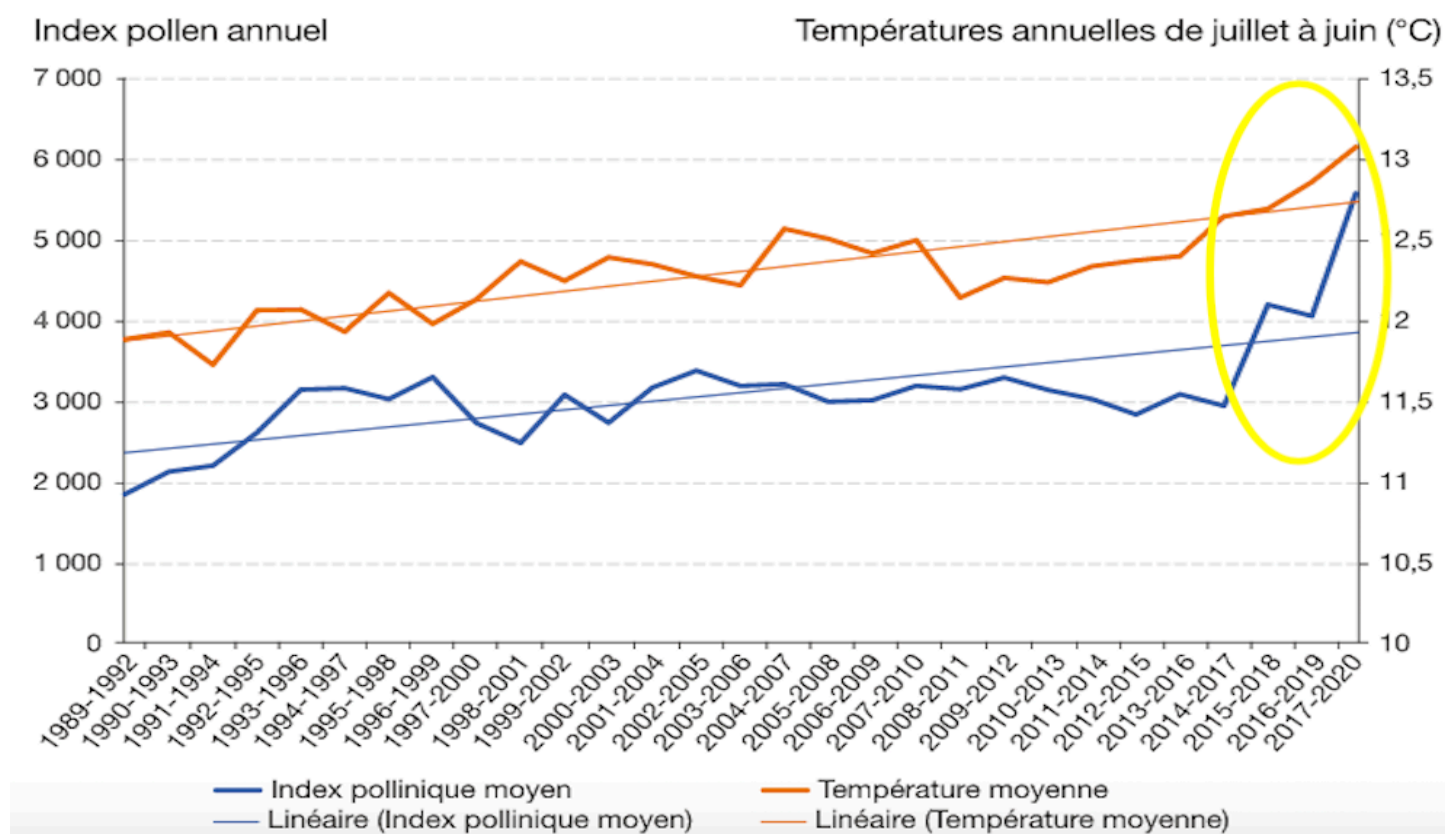


Figure 13 : Index pollinique annuel du bouleau et évolution des moyennes de température annuelle de 1989 à 2020 dans six villes françaises (Lyon, Strasbourg, Paris, Amiens, Toulouse et Montluçon) (44).

La figure 13 indique une importante corrélation entre la hausse des températures annuelles et la pollinisation du bouleau. Depuis ces dernières années, tout particulièrement depuis 2015, l'index pollinique du bouleau a connu une augmentation très importante. En remontant plus loin, nous voyons en effet que la quantité moyenne de pollens émis par le bouleau depuis une trentaine d'année a pratiquement doublé.

¹ L'index pollinique annuel est la mesure de la quantité moyenne de pollens dans l'air sur une année. Il s'agit du nombre de pollens par mètre cube d'air. L'une des manières de calculer l'index pollinique est le comptage sur 24h du nombre de pollens collés à une surface ou une tige préparée.

La pollution Atmosphérique

L'augmentation de l'index pollinique s'explique aussi par le fait que les plantes émettent du pollen plus tôt, et finissent d'en émettre plus tard qu'auparavant.

Cette augmentation des températures n'a fait qu'augmenter, et va malheureusement continuer à augmenter dans le futur.

La période propice à la pollinisation a été rallongée de près de 11 jours en l'espace de 50 ans(45).

Par exemple, le cèdre du japon (*Cryptomeria Japonica*) présente une période de pollinisation qui s'est avancée d'un mois en 20 ans.

En prenant l'exemple de la ville de tours, nous pouvons observer que l'apparition des premiers pollens par espèce peut être parfois beaucoup plus tôt qu'auparavant (46).

c) Un futur pas si incertain

Avec le réchauffement climatique, des prévisions peuvent être réalisées pour des futurs plus ou moins lointains (45).

En établissant des estimations de concentration de dioxyde de carbone les prochaines années, les effets futurs du réchauffement sur la pollinisation peuvent être déduits. Ainsi, au cours des années à venir, nous aurons des périodes où les plantes produisent plus de pollen en moins de temps, pendant plus longtemps, plus allergisant, et sur une plus grande répartition géographique.

En effet, le réchauffement climatique aura pour conséquence de changer l'écosystème que nous connaissons. Nous risquons ainsi de trouver plus d'écosystèmes méditerranéens et aquitains qui se développeront dans les régions actuellement plus tempérées.

Par exemple, favorisé par les conditions climatiques, le chêne vert, présent surtout dans le bassin méditerranéen pourrait remonter au nord en France d'ici 2050. Ainsi, d'après les estimations du réchauffement climatique pour ce siècle, le chêne vert (*Quercus ilex*) pourrait très certainement atteindre et dépasser le Centre Val-de-Loire avant 2100.

Dans ce futur de plus en plus réaliste, on peut aussi observer des avancées importantes dans la saison de pollinisation.

La pollution Atmosphérique

Dans une estimation pour une période entre 2000 et 2099, nous retrouvons les résultats suivants :

Tableau II Avance des périodes de pollinisation de certaines espèce entre 1970 et 2000 et estimation du nombre de jours d'avance de la période de pollinisation entre 2000 et 2099 (45).

	Avance entre 1970 et 2000	Avance estimé entre 2000 et 2099
Frêne (<i>Fraxinus</i>)	3 jours d'avance	19 jours d'avance
Bouleau (<i>Betula</i>)	10 jours d'avance	13 jours d'avance
Graminées (<i>Poacées</i>)	6 jours d'avance	11 jours d'avance
Armoise (<i>Artemisia</i>)	9 jours d'avance	15 jours d'avance
Chêne (<i>Quercus</i>)	18 jours d'avance	14 jours d'avance

Les prédictions du devenir des pollinoses semblent donc toutes converger. En effet, l'évolution de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère aura très probablement un impact important sur les pollinoses. Bien que ce soit déjà le cas, les pollens seront toujours plus nombreux, plus agressifs, perdureront plus longtemps, et des plantes allergènes émergeront dans de nouvelles régions, profitant du changement climatique pour étendre leur expansion géographique.

Malheureusement le dioxyde de carbone, bien que facteur favorisant des allergies en France et dans le monde, est loin d'être le seul impliqué dans l'augmentation des pollinoses.

IV. L'impact de la pollution atmosphérique sur la santé humaine

Au cours de notre vie, nos poumons inhalent plusieurs dizaines de millions de litres d'air. Par jour, c'est près de 10 à 13000 litres d'air que nous inspirons. C'est pour cette raison que la qualité de l'air inspiré peut avoir une énorme importance sur notre santé.

L'air que l'on respire, lorsqu'il n'est pas pollué, est composé d'azote à hauteur de 79% et d'oxygène à hauteur de 20%. Le dioxyde de carbone ne représente quant à lui qu'un pourcentage inférieur à 0,5 de l'air inhalé.

De par ce débit respiratoire très important, nos poumons sont donc l'une des portes d'entrée principales de notre corps face aux composés étrangers

1) Physiologie respiratoire

a) Le système respiratoire

L'appareil respiratoire est divisé en deux parties. D'une part, les voies aériennes supérieures (Larynx, pharynx, bouche, cavités nasale et buccale), et d'autre part les voies aériennes inférieures (trachée et poumons contenant bronches et bronchioles).

Situés dans la cage thoracique, les poumons sont entourés de la plèvre. Le poumon gauche est constitué de 2 lobes et le poumon droit est composé, quant à lui, de 3 lobes (47).

L'air transite par les voies aériennes supérieures (VAS) qui ont pour rôle d'hydrater, de réchauffer, mais aussi de filtrer tout composant étranger tels que des polluants de l'air. Ils sont en effet captés par l'épithélium mucociliaire des VAS. Une fois que l'air arrive dans les voies inférieures en traversant la trachée, les bronches puis les bronchioles, des échanges gazeux sont effectués au niveau des alvéoles pulmonaires.

Au niveau des bronches, on retrouve des cellules capables de produire du mucus et des cellules ciliées, permettant à ce mucus de se déplacer vers le haut de la sphère respiratoire afin de l'évacuer (48).

En descendant profondément dans la sphère respiratoire, on observe que les structures épithéliales et le diamètre des conduits se rétrécissent. Lorsque l'on atteint les alvéoles, la couche épithéliale est très fine, nous ne retrouvons plus de cellules sécrétant du mucus et des cellules ciliées. À ce niveau, les bronchioles mesurent moins de 1mm et les alvéoles ne mesurent plus que 250µm de diamètre en moyenne. Bien que faibles, avec environ 300 millions d'alvéoles, les échanges gazeux entre l'air et le sang s'effectuent sur une surface totale très étendue. Cette importante surface d'échanges permet d'assurer un apport élevé d'oxygène.

Ces échanges gazeux se réalisent à travers une barrière alvéo-capillaire, fine couche permettant d'assurer une diffusion optimale des gaz.

b) Épuration des voies aériennes

C'est par la sécrétion de mucus ainsi que par le mouvement des cils, aux fins de le remonter dans la sphère respiratoire, qu'une épuration des voies aériennes se réalise. Le mucus capte et piège les polluants de l'air et le battement des cils permet la remontée de ce mucus jusqu'aux voies aériennes supérieures où il sera avalé, ou bien expectoré. C'est ce que l'on appelle la clairance mucociliaire (49).

La pollution Atmosphérique

Elle peut être altérée avec l'âge, dans le cas de certaines pathologies, mais elle peut également être détériorée par des polluants gazeux ou particulaires, comme par exemple le tabac ou les polluants atmosphériques.

Constatons alors que pour certaines pathologies comme l'asthme sévère, il y a, de même, une importante altération de la clairance mucociliaire.

L'épuration des voies respiratoires s'observe également au niveau alvéolaire. La clairance alvéolaire joue un rôle considérable dans l'épuration des voies pulmonaires (49). En effet, les alvéoles contiennent des macrophages ayant pour rôle la phagocytose, de manière non spécifique, des polluants contenus dans l'air.

En tout état de cause, des macrophages sont présents en permanence dans les alvéoles. Pourtant, dans le cas de processus inflammatoire, le nombre de macrophages peut augmenter.

Les deux clairances ont des durées d'action variables. D'une part, la clairance mucociliaire permet l'élimination de contaminants de l'air en 36 à 48 heures. D'autre part, la clairance alvéolaire est un processus plus long car elle permet une élimination d'un contaminant en quelques jours à plusieurs mois.

c) Les dépôts particuliers

L'air que nous inspirons contient une quantité variable de particules atmosphériques. Parfois, elles peuvent pénétrer profondément dans nos voies aériennes. Ce dépôt particulaire dépend de la taille mais aussi de la masse. Ces particules atmosphériques se trouvent habituellement sous forme d'aérosol dans l'air.

Les particules les plus volumineuses ne peuvent pas atteindre les voies aériennes inférieures en raison de leur grande taille. Tandis que les particules plus petites, ayant un diamètre inférieur à 10 μ m, peuvent pénétrer dans des voies plus profondes. Le dépôt de ces particules dépend de plusieurs facteurs, comme par exemple l'état de santé de la personne, autrement dit si cette dernière est atteinte d'une pathologie.

Les particules qui possèdent des diamètres entre 1 et 100nm ont la capacité de se déposer dans toute la sphère respiratoire. Cependant, en temps normal, elles se retrouvent au niveau alvéolaire, ou encore au niveau extra thoracique de l'appareil respiratoire.

Les particules les plus volumineuses (>10 μ m) se déposent principalement au niveau naso-pharyngé et dans une moindre mesure au niveau alvéolaire.

Pour rappel, le grain de pollen a une taille qui peut varier de 10 à 150 μ m de diamètre selon les espèces. Dans la plupart des cas, lorsqu'ils ne sont pas « cassés » par la pollution, les grains de pollen se retrouvent piégés dans les fosses nasales.

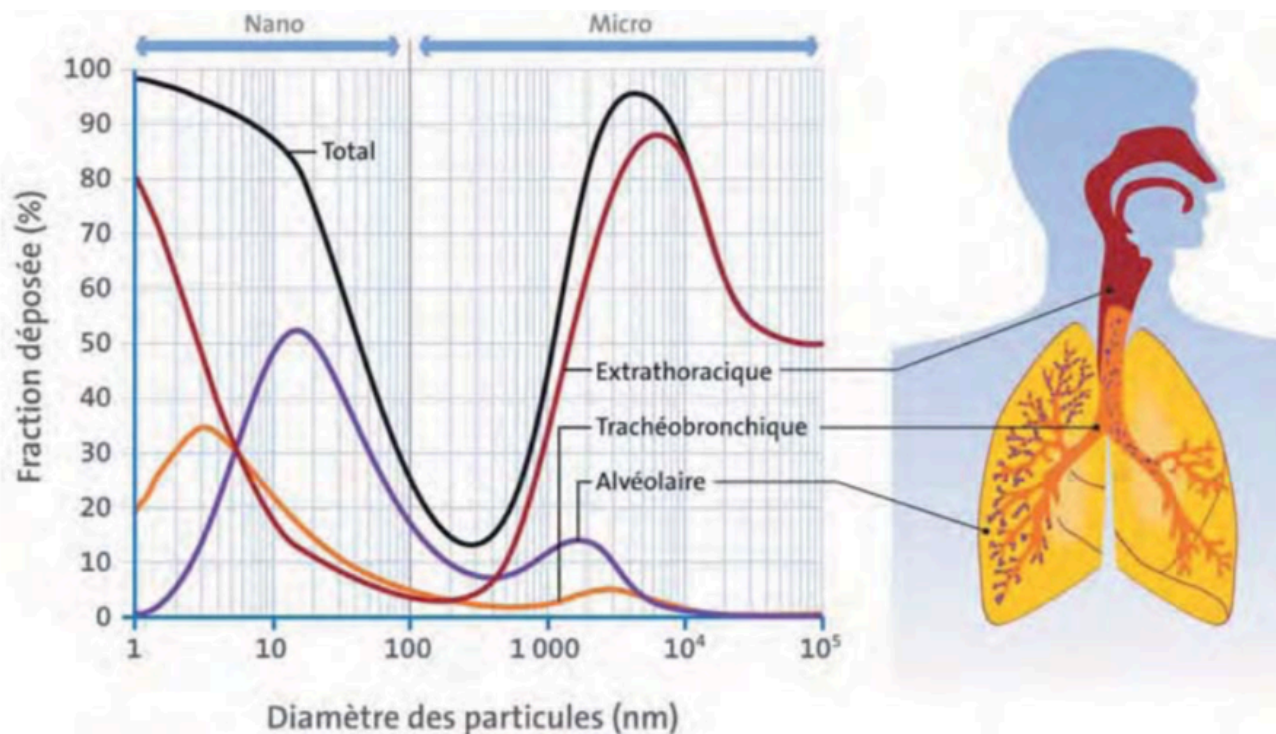


Figure 14 Pourcentage moyen des particules déposées dans les voies aériennes en fonction de leur diamètre (50).

d) L'inflammation

L'inflammation est une réponse physiologique de l'organisme à un dégât ou une agression d'un tissu. Au niveau pulmonaire, un composé présent dans l'air inhalé et qui ne peut être éliminé par le système d'épuration pulmonaire, peut provoquer une inflammation du tissu pulmonaire. Cette inflammation se traduit par le recrutement par le sang de médiateurs, tels que les polynucléaires (neutrophile, basophile et éosinophile), les macrophages, ou encore les mastocytes qui libèrent à leur tour des médiateurs pro-inflammatoires entraînant une chimiotaxie de lymphocytes, fibroblastes et autres cellules.

2) Impact des différents polluants

a) Le dioxyde d'azote

Beaucoup plus toxique que le monoxyde d'azote, l'inhalation de dioxyde d'azote en grande concentration ($>2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) peut créer d'importantes lésions et inflammations des voies aériennes profondes.

De plus, comme tous les gaz, il a la capacité de passer dans le sang. Le dioxyde d'azote engendre d'importantes irritations de l'appareil respiratoire mais également des yeux.

Le dioxyde d'azote peut être à l'origine d'une hyperréactivité bronchique, alors même que le patient n'est atteint d'aucune pathologie asthmatique. En conséquence, en cas d'antécédents asthmatiques, de faibles concentrations en dioxyde d'azote peuvent entraîner une hyperréactivité, responsable de crises d'asthme plus fréquentes (51,52).

La pollution Atmosphérique

Principalement issu d'échappements de véhicules, le dioxyde d'azote contribue, en concert avec les autres polluants, à aggraver les maladies respiratoires.

Au-delà de ses effets sur les muqueuses, le NO₂ peut entraîner des actions néfastes sur les cellules ciliaires, altérant la fonction d'épuration. De même, in vitro, ce gaz a aussi pour effet d'inhiber l'action des macrophages alvéolaires(53).

b) L'ozone

Composé de trois atomes d'oxygène, l'ozone a un important pouvoir oxydant. En pénétrant dans les voies respiratoires profondes, ce gaz a la capacité d'interagir avec de nombreux constituants cellulaires.

L'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère est associée à un accroissement d'hospitalisations dues à des pathologies respiratoires mais aussi à une recrudescence de la mortalité (54).

Ces effets sur la sphère respiratoire, dépendent de la concentration, de la durée d'exposition et de facteurs de comorbidité.

Même à des concentrations très faibles, l'ozone peut provoquer une inflammation et une hypersensibilité respiratoire. Ce gaz irrite aussi bien les voies respiratoires que les yeux lorsque son exposition est plus longue.

Des symptômes, tels qu'une toux, un essoufflement, ou encore une dyspnée, peuvent être visibles aux alentours de 0,5ppm.

Tout comme le dioxyde d'azote, ce gaz a encore pour effet de diminuer la clairance mucociliaire, atténuant ainsi l'élimination d'autres polluants.

À faible concentration, mais avec une exposition chronique, il y aurait, non seulement, une augmentation de l'apparition de pathologies asthmatiques, mais encore, une intensification des exacerbations (51,53).

c) Les matières particulaires

Les particules en suspension dans l'air peuvent être des mélanges hétérogènes de particules liquides ou bien solides. Malheureusement, ces particules représentent un plus grand danger pour la santé humaine que la plupart des polluants, tel que l'ozone. Les particules en suspension dans l'air ont une grande diversité et peuvent inclure des carbones élémentaires, organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques), biologiques, mais aussi des sulfates et des nitrates.

L'exposition à des particules en suspension dans l'air, parfois impossible à éviter, est source de nombreux problèmes de santé en France, mais également à travers le monde. En effet, de nombreuses études démontrent des corrélations entre l'exposition à des particules en suspension et la survenue de morts prématurées de personnes atteintes de pathologies pulmonaires ou cardiaques. Elle entraîne également des aggravations d'asthme ou de la fonction pulmonaire et donc des admissions hospitalières. Elle provoque également une importante irritation des voies aériennes pouvant entraîner des difficultés respiratoires (26,55).

Par conséquent, l'exacerbation de l'asthme allergique par les matières particulaires est un problème majeur dans la prise en charge des pollinoses.

Nous avons précédemment vu que des interactions et liaisons entre le pollen et les particules en suspension peuvent avoir lieu de différentes manières. Les effets des particules en suspension sur les différentes sphères respiratoires sont bien connus. Ainsi, lorsqu'un pollen allergène est accompagné de particules en suspension, on observe une synergie de réactions inflammatoire pouvant aggraver parallèlement allergie et asthme.

Pour conclure, les matières particulaires sont bien connues pour leurs effets très nocifs. Cette toxicité augmentant à mesure que la taille des particules diminue (56).

d) Les hydrocarbures aromatiques

Considérés comme étant des particules en suspension dans l'air, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) représentent à eux seuls une catégorie de polluants extrêmement nocifs (57). Ayant pour source importante l'échappement des véhicules diesel, les HAP entraînent des effets pro-allergiques.

En effet, chez des individus possédant un terrain atopique et n'ayant jamais développé de maladie allergique, des chercheurs ont mis en évidence que les HAP ont une action sur les polynucléaires basophiles (PNB). Indépendamment des allergènes, les HAP agissent comme des adjuvants et peuvent jouer sur l'activation des PNB. Cela a donc pour conséquence d'entraîner une inflammation allergique par la libération de médiateurs pro-allergiques.

Pour arriver à ce résultat, des chercheurs ont stimulé des échantillons sanguins de donneurs allergiques et de témoins avec une protéine très allergène du grain de pollen de bouleau : le BetV1. Une moitié de ces échantillons a été mélangée avec des HAP.

Le résultat a permis de conclure qu'avec un niveau d'exposition respectant les normes établies, il y avait une augmentation de l'activation des PNB. En effet, en présence d'HAP, la sécrétion d'interleukine (IL) est significativement augmentée par les PNB. Etant donnée que les IL jouent un rôle dans le déclenchement, l'aggravation et l'entretien d'une réaction allergique, il en est déduit un lien entre l'exposition à des HAP et le déclenchement de réaction allergique. Une réaction allergique peut être exacerbée par la présence d'HAP (57).

e) Le tabagisme

i. Une pollution atmosphérique bien réelle

Le tabagisme ne représente pas une forme de pollution atmosphérique aussi importante que les émissions de gaz à effet de serre par exemple. L'impact de l'émission de fumée de cigarette dans l'air ne représente pas les mêmes proportions que l'émission de tout le trafic maritime.

Cependant, il n'en demeure pas moins toxique. En effet, le tabac est une forme de pollution de l'air qui peut se définir comme une altération de la qualité de l'air, principalement caractérisée par la présence de polluants chimiques, physiques ou même biologiques.

Dans ce cas de figure, il est vrai que la pollution atmosphérique, à proprement parler, est une pollution indépendante de la volonté personnelle, contrairement au tabac qui est une inhalation, plus ou moins volontaire de l'individu. Cela dit, le tabagisme ne touche malheureusement pas que les individus consommant du tabac.

Le tabagisme passif est une forme de pollution atmosphérique aussi importante et grave que d'autres polluants actuellement retrouvés dans l'air.

Dans le monde, un peu moins de 20% de l'humanité est fumeur. Cela représente 1,25 milliards de personnes, soit presque une personne sur cinq. En Europe, une personne sur quatre qui fume de manière régulière (58).

ii. Les nombreux effets du tabagisme

Ce n'est pas une surprise, le tabac est néfaste pour la sphère respiratoire. Ses effets, à long terme, ne sont plus à prouver. Il s'agit, entre autres, du développement de pathologies comme la BPCO (broncho-pneumopathie chronique obstructive), des cancers de type bronchique, ou encore la survenance d'asthme chez l'enfant et l'adulte. De nombreuses études et méta-analyses démontrent les effets très nocifs sur la survenue de ces pathologies.

Il est ainsi reconnu que les fumeurs sont entre 1,6 à 1,8 fois plus susceptibles de développer un asthme par rapport à des adultes n'ayant jamais fumé.

L'exacerbation d'un asthme est aussi fortement impactée par le tabagisme, qu'il soit actif ou passif. En effet, un adulte asthmatique a en moyenne 1,7 fois plus de risque de subir une exacerbation qu'un adulte non-fumeur.

Le tabagisme passif, surtout lorsqu'il touche des enfants de moins de 15 ans, a des effets tout aussi importants que le tabagisme actif.

Chez les enfants, ces effets peuvent être plus graves que chez des adultes. Ainsi, l'exposition chronique à un tabagisme passif double le risque d'admission hospitalière pour asthme chaque année. Le tabagisme maternel, quant à lui, triple le risque d'admission hospitalière pour asthme (59).

Non seulement, le tabagisme passif irrite la muqueuse respiratoire, mais encore, il peut provoquer une inflammation et jouer sur l'activité immunitaire. De surcroît, l'exposition à un tabagisme passif, notamment en présence d'enfants, peut avoir d'importants effets sur les voies aériennes supérieures et inférieures. La fumée de tabac, possédant des particules de diamètre allant de 0,5µm à 0,01µm, peut pénétrer dans les voies aériennes profondes.

iii. L'asthme allergique et le tabagisme

Parmi les très nombreux effets néfastes du tabagisme actif ou passif, on constate notamment des effets pro-allergiques. En effet, le lien entre allergies et tabac est de plus en plus documenté de nos jours (60). Le tabagisme aggrave les allergies respiratoires, l'asthme allergique, et majore le risque d'allergies aux pollens.

L'interaction entre phénomène allergique et exposition au tabac peut être très variée. Le tabac peut en effet entraîner un stress oxydatif, autrement dit, une réaction pro-allergique des muqueuses des voies aériennes supérieures et inférieures.

De même, le tabac a une action sur les médiateurs pro-inflammatoires. En effet, il augmente l'expression des médiateurs de l'inflammation, tels que les interleukines (IL, les facteurs de nécrose TNF). Au niveau cellulaire, cette libération augmente la production de médiateurs qui provoquent une surproduction de mucus, une altération de la clairance mucociliaire et un recrutement des polynucléaires neutrophiles (PNN) avec une réponse lymphocytaire Th2 favorisée (61).

Dans une maison, si au moins un des parents fume, et ainsi expose l'enfant à un tabagisme passif, alors celui-ci aura 2 à 4 fois plus de risque de développer un asthme ou une allergie plus ou moins sévères (60).

En conclusion, le tabagisme, actif ou passif, favorise le développement, mais aussi la sévérité des pathologies asthmatiques. Il a malheureusement le potentiel de déclencher des crises d'asthme, mais aussi de favoriser l'apparition d'asthme d'origine allergique.

Les grains de pollens, déjà extrêmement allergènes, qui se retrouvent sur une muqueuse déjà fragilisée et irritée par la fumée de tabac, avec un état pro-inflammatoire, peuvent aggraver de façon considérable une allergie préexistante.

L'exposition au tabac peut même développer, chez certains enfants, un asthme allergique.

3) L'asthme allergique et la pollution (62)

Il existe de plus en plus de preuves admettant que les polluants atmosphériques issus du trafic routier induisent une sensibilisation vis-à-vis de pathologies respiratoires comprenant l'asthme mais aussi les allergies (38,52,63,64). Les différents polluants ont divers impacts au niveau de la sphère respiratoire.

Les effets pro-allergiques, communs à tous ces polluants, provoquent, entre autres, une atteinte à la muqueuse des voies respiratoires, une inflammation alvéolaire, un stress oxydant local, une bronchoconstriction, et enfin, à une échelle plus petite, un effet sur le système immunitaire conduisant parfois à des réactions allergiques plus sévères.

Une allergie respiratoire aux pollens peut créer chez un individu de l'asthme, ou bien, s'il est déjà présent, l'aggraver

Cliniquement, l'asthme se traduit par plusieurs caractéristiques :

- Une inflammation du tractus respiratoire, créant un œdème ;
- Une bronchoconstriction diminuant le calibre des bronches, entraînant une diminution du flux d'air ;
- Une hyperactivité bronchique, se manifestant par l'augmentation de la sécrétion de mucus.

Qu'il soit d'origine allergique ou non, un grain de pollen risquera d'exacerber l'asthme. Ainsi, la pollution, qui provoque une symptomatologie asthmatique, ne fait qu'aggraver les effets allergiques du pollen.

a) Inflammation des voies aériennes

Les particules les plus fines ont la capacité de pénétrer profondément les poumons, jusqu'à provoquer des inflammations alvéolaires. Une inflammation alvéolaire peut se traduire par la libération de médiateurs pro-inflammatoires. Il s'agit, du contact de polluants avec les cellules des muqueuses, provoquant la libération de médiateurs, tels que les interleukines IL1-6-8 ou les TNF. Ainsi, on observe une hyperréactivité bronchique pouvant causer des crises d'asthme en cas de contact avec un grain de pollen.

La pollution Atmosphérique

Cette réaction inflammatoire provoquée par les polluants entraîne, par là même, une augmentation de la perméabilité capillaire. Cela provoque une pénétration des polluants et des toxines qui augmenteront l'inflammation déjà présente (65).

Pour conclure, cette inflammation, créée par les polluants, prépare le terrain pour les grains de pollen. Les effets allergiques sont donc plus rapides, plus intense, et peuvent donc durer plus longtemps.

b) Altération de la réponse immunitaire

L'exposition à des polluants, tels que les particules diesel, a pour conséquence l'induction d'une réponse immunologique de type IgE initiale au contact de l'allergène.

De plus, il est désormais reconnu qu'il y a un lien entre l'exposition à des HAPs et la survenue d'une hypersensibilité de Type I ou immédiate. Ainsi, il y a un relargage importante d'histamine mais aussi de réaction IgE dépendante durant l'exposition à des particules diesel par exemple. Tout cela est donc en lien avec la survenue d'asthme allergique(66). Des études ont en effet démontrés que l'exposition à des HAPs sont associés a une augmentation significatif d'asthme allergique chez des populations d'enfant atomiques avec des ruptures de la tolérance du système immunitaire(67).

Par conséquent, il est aisé d'établir un lien entre l'exposition à des polluants atmosphériques et l'augmentation de la prévalences des allergies, plus particulièrement aux pollens.

c) Stress oxydant

Le stress oxydatif est un type d'agression d'une cellule ainsi que de ses constituants. Il y a en effet l'apparition d'espèces réactives à l'oxygène, molécules très instables qui finissent par oxyder les molécules environnantes en les rendant elles aussi instables. Principalement issues des véhicules diesel, ces particules, provoquant un stress oxydatif au niveau cellulaire, sont à l'origine d'une inflammation chronique.

Le stress oxydatif se traduit par la création de radicaux libres, qui peuvent induire d'importants effets au niveau génétique, entraînant parfois des risques cancérogènes.

Les molécules les plus impliquées dans ce stress oxydatif sont l'ozone et les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Ainsi, l'exposition chronique à ce stress oxydant a pour conséquence l'exacerbation d'asthme, entraînant une augmentation d'hospitalisation pour asthme. Tout cela ayant pour impact d'entraîner une mortalité accrue, surtout lors d'un épisode de canicule, durant lequel les polluants et les grains de pollen sont très concentrés dans l'atmosphère.

V. Est-il devenu dangereux de respirer ?

Lorsque tous les effets de la pollution atmosphérique sont passés en revue, il est naturel de se demander comment faire pour éviter d'y être exposé.

Les effets s'observent à diverses échelles.

D'une part, au niveau de la santé humaine, la pollution atmosphérique provoque une inflammation chronique pulmonaire augmentant le risque de développer de l'asthme. De plus, elle facilite le développement d'allergie en stimulant le terrain atopique.

D'autre part, au niveau du pollen, la pollution fragilise le grain de pollen pouvant provoquer la libération de son contenu tout aussi allergène que le grain de pollen lui-même. De plus, les teneurs en protéines allergènes augmentent au contact des polluants atmosphériques, rendant le pollen toujours plus allergène.

Enfin, au niveau de la plante, la pollution atmosphérique augmente la durée de la période de pollinisation et la quantité de pollen pendant une même durée.

L'humain, déjà fragilisé par la pollution, est ainsi exposé à un grain de pollen plus agressif, en plus grande quantité, et pour une durée plus longue.

Certaines études préconisent d'éviter les activités physiques durant les pics de pollution (62). Alors qu'en sera-t-il dans 20ans ? Dans 50 ans ? ou encore dans 100ans ?

Lors de la pandémie mondiale de la COVID-19, l'utilisation du masque a été rendu obligatoire afin de freiner les risques de propagation. La question qui peut alors se poser est son utilité face à la pollution.

Les masques chirurgicaux ne sont pas assez filtrants et efficaces pour offrir une protection suffisante contre la pollution (68). Cependant, lors d'exposition à des polluants urbains, les masques de types FFP2 ou FFP3 ont fait preuve d'efficacité dans des études expérimentales. Pourtant, en conditions réelles, ils peuvent être mal ajustés et donc être inefficaces. Le risque dans cette hypothèse est une longue exposition à la pollution, par un sentiment de fausse sécurité (62,69). Ainsi, les masques de type FFP2 ou FFP3 pourraient aussi avoir une protection vis à vis des pollens.

Partie 4.

Les conséquences

I. Le double impact

La pollution a un double impact sur la santé humaine et sur les allergies aux pollens.

Tout d'abord, les conséquences sur la santé humaine de façon directe. En effet, l'impact de la pollution sur la santé humaine est bien connu. Cependant, les conséquences en terme de santé publique sont un sujet mettant en perspective cet impact. Les effets individuels, bien qu'ils soient connus, ne permettent pas de rendre compte de l'importance des conséquences au niveau de la société.

Par différentes voies, la pollution a un grand impact sur les allergies aux pollens. Au niveau individuel, les conséquences sont de mieux en mieux connues. Cependant, d'un point de vue global, cela se traduit par une augmentation du nombre de personnes allergiques, mais aussi une augmentation du nombre d'allergies sévères pouvant parfois nécessiter une prise en charge urgente.

Ce double impact de la pollution est un coût humain et financier non négligeable pour la sécurité sociale et la santé publique.

La pollution atmosphérique est issue de plusieurs sources liées à l'activité humaine. La mise en évidence de l'effet d'un seul polluant sur l'organisme est plus facile à étudier expérimentalement. Cependant, l'air que l'on respire est un « cocktail » de plusieurs polluants issus de différentes sources. Ainsi, lorsque l'on observe chez un individu des affections aiguës ou chroniques, il est difficile de faire un lien avec un polluant ou une cause. Pour permettre d'établir un lien entre un événement pathologique chez un individu et la présence d'un ou de plusieurs polluants, nous pouvons observer les différences d'états de santé lors de variations ponctuelles de l'émission de certaines sources de pollution.

Par exemple, à court terme, la pollution issue du trafic automobile a un impact important sur la santé respiratoire et peut être la cause d'exacerbation asthmatique et donc d'admission hospitalière. Donc, il peut y avoir une observation du nombre d'admissions hospitalières pour cette cause lors d'une variation ponctuelle de la densité du trafic automobile dans une agglomération pour différentes causes (grève, manifestation, confinement, ...). C'est de cette manière que nous pouvons établir un lien entre la présence d'un ou de plusieurs polluant(s) dans l'atmosphère et la survenue dans la population d'effets sur la santé.

La pandémie mondiale du COVID-19 a eu pour conséquence un confinement strict de près des trois quarts de la population humaine. Ainsi, cet événement peut être considéré comme une expérience humaine de très grande ampleur pour mettre en évidence plusieurs facteurs. D'abord, le rôle de l'humain sur la pollution de l'aire. En effet, le transport routier ainsi que la majorité des usines qui émettent des polluants dans l'atmosphère ont été arrêtés. Ensuite, cela permet la mise en évidence de l'effet de la pollution sur la santé humaine. En effet, la diminution de la pollution a un impact positif sur la santé des habitants, mais dans certaines régions, les pics de pollution après les différents confinements jouent des rôles dans la sévérité des patients atteints du COVID-19.

II. Le coût humain de la pollution

1) Les effets à court terme de l'exposition à la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique peut avoir des conséquences à court et à long terme. Cependant, la frontière entre court et long terme semble être abstrait étant donnée qu'une répétition d'effets à court terme pourra conduire à des effets à long terme. Bien qu'il y ait des pics, la pollution atmosphérique fait plus ou moins partie intégrante de nos vies.

Les conséquences sanitaires de l'exposition à la pollution ne sont pas négligeable car nous pouvons observer des effets respiratoires tels que des baisses de la fonction respiratoire, des exacerbations de maladie préexistante tel que de l'asthme allergique, des atteintes respiratoires et/ou cardiaques pouvant conduire à un éventuel décès.

a) Les morbidités

La majorité des études statistiques se basent sur l'augmentation du nombre d'admissions aux urgences pour établir des liens avec la pollution atmosphérique. Le risque d'admission à la suite d'un pic de pollution se déclare souvent dans les 24h après l'exposition. Ainsi, cela a permis d'établir une corrélation significative entre la pollution de l'air et des hospitalisations pour affection cardio-respiratoire.

À court terme, le risque majeur d'une exposition à la pollution est une exacerbation de pathologies respiratoires ou cardiaques chez des personnes déjà atteintes.

i. Exacerbation asthmatique

Très souvent mise en évidence par l'étude du passage aux urgences, beaucoup d'études mettent en relation l'augmentation de taux de polluants et d'exacerbation d'asthme, qu'il soit d'origine allergique ou non(62,70–73).

Une étude britannique estime une baisse d'environ 6% des valeurs spirométriques¹ à la suite d'une marche de seulement 2 heures dans des zones polluées par des émanations de diesel comparé à des zones vertes(74).

Les enfants atteints d'asthmes mais non traités par les traitements de fond sont plus sensibles aux variations des taux de pollution que les enfants asthmatiques traités par des traitements de fond(73). Ainsi, les traitements de fond semblent diminuer les effets de variations des taux de polluants, mais ne les immunisent pas pour autant. Par exemple, l'exposition à un niveau de $PM_{2,5}$ supérieur à $65 \mu g/m^3$ pendant une journée (*valeur limite* $<25 \mu g/m^3$), conduit à un risque significativement plus élevé de symptômes respiratoires pouvant être graves(75).

Pour des valeurs de PM_{10} supérieur à $150 \mu g/m^3$ sur une journée², ces patients peuvent souffrir d'une baisse de 3 à 6% des fonctions respiratoires.

¹ Les valeurs spirométriques sont les valeurs permettant d'examiner les fonctions respiratoires. La spirométrie permet de contrôler la fonction respiratoire par mesure des volumes d'air mobilisés par les poumons. Elle a pour but de diagnostiquer des pathologies respiratoires tel que l'asthme, la BPCO, etc.

² Pour rappel, le seuil de recommandation pour les PM_{10} est à $50 \mu g/m^3$ et le seuil d'alerte est à $80 \mu g/m^3$

Les conséquences

L'augmentation en une journée des taux de particules en suspension de moins de 10 et $2,5\mu\text{m}$ de seulement $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ peut être à l'origine d'une augmentation de 18% des admissions pour asthme. Les particules fines $\text{PM}_{2.5}$ ont un effet plus important que les particules PM_{10} sur les admissions hospitalières chez les enfants(76).

ii. Exacerbation cardiovasculaire

De même que pour les admissions pour pathologies asthmatiques, les pathologies cardiovasculaires peuvent être documentées en fonction des taux de pollution atmosphérique. L'exposition à des polluants, notamment les particules en suspension, le dioxyde d'azote ou encore le monoxyde de carbone peuvent entraîner des syndromes coronariens pouvant conduire à des infarctus du myocarde.

Les admissions pour AVC sont souvent associées à des augmentations de dioxyde de soufre, de monoxyde de carbone et de matières particulaires dans l'atmosphère. Ce risque augmente en effet de l'ordre de 1% pour une élévation des taux $\text{PM}_{2.5-10}$ de seulement $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ (77).

b) Corrélation entre le trafic routier et les admissions aux urgences(72)

D'après des analyses de l'INSEE, une corrélation significative entre le trafic routier et les admissions aux urgences pour affections aiguës de voies respiratoires a été mise en évidence en observant les variations de flux de transport au cours du temps.

En France, lors de perturbations des transports en commun, la population se tourne vers les transports individuels. Ainsi, il y a une augmentation du flux de trafic routier. Cela ayant pour conséquence d'augmenter le nombre de véhicules en circulation, mais aussi le temps de parcours qui est plus important à cause de la densité de circulation. Par conséquent, nous observons une augmentation de l'émission de polluant dans l'atmosphère le jour-même mais aussi les jours suivants.

Pour que la corrélation entre l'augmentation de polluants atmosphériques et les admissions hospitalières pour affections respiratoires soit significativement importante, une observation sur la période 2010-2015 dans les dix plus grandes aires urbaines de France¹ a été réalisée.

i. L'augmentation de la circulation automobile

Une augmentation de la densité de transport a été observée lors de jour de grève de transport en commun. En effet, l'impact d'un événement tel qu'une grève des transports en commun ne semble avoir un impact sur la pollution atmosphérique qu'à travers la conséquence qu'il a sur le trafic automobile.

Lorsque la population se tourne vers les transports individuels, nous observons deux phénomènes. La première étant naturellement le nombre de véhicules qui augmente. Cette augmentation significative est observée entre 7 et 9h. Le deuxième est le temps de parcours avec une distance durée qui augmente significativement de 7% en moyenne. Ce temps de trajet n'est pas significativement affecté les jours suivant le jour de grève (Figure 15).

¹ Paris, Marseille, Lyon, Bordeaux, Toulouse, Nice Lille, Nantes, Rennes et Strasbourg

Les conséquences

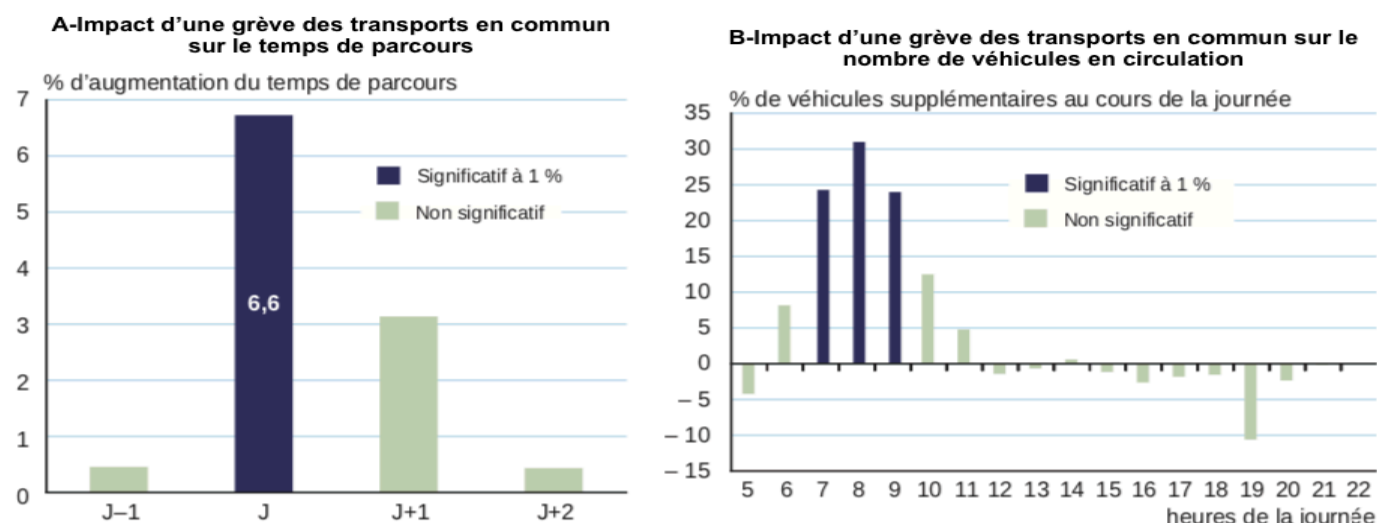


Figure 15 Graphiques (A) de l'impact d'une grève des transports en commun sur le temps de parcours de J-1 à J+2 et (B) l'impact d'une grève des transports en commun sur le nombre de véhicules supplémentaires au cours d'une journée(78).

Cette augmentation du nombre de véhicules et du temps de trajet de chacun entraîne une augmentation significative de l'émission de polluants dans l'atmosphère. On observe en effet une augmentation de concentration en monoxyde de carbone (CO) et en particule en suspension ($PM_{2,5}$). Cette augmentation est visible le jour-même de la perturbation des transports en commun, mais aussi les deux jours suivants (Figure 16).

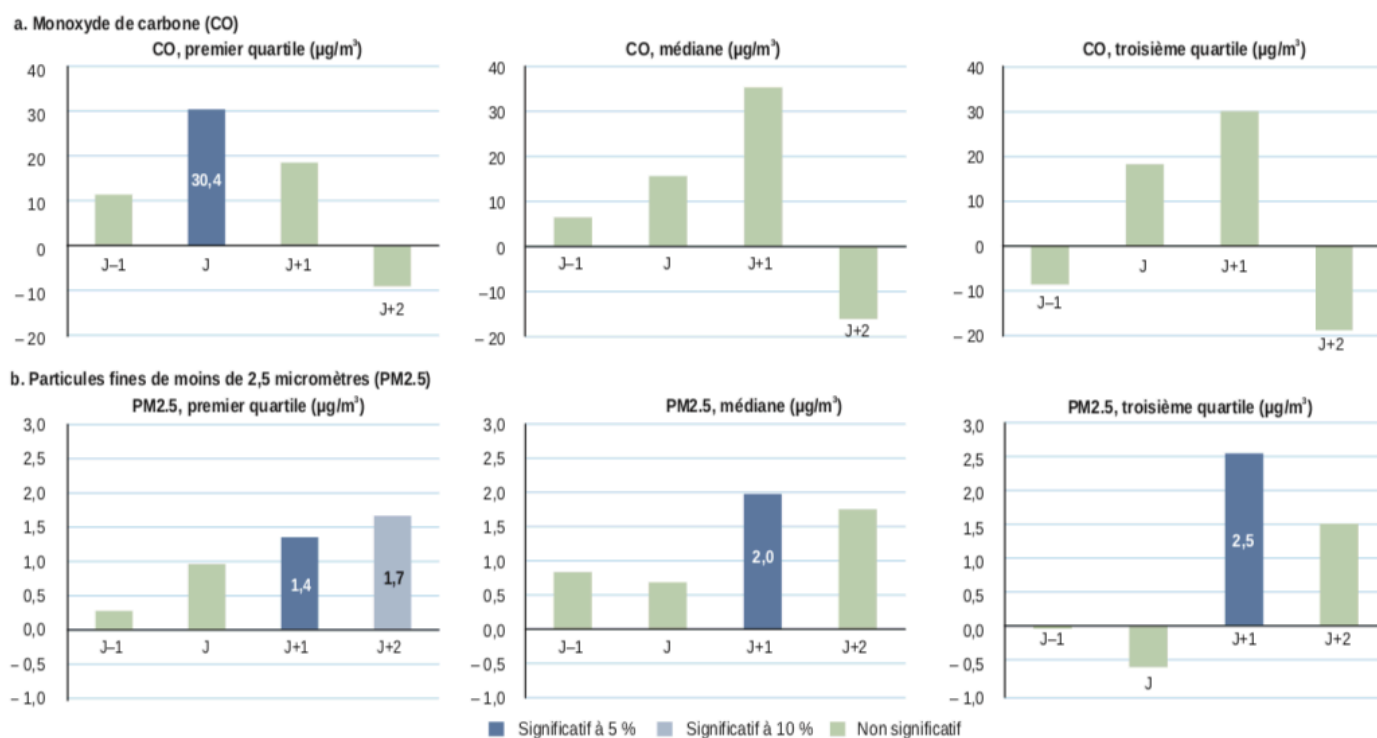


Figure 16 Observation de l'émission en $\mu g/m^3$ de monoxyde de carbone CO (A) et de particules fines de moins de 2,5 μm $PM_{2,5}$ (B) avant, pendant et deux jours après une grève des transports en commun(78).

Les conséquences

Les variations significativement différentes d'un jour sans grève de transports en commun sont indiquées en bleu. Nous y constatons une augmentation significative de l'émission de monoxyde de carbone et de PM_{2,5} le jour de la grève mais aussi les deux jours suivant cet événement.

ii. L'augmentation du nombre d'admission aux urgences

La comparaison de ces variations d'émission de polluants avec les données des hôpitaux des aires urbaines étudiées permet de mettre en évidence une augmentation significative du nombre d'admissions aux urgences pour des affections aiguës des voies aériennes supérieures et des anomalies respiratoires.

En France, le niveau moyen d'admission aux urgences est de 0,8 admission par million d'habitant en un jour. Un jour où les transports en commun subissent des perturbations, il y a une augmentation significative de 0,3 admission par million d'habitant par rapport au niveau moyen d'un jour standard. Ce phénomène s'observe aussi le lendemain d'une grève avec une augmentation significative des anomalies respiratoires entraînant une admission aux urgences.

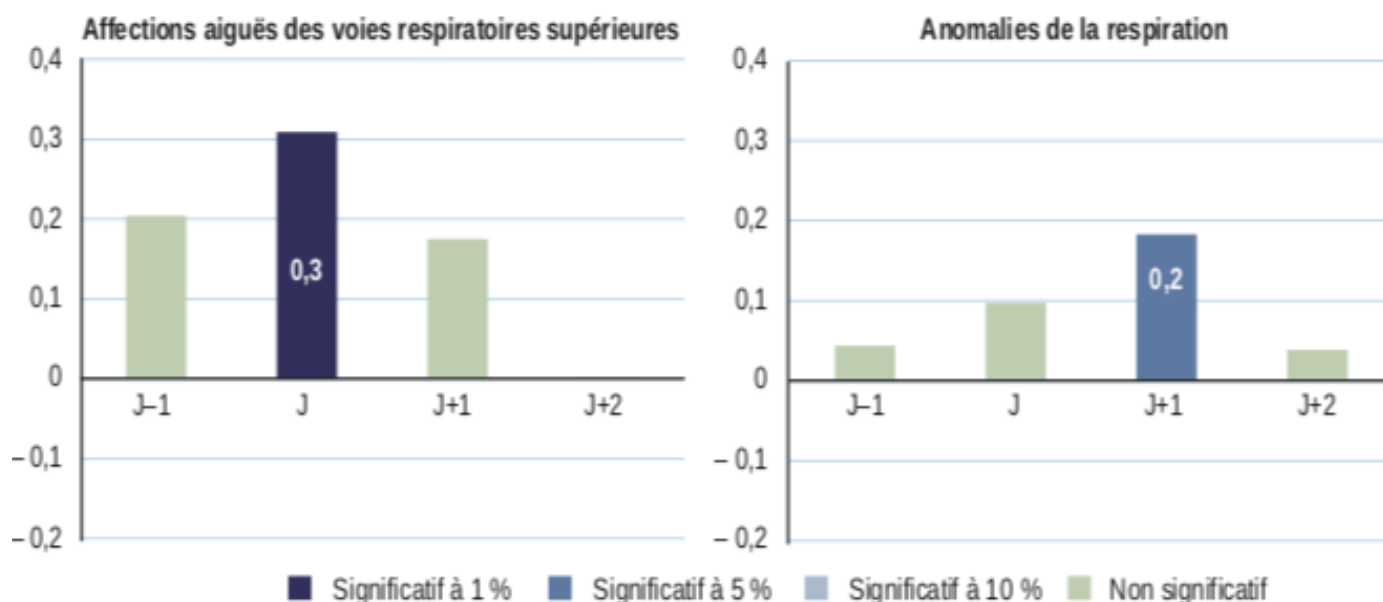


Figure 17 Variation du nombre d'admissions par million d'habitants aux urgences de J-1 à J+2 d'une interruption des transports en commun(79).

En conclusion, il y a un impact significativement important de la pollution émise par le trafic automobile sur la santé respiratoire de la population. Elle a une conséquence directe et indirecte sur la survenue d'affections des voies aériennes et d'anomalies respiratoires. Ces effets ont été mis en évidence à la suite de jours de grève dans une dizaine de grandes aires urbaines françaises et pendant une durée de 5 ans. Cela dit, les effets à court terme de la pollution atmosphérique issue de la circulation automobile restent probablement encore sous-estimés.

Cependant, à la suite de l'observation d'une augmentation du nombre d'admissions aux urgences, un autre phénomène a été observé. En effet, lors de grèves des transports en commun, le contact entre personnes est beaucoup plus bas.

Les conséquences

Ainsi, il a été observé que durant des jours de grève des transports en commun, les admissions aux urgences pour pathologies virales contagieuses les deux jours suivant la grève ont significativement diminué. Les pathologies étudiées étant les gripes et les pneumonies. En effet, le virus de la grippe a un temps d'incubation de l'ordre de la journée, ce qui explique la baisse du nombre d'admissions dans les deux jours suivants.

c) La mortalité

La pollution atmosphérique est observée depuis de nombreuses décennies. Ces dernières années, nous avons observé par endroit une accélération de l'augmentation de certains polluants. Ainsi, les taux observés en moyenne sont parfois inédits. Historiquement, des pics de pollution à la suite d'accidents industriels peuvent servir de base pour comprendre l'impact qu'ont certains polluants sur la mortalité.

L'exemple du Smog mortel de Londres en hiver 1952 permet d'avoir un aperçu du danger de certains polluants. Le Big Smoke ou grande fumée était un épais nuage brunâtre issu d'un mélange de polluants. Il était très concentré en ozone, en particule fine et dioxyde de soufre. Ce nuage qui a recouvert les rues de Londres du 5 au 9 décembre 1952 était issu de l'augmentation de la consommation de charbon pour lutter contre le froid. Les études des conséquences suite à l'exposition à ce nuage ont révélé une augmentation des taux de mortalité de 50 à 300% plus élevé que l'année précédente. Les plus récentes études estiment à plus de 12'000 décès survenus dans la période de décembre à février 1953. Le niveau des différents polluants contenus dans le Smog de Londres était 5 à 19 fois plus élevé que les seuils de recommandations actuelles. Force est de constater que les taux de polluants contenus dans ce nuage Londonien de 1952 sont proches du niveau actuel de polluants dans de nombreuses régions en développement rapide(80).

i. En France

Malheureusement, de plus en plus d'études mettent en évidence des liens significativement importants d'exposition à la pollution et de décès.

En France, l'exposition aux particules en suspension $PM_{2.5}$ entrainerai 48'000 décès par an. Ce chiffre de 48'000 décès est mis en évidence dans le cadre d'une comparaison à des taux devenus « utopiques » de nos jours, soit l'absence de cette pollution dans l'atmosphère(81).

Lorsqu'une exposition à un polluant provoque une exacerbation de pathologie préexistante, ou lorsqu'elle provoque la survenue d'effets urgents, il s'en suit une admission aux urgences. Lorsque cet effet est trop important, il peut conduire au décès de l'individu touché.

En France, dans le cadre de la loi LAURE, le programme PSAS (*Programme de surveillance Air & santé*) de Santé Publique France a permis de mettre en évidence beaucoup d'effets à court terme de la pollution atmosphérique. Autrefois, 9 villes françaises faisaient partie du programme de surveillance. Désormais, ce sont 20 agglomérations Françaises qui participent au programme.

Les conséquences

Depuis 1997, les études du PSAS sont arrivées à deux conclusions :

- Des causes de mortalité et d'admission hospitalières pour exacerbation cardiovasculaire peuvent être attribuées à la pollution de l'air par les particules fines PM₁₀ et PM_{2.5}
- En été, des causes de mortalité et d'admission hospitalières pour exacerbation cardiovasculaire peuvent être attribuées à la pollution de l'atmosphère par l'ozone (O₃)


Le programme PSAS9¹ a mis en évidence par des études statistiques significatives l'augmentation du risque de décès prématuré suite à une exposition de courte durée à la pollution atmosphérique (1 à 5 jours)(82).

Tableau III Excès du risque de mortalité suite à l'augmentation de 10 µg/m³ de différents polluants atmosphériques sur une durée allant de la veille à cinq jours avant(83).

	Durée d'exposition	Polluant concerné			
		Fumées noires	SO ₂	NO ₂	O ₃
Mortalité totale	De la veille	0,8%	1,1%	1,0%	0,7%
	Des cinq jours précédent	1,2%	1,9%	1,3%	Nd
Mortalité cardio-vasculaire	De la veille	0,5%	0,8%	1,2%	1,1%
	Des cinq jours précédent	1,2%	1,7%	1,4%	Nd
Mortalité respiratoire	De la veille	0,7%	1,1%	1,3%	1,2%
	Des cinq jours précédent	2,1%	5,1%	3,4%	Nd

Légende :

 Nd : Valeur non disponible

 Les valeurs en gras sont les valeurs dont les risques statistiquement significatifs

Une augmentation de l'ordre de 10µg/m³ du taux de polluants dans l'atmosphère pour une courte durée (de l'ordre de la journée) est associée à un excès de risque de la mortalité d'environ 1%(84,85). Pour une exposition prolongée de trois à cinq jours, le risque de décès est de 1,2 à 4,6 fois plus élevé en fonction du polluant concerné (Tableau III).

Ces valeurs peuvent varier en fonction de l'âge, mais aussi de la période concernée. Cependant, quelque soient les facteurs, les résultats sont souvent semblables. Une augmentation de 10µg/m³ se traduit par une augmentation de la mortalité non accidentelle plus importante en été et chez les personnes de plus de 75ans.

¹ PSAS9 : Programme de Surveillance Air & Santé dans 9 villes française : Bordeaux, le Havre, Lille, Lyon, Marseille, Paris, Rouen, Strasbourg, Toulouse.

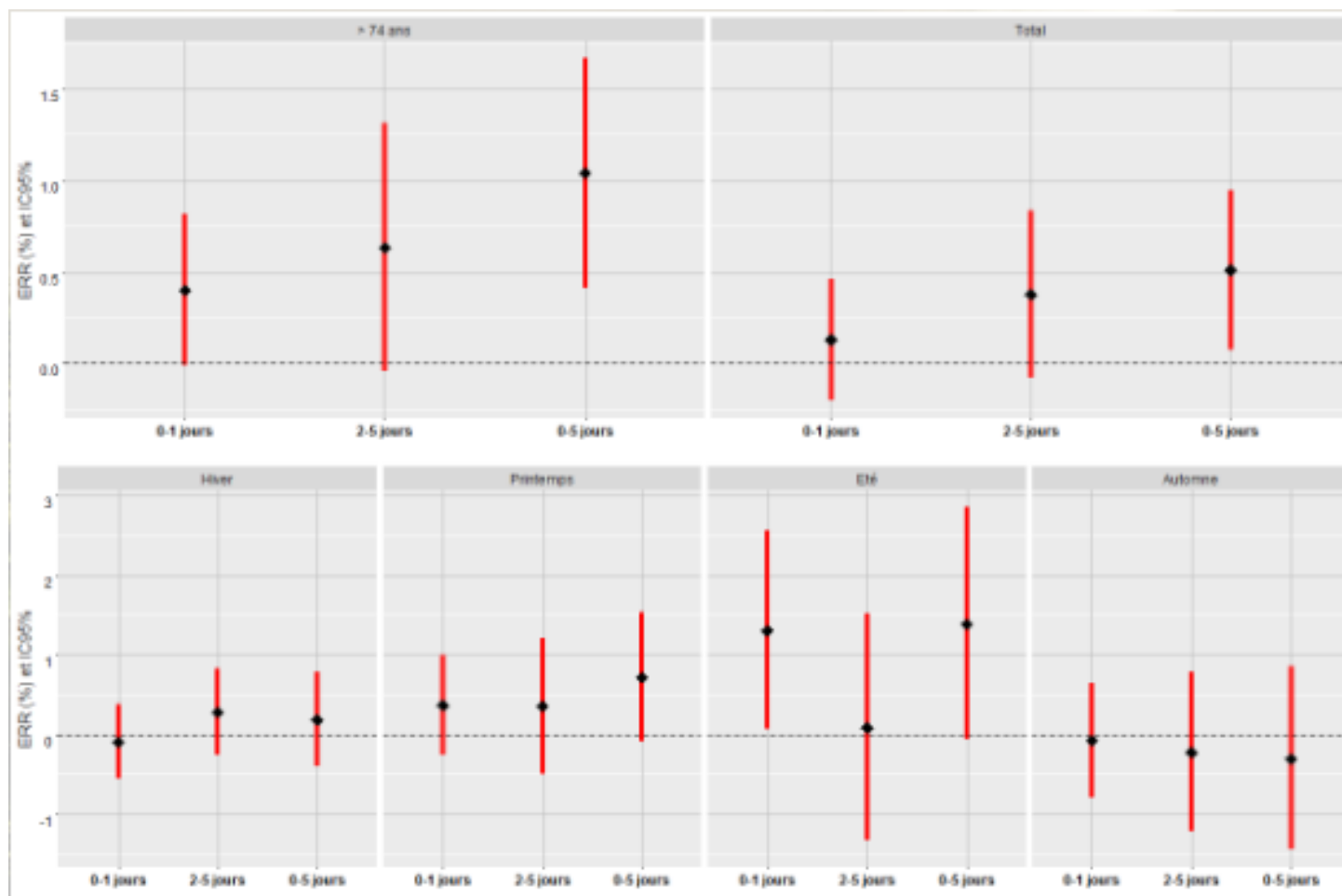


Figure 18 Part en pourcentage de l'augmentation de la mortalité non accidentelle à la suite de l'augmentation de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en fonction de l'âge et des saisons sur la période 2007-2010(86).

ii. Dans le monde

Les estimations attribuables à l'exposition aux particules sont plus qu'alarmantes. Au niveau mondial, l'exposition particulaire serait à l'origine de 3% des décès par cancer cardio respiratoire et 5% par cancer du poumon(87). La durée de vie serait réduite de plus de plus de 8 mois en moyenne(88).

Selon l'OMS, le décès de près de 3,8 millions de personnes à travers le monde serait attribuable à la pollution de l'air domestique. En cause, nous retrouvons des pneumonies, AVC, cardiopathies respiratoires, etc.(89) De plus, l'OMS estime à plus de 700'000 le nombre de décès prématurés par an pouvant être attribués à la pollution particulaire.

Dans les études statistiques à l'échelle mondiale, nous retrouvons les mêmes pourcentages de mortalité que dans les études se déroulant à l'échelle nationale. En moyenne, l'augmentation de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de l'exposition aux $\text{PM}_{2.5}$ serait à l'origine d'une augmentation de 1,0% de la mortalité toutes causes confondues(84).

Les conséquences

d) L'agglomération Tourangelle

Pour rendre compte de l'impact de la pollution sur la mortalité, il est plus facile de visualiser des effets proches de nos habitats. Une étude sur 6 saisons (3 hivernales et 3 estivales) a été réalisée dans l'agglomération Tourangelle¹(85). Ainsi, cette étude compte plus de 240'000 habitants. L'exposition urbaine journalière aux niveaux de pollution est considéré comme étant homogène sur l'ensemble de la population étudiée.

Les valeurs de pollution enregistrée sur deux ans sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV Moyenne et maximum d'exposition journalière de la pollution atmosphérique urbaine à tours étudiée sur deux années(85).

	PM ₁₀	PM _{2,5}	O ₃ (année)	O ₃ (été)
Moyenne	24 µg/m ³	18 µg/m ³	70 µg/m ³	86 µg/m ³
Maximum	108 µg/m ³	116 µg/m ³	169 µg/m ³	169 µg/m ³
Rappel des valeurs guide de OMS	20µg/m ³	10µg/m ³	100µg/m ³ (moyenne sur 8h)	
Différence entre les moyennes observées et les normes	+4 µg/m ³	+8 µg/m ³	-30 µg/m ³	-14 µg/m ³
Différence entre les maximums observés et les normes	+88 µg/m ³	+106 µg/m ³	+69 µg/m ³	

Cette étude permet d'établir une estimation du nombre de décès attribuables à la pollution atmosphérique dans l'agglomération tourangelle. Ainsi, par an, l'exposition seulement aux PM₁₀ sur Tours serait à la l'origine d'au moins 5 décès prématurés, 9 hospitalisations pour altérations respiratoires et 5 hospitalisations pour raisons cardiaques. Ainsi, nous pouvons parler de décès évitables.

e) Le cas du COVID-19

À la suite de la pandémie du coronavirus COVID-19 en 2020, l'humanité a connu un confinement sans précédent. Cela nous a permis de voir l'impact que l'humain a sur l'écosystème, mais il nous aussi permis de comprendre un peu mieux l'impact que la pollution atmosphérique a sur notre santé. En effet, le COVID-19 touche entre autre le système respiratoire. Ainsi, de plus en plus d'études suggèrent que l'exposition à la pollution atmosphérique peut aggraver les symptômes ou même jouer sur la survie des patients atteints du COVID-19.

¹ L'étude est réalisé sur Tours, Chambray-les-Tours, Joué-les-Tours, La Riche, Saint-Avertin, Saint-Cyr-sur-Loire, Saint-Pierre-des-Corps.

Les conséquences

En 2021, il est encore trop tôt pour pouvoir établir des liens vraiment significatifs entre les symptômes du COVID-19 et la pollution atmosphérique. Cependant, nous pouvons observer les différences de pourcentage de décès en étudiant les différences de taux de polluants entre deux zones différentes mais touchées de façon identique par le coronavirus.

De plus en plus de preuves suggèrent que la pollution atmosphérique a un effet néfaste sur l'incidence mais aussi sur les décès liés au COVID-19 (90–94). Certains chiffres estiment qu'une exposition à la pollution atmosphérique pourrait provoquer une augmentation du risque de décès de près de 10,6%(92).

Par conséquent, la pandémie de COVID-19 de 2020 n'a fait que confirmer ce que nous savons déjà très bien. Avec le confinement mondial, nous avons vu que l'humain est à l'origine d'une très importante pollution, mais nous avons aussi une preuve supplémentaire que cette pollution est plus que néfaste pour l'Homme en aggravant directement la situation des malades atteints du virus SARS-CoV 2.

2) Les effets à long terme

L'exposition à la pollution atmosphérique entraîne des effets à court terme, mais aussi à long terme. Nous pouvons schématiser les effets respiratoires à long terme de la pollution par une pyramide en tenant compte de la gravité des effets en fonction du pourcentage de la population atteinte.

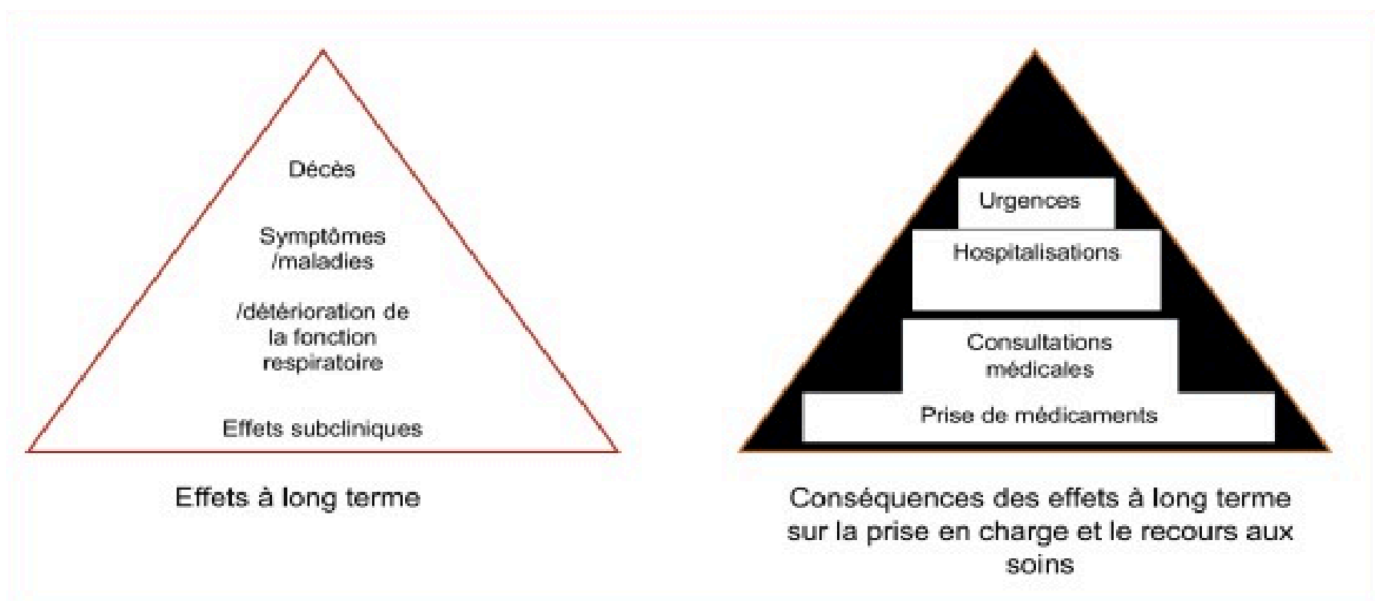


Figure 19 Pyramide des effets à long terme de l'exposition à la pollution atmosphérique ainsi que leurs conséquences sur leur prise en charge(95).

Bien que les effets à court ou long terme puissent être discrets chez un individu, au niveau de la population, les effets à long terme de l'exposition à la pollution ne sont pas négligeables. Ils entraînent en effet des hospitalisations, des pathologies telles que l'asthme, des cancers devant être traités. Contrairement aux effets à court terme qui sont observés dans les jours qui suivent une exposition, les effets à long terme sont plus difficiles à mettre en évidence. Ainsi, l'effet sanitaire de l'exposition à la pollution se produit sur plusieurs années.

Les conséquences

Une succession d'effets à court terme peuvent être à l'origine de l'observation à posteriori d'effets à long terme. Cependant, contrairement à des effets à court terme résultant parfois de l'exposition à de pics de concentration, les effets à long terme peuvent être la conséquence d'une exposition chronique à des valeurs proches des seuils de recommandation(62).

a) Morbidité

Les effets aigus résultant de la pollution atmosphérique sont plus faciles à étudier que les effets à long terme. En effet, l'impact à long terme du tabagisme actif ou passif est si important qu'il induit un bruit de fond rendant compliqué l'identification de l'impact à long terme de la pollution atmosphérique.

Ce sont des études de cohortes qui ont permis de démontrer des effets sanitaires de l'exposition chronique à la pollution. Ainsi, les statistiques ont pu se baser sur l'étude de plusieurs milliers de personnes et sur plusieurs années. Ces études rétrospectives permettent ainsi de contrôler les différents facteurs tel que le tabagisme, mais aussi l'âge, le sexe, l'obésité, la position géographique, le statut professionnel qui peuvent induire une exposition professionnelle, etc.

L'exposition chronique aux polluants tels que le NO₂, les PM_{2.5} ou encore les COV dans les zones les plus polluées expose les individus à des risques accrus de développer de l'asthme, des rhinites allergiques et une sensibilité allergiques importante. Ces conclusions ont été mises en évidence par plusieurs études(96,97) telles que l'étude dite « des six villes »(98). Cette étude française a permis de conclure que la fréquentation d'écoles primaires proche d'axes pollués et avec des taux de PM_{2.5} supérieurs à la médiane dans les préaux des écoles avait plus significativement plus de risque de présenter des dermatites atopiques, de déclarer de l'asthme atopique mais aussi un terrain atopique face à des allergènes. Cette même exposition aux particules fines est associée à un asthme mal contrôlé, mais aussi une diminution de la fonction pulmonaire(96). L'exposition à long terme aux polluants tels que l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre ou encore les particules en suspension peuvent contribuer à l'apparition d'asthme chez des adultes ou enfants non asthmatique(99).

Les résultats de ces différentes études se complètent. L'exposition chronique aux polluants atmosphériques a effectivement un impact sur la survenue de pathologies respiratoires telles que l'asthme ou la BPCO, mais aussi de favoriser la survenue d'allergies.

b) Mortalité

Lorsqu'il s'agit du long terme, les morbidités et la mortalité sont particulièrement liées car la mortalité est la conséquence des différentes morbidités. Le résultat des différentes études précédemment évoquées fait très souvent suite à des résultats de mortalité.

Les résultats très semblables permettent de sortir certaines approximations. L'exposition chronique aux matières particulaires et dioxyde de soufre entrainerait une augmentation du risque de décès dus à différentes pathologies(100) :

- Mortalité toutes causes : 6 à 13%
- Mortalité par affection cardio-pulmonaire : 12 à 18%
- Mortalité par cancer pulmonaire : 1,2 à 18%

Les conséquences

Au niveau mondial, l'OMS estime que la pollution atmosphérique tue prématurément plus de 5,5 millions de personnes par an, faisant d'elle la 4^e cause de mortalité prématurée. La Banque Mondiale estime que la pollution atmosphérique représente 10% des causes de décès. Un décès sur 10 dans le monde est donc attribuable à la pollution atmosphérique.

En zone urbaine, nous pouvons observer une augmentation de 9% du risque de décès pour cause de pathologies cardio-pulmonaires à la suite d'un accroissement de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ de toutes particules fines confondues. Une autre méta-analyse estime qu'une augmentation de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ serait à l'origine d'une augmentation du risque de décès par cancer du poumon de 15 à 21%(62).

c) Les effets sur la reproduction

Bien que les effets sur les morbidités et la mortalité soient bien connus, les effets de la pollution sur le développement fœtal sont encore peu connus, mais ils sont probablement très néfastes. En plus de son impact probable sur le développement fœtal, selon de récentes études, l'exposition à la pollution aurait aussi un impact sur la fertilité humaine. Cependant, c'est un sujet encore peu étudié.

De rares études chez des rongeurs ont démontré des taux de fertilité diminués lorsqu'ils ont été exposés à une pollution atmosphérique modéré. Chez l'Homme, il a été démontré un taux de fertilité réduite à la suite d'exposition à une pollution plus importante que lors de ces précédentes études, particulièrement au contact de matière particulaire grossière. Ces résultats peuvent donc conclure sur la corrélation négative entre l'augmentation de la pollution atmosphérique et la diminution du taux de fécondation(101).

De plus, chez la femme, la durée de la phase folliculaire serait allongée suite à l'exposition à des particules en suspension dans l'atmosphère. Il a été aussi mis en évidence une diminution de la probabilité de grossesse liée à une exposition à la pollution atmosphérique(102).

III. Le coût financier de la pollution

Les études prédisant l'évolution de la pollution atmosphérique sont très nombreuses et ne se contredisent pas. En effet, en cas d'absence d'effort très important de l'ensemble de l'humanité, l'augmentation de la pollution atmosphérique ainsi que toutes les conséquences qui en découlent sont inévitables. Les effets de tous les polluants étant très bien connus, empêcher l'augmentation de la pollution et du réchauffement climatique n'est plus une option. Par conséquent, l'OMS et l'instance de chaque pays se donnent des objectifs à tenir afin de diminuer la pollution et le réchauffement climatique.

Ces objectifs ont inévitablement des coûts pouvant être très importants, mais ils sont malheureusement nécessaires pour prévenir les effets très néfastes de la pollution. En effet, tous les effets de la pollution, s'ils peuvent être quantifiés, auront des coûts beaucoup plus importants que la prévention.

1) Le coût socio-économique actuel

L'impact de la pollution est quantifiable à plusieurs niveaux. L'impact sanitaire de la pollution atmosphérique entraîne des pathologies et des prises en charge qui ont des coups parfois très importants. L'impact de la pollution atmosphérique est aussi non sanitaire, indirect. Elle impacte en effet l'environnement de l'humain en le rendant plus difficile à contrôler, et plus dangereux.

a) En France

Même si les taux d'émission de certains polluants sont en baisse en France, le dépassement des seuils de protection de la santé est de plus en plus observés, particulièrement en été.

Par exemple, dans la région Centre Val-de-Loire, durant l'été 2018, lors des fortes chaleurs, les taux d'ozone ont dépassé les seuils de protection de la santé humaine pendant plus de 34 jours. C'est 22 jours de plus qu'en moyenne sur les cinq dernières années(103). En 2019, les concentrations en PM_{2,5} étaient au-dessus des seuils annuels de recommandation de l'OMS(104).

Cette hausse du nombre de jours de dépassement interroge sur le devenir du changement climatique et donc pousse les instances du monde entier à prendre des précautions, qui sont parfois coûteuses.

Par conséquent, le dépassement des seuils de recommandation et d'alerte entraîne inévitablement des conséquences à différents niveaux. Il y aura tout d'abord une augmentation à court terme des admissions et des prises en charge hospitalières qui ont un coût important pour la sécurité sociale. De plus, il faut aussi prendre en compte l'apparition de nouvelles pathologies ou de sensibilité chez les individus exposés. A la suite de ces impacts sur la santé humaine qui peuvent avoir des coûts de soins médicaux élevés, ils peuvent aussi entraîner des arrêts de travail et de l'absentéisme qui peut par exemple avoir un impact sur la croissance d'une entreprise.

À la suite de la pollution de l'atmosphère, il peut être observé une pollution des sols ou une pollution des plantes cultivables, ce qui impacte directement sur la productivité agricole. En effet, ces impacts non sanitaires peuvent entraîner une perte de rendement de production agricole de 3 à 20%, ce qui peut provoquer une perte économique très importante(105).

Les conséquences

Concernant la santé environnementale, la « non-action » a des coûts non négligeables. En effet, les coûts de la non action sont multiples. Ils se mesurent par les dépenses qu'entraînent la prise en charge de l'altération de la santé par la pollution, mais aussi en coûts non sanitaires.

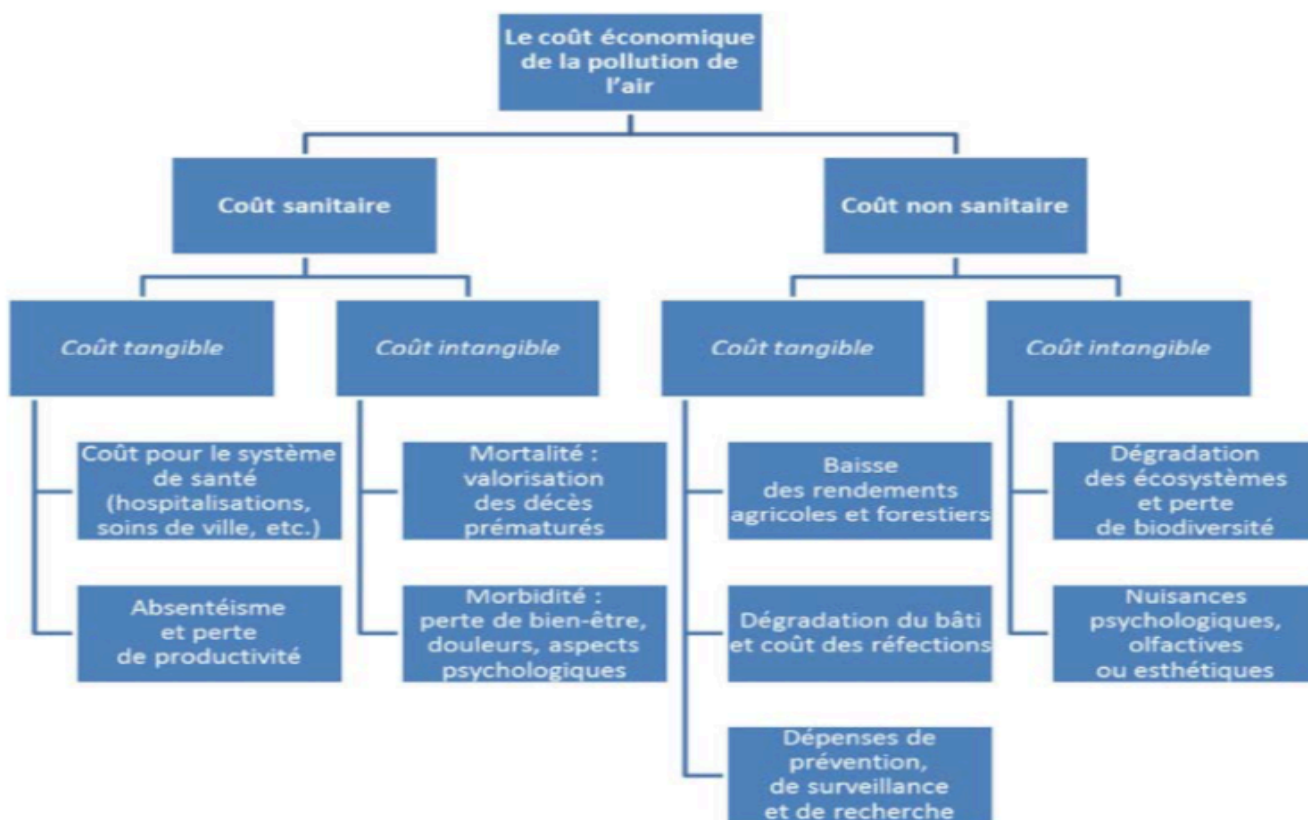


Figure 20 Aperçu du coût socio économique de l'exposition à la pollution atmosphérique(106).

En France, les estimations des coûts sanitaires de l'exposition à la pollution atmosphérique sont les suivantes(107) :

- Les coûts tangibles qui entraînent les dépenses de santé à la suite de pathologies attribuables à la pollution atmosphérique, mais aussi l'impact sur la morbidité et absentéisme. Ils sont estimés de 1 à 2 milliards d'euros par an. Cette somme ne comprend les rentes versées à la suite de maladies professionnelles qui sont estimées à un peu plus d'un milliard d'euros par an.
- Les coûts non sanitaires, socio-économiques sont plus compliqués à évaluer. Ils sont estimés entre 20 et 30 milliards d'euros par an par le commissariat général du développement durable. Le programme européen « clean air for Europe » estime cette dépense à plus de 70 à 100 milliards d'euros.

Les seuls coûts de la prise en charge de pathologies chroniques attribuables à la pollution atmosphérique par la sécurité sociale sont estimés entre 500 millions et 1,9 milliard d'euros par an.

b) Dans le monde

Dans le monde, le coût de la pollution a été estimé par la Banque Mondiale. Au cours de cette décennie, 87% de la population mondiale vivaient dans des zones avec des seuils au dessus des recommandations de l'OMS.

La pollution atmosphérique, à l'origine d'environ 10% des décès prématurés coûterait au niveau mondial près de 225 milliards de dollars par an. Cette estimation ne faisant état que de la perte de revenus de travail.

Ainsi, le coût des traitements et des prises en charge des pathologies provoquées par la pollution n'est pas pris en compte. En effet, si ces estimations prennent en compte ces dépenses, la facture s'élèverait à plus de 5000 milliards de dollars(108). Pourtant, cet impact économique peut être encore sous-estimé. En effet, lorsque tous les effets de la pollution sont additionnés, l'estimation du coût de celle ci est très difficile, voire impossible. En effet, la perte de productivité agricole, les naissances prématurées et les pathologies qu'elle entraîne et beaucoup d'autres effets sont susceptibles d'augmenter le coût réel de la pollution atmosphérique.

Par conséquent, la pollution de l'air est une véritable perte économique pour un pays. Par exemple, la Chine perd un peu moins de 10% de son PIB en raison de la pollution atmosphérique.

2) La prévention

Même si il est difficile d'établir le coût plus ou moins précis de la pollution atmosphérique, ce qui est sûr, c'est qu'elle coûte très chère, et continuera à coûter toujours plus cher avec l'augmentation de la pollution atmosphérique.

Pour cela, la France et beaucoup de pays du monde entier ont établi des objectifs à atteindre en terme de réduction des émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Par exemple, la France a fixé un objectif de neutralité carbone pour 2050. Cependant, atteindre cet objectif nécessite de mobiliser des fonds pour le climat qui sont estimés à près de 4,5% du PIB chaque année jusqu'à atteindre cette neutralité carbone en 2050. À ce jour, les dépenses pour le climat sont environ de 1,9% du PIB. D'ici 2050, cela représentera un peu moins de 150% de notre PIB actuel qui va être investi pour le climat, soit environ 800 milliards d'euros d'ici 2050. Même si cette somme semble astronomique, elle coûtera moins cher que ce que nous réserve le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique si elle n'est pas freinée(109).

Par exemple, l'installation de filtres à particules sur les véhicules particuliers coûte en moyenne 500 à 800€. Lorsqu'il s'agit de l'installer sur les camions déjà immatriculés, l'installation coûte approximativement 5000€. Le coût de la prévention d'émission particulaire par la circulation automobile est par conséquent coûteux, mais jusqu'à ce jour, ces installations ont permis la diminution des émissions de particules fines dans l'atmosphère de près de 30%. Finalement, cette diminution d'émissions particulières peut conduire à un bénéfice sanitaire d'approximativement deux milliards d'euros par an. En terme de santé humaine, c'est un gain de 40'000 années de vies par an(109,110).

IV. Le cout humain des allergies aux pollens

Une allergie est une réponse inadaptée du système immunitaire à une substance normalement inoffensive. Ces dernières décennies, le nombre de personne souffrant d'une allergie a considérablement augmenté et il y a de nombreuses raisons pour lesquelles ces allergies augmentent.

1) Epidémiologie des pollinoses

a) La prévalence des allergies

Les allergies peuvent être de différentes natures. Dans les allergies aux pollens, les symptômes peuvent se traduire par des atteintes oculaires, des rhinites allergiques, asthme allergique. Les pollinoses dépendent aussi de la provenance du grain de pollen. Certaines plantes ont un grain de pollen beaucoup plus allergène que d'autres et touche donc beaucoup plus d'individus.

Au niveau mondial, les allergies, quelque soit leur nature, touchent environ 15% de la population, ce qui représente environ 500 millions de personnes. La prévalence à travers les pays développés est très proche de celle de la France, soit 20 à 30%(111).

D'une manière générale, c'est 25 à 30% de la population française qui souffre au moins d'une allergie. À l'échelle européenne, les allergies aux pollens concernent 10 à 20% de la population, ce qui représente 75 à 150 millions de personnes qui ont une sensibilité plus ou moins importante vis à vis des pollens. Au niveau national, la prévalence des allergies aux pollens est de 18% chez les adultes et entre 11 et 27% des adolescentes de 13-14ans (1,111–113).

b) La prévalence des pollinoses

En France, en fonction des régions géographiques, les espèces les plus incriminées dans les allergies sont le bouleau verruqueux, l'ambrosie, le cyprès, ou encore la famille des Poacées. Ces espèces sont en effet considérées comme ayant un risque allergique très élevé et un potentiel allergisant très fort. Ce qui veut dire que peu de grain de pollen peut entrainer des symptômes allergiques très importants. Ainsi, le nombre d'allergies à certaines espèces sera d'autant plus important que leur pollen aura un potentiel allergisant et un risque allergique très élevé.

Par exemple, le pollen du bouleau est un allergène très important et très présent en France. Le cyprès, de la famille des Cupressacées a aussi un pollen très allergène mais moins présent en France que le bouleau. La répartition des sensibilisations aux pollens du bouleau suivent un gradient Nord-Sud. Au niveau du Nord de l'Europe, le pollen du bouleau est l'un des allergènes entrainant le plus d'allergie. À mesure que l'on descend dans le sud de l'Europe, les allergies aux bouleaux sont moins fréquentes du fait de la répartition du bouleau qui est principalement situé au nord. Parmi les patients allergiques en Scandinavie, 31% sont sensibles aux pollens du bouleau contre seulement 6,4 à 16% à Montpellier et Strasbourg(112,114).

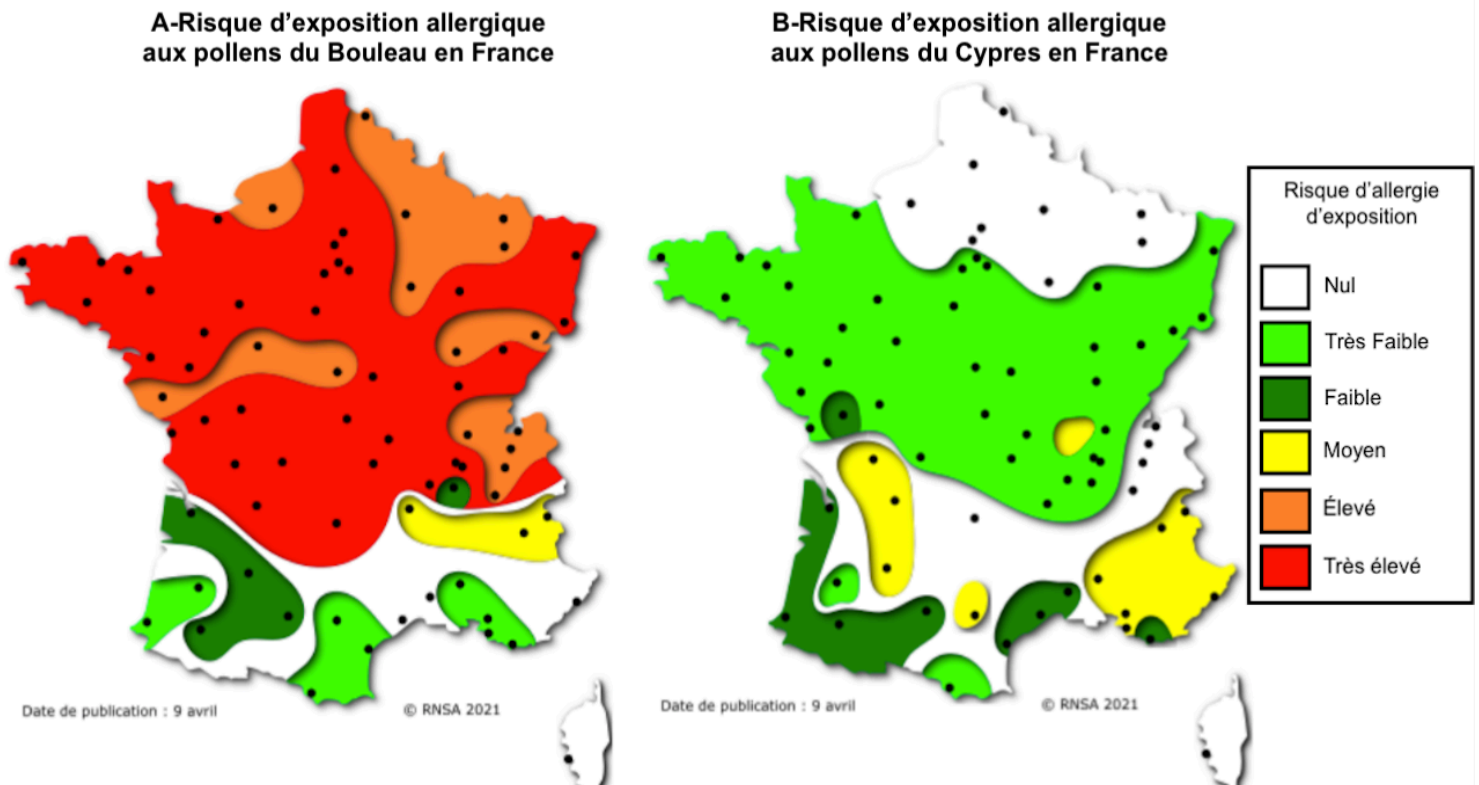


Figure 21 - Risque d'exposition allergo-pollinique en France vis-à-vis du pollen de (A) Bouleau et de (B) Cypres au cours de l'année 2021(44)

En plus de la variation du risque allergique et du potentiel allergisant en fonction du type de pollen, les symptômes aussi peuvent varier en fonction du type de pollen. Par exemple, la manifestation allergique de l'exposition au pollen du bouleau est essentiellement une rhinite allergique. Cependant, les symptômes associés à la rencontre du pollen du bouleau a aussi un gradient Nord-Sud. En effet, la prévalence de la rhinite allergique provoquée par le pollen du bouleau est plus élevée au Royaume-Uni et Belgique (*respectivement 26 et 28,5%*) qu'en Espagne et Italie (*respectivement 21,5 et 16,9%*)(112,114). Nous pouvons aussi retrouver de l'asthme chez un tiers des patients présentant une rhinite allergique face au pollen du bouleau.

De même que le bouleau, le pollen du cyprès provoque majoritairement des rhinites. Cependant, les symptômes les plus invalidants sont la conjonctivite allergique, et ils sont rencontrés chez 72% des allergiques au grain de pollen du Cypres. 26% des patients allergiques au pollen de Poacées présentent des conjonctivites allergiques (115).

En conclusion, les allergies aux pollens peuvent être très variées en fonction de plusieurs facteurs. En effet, la région géographique détermine quelle espèce est le plus problématique pour les allergies. En fonction du pollen rencontré, les symptômes aussi peuvent être différent. Cependant, d'une manière générale, les pollinoses représente 15 à 18 millions de personnes à travers la France. Au niveau mondial, c'est près d'une personne sur 4 qui souffre d'allergie aux pollens.

Malheureusement, ces chiffres sont actuels, et ne sont pas définitifs. En effet, depuis ces dernières années, une importante augmentation du nombre de personnes allergiques aux pollens est observée.

2) L'augmentation de la prévalence

Il y a de nombreuses raisons provoquant l'augmentation du nombre d'individus présentant des allergies. Pour rappel, nous pouvons entre autre citer :

- Des périodes de pollinisation plus longue à cause du réchauffement climatique. Les plantes commencent à polliniser plus tôt et terminent plus tard.
- Un déplacement géographique de certaines espèces. Avec le changement climatique, certaines espèces à haut ou très haut risque allergique gagnent du terrain et se retrouve dans des zones géographiques nouvelles.
- Une pollinisation plus importante. L'effet de la pollution atmosphérique sur certaines espèces provoque une augmentation du nombre de pollens émis dans l'air.
- Des pollens plus « agressifs ». Du fait de la pollution, l'exine du pollen peut se rompre et libérer son contenu hautement allergène. Il peut aussi avoir une augmentation de la concentration de protéines allergènes à la surface du pollen à cause de la pollution.
- Une fragilité de la population. L'exposition à la pollution atmosphérique peut augmenter la sensibilité de nos muqueuses vis à vis des allergènes polliniques. Ainsi, même avec des quantités identiques de pollen, le nombre de manifestations allergiques peut augmenter.

Tout cela entraine donc une augmentation du nombre de personnes allergiques, mais aussi une augmentation du nombre de cas plus graves. En fonction des espèces, de nombreuses études épidémiologiques montrent une augmentation du nombre de patient allergiques aux pollens.

Pour reprendre l'exemple du Cyprès, de nombreuses études épidémiologiques ont mis en évidence une augmentation de la prévalence de l'allergie à son pollen sur des périodes données(115). Pour cela, les études ont comparés le pourcentage de part de rhinite allergique attribuable aux pollens du Cyprès sur deux périodes et dans différentes zones du globe. Nous retrouvons ainsi les mêmes résultats. Par exemple en Italie Centrale, la part d'allergies au cyprès est passée de 9.9% en 1991 à 24.5% en 1993. Dans la région de Rome, la prévalence a triplé en 5 ans, passant de 9% en 1994 à 30.4% en 1999(116). Ces chiffres, bien qu'ancien traduisent bien d'une augmentation du nombre d'allergiques depuis de nombreuses décennies. Un peu plus récemment, entre 2005 et 2010, cette prévalence est passée de 17% à 29% dans la région sud de l'Italie. Résultat mis en évidence par la comparaison de la réactivité cutanée vis-à-vis du pollen du cyprès(117).

Un autre exemple est celui du Bouleau. Chez les patients asthmatiques, une augmentation des allergies vis à vis du pollen du bouleau a été observé. Cette augmentation de la prévalence semble s'accélérer. En effet, entre 1975 et 1979, cette sensibilité au pollen du bouleau a augmenté seulement de 13%. Entre 1992 et 1995, cette sensibilité a augmenté de 34%(112). La prévalence des allergies a considérablement augmenté depuis de nombreuses années. Malheureusement, avec les conditions climatiques actuelles, cette augmentation semble s'accélérer.

En France, le nombre d'allergies aux pollens augmente constamment. En 20 ans, la prévalence de ces pollinoses a triplé. À ce jour, ces allergies touchent près de 20% des adolescents et 30% des adultes (118).

3) L'avenir

Étant donné que la relation entre le changement climatique et la prévalence des pollinoses est établie par de nombreuses études, il est donc possible de prédire une augmentation toujours plus importante du nombre d'allergies avec le changement climatique.

L'exemple de l'ambroisie permet de bien visualiser l'évolution jusqu'à nos jours et les prévisions pour le futur. L'ambroisie est originaire d'Amérique du nord. C'est une plante à très haut risque allergique et très haut potentiel allergisant. C'est entre 6 et 12% de la population qui serait allergique à l'ambroisie dans la région Rhône-Alpes. Son pollen peut en effet provoquer conjonctivites, rhinites, mais aussi des trachéites ou des crises d'asthme. Initialement, elle est présente dans la région du Rhône-Alpes. Cependant, depuis le milieu du XX^e siècle, l'ambroisie gagne du terrain.



Figure 22 Répartition de l'ambroisie en France en 2005, 2010 et 2017. Chaque point représente une commune ayant signalé la présence de l'ambroisie(119).

Ainsi, l'évolution des concentrations dans l'air du pollen d'ambroisie pourrait être multipliée par 4 d'ici 2050. À la source de cette augmentation, le réchauffement climatique et l'activité humaine.

Parmi les très nombreux effets néfastes de la pollution atmosphérique et du réchauffement climatique, l'impact sur les pollinoses fait parti des effets les plus perceptibles à l'heure actuelle. En plus du changement géographique de certaine espèce, l'allongement de la durée de pollinisation dans les années à venir sera aussi un acteur de l'augmentation de la prévalence des allergies aux pollens. A la source de ces changements, le réchauffement climatique. Les projections du réchauffement climatique d'ici 2100 varie entre +2,5 et +4°C.

Les conséquences

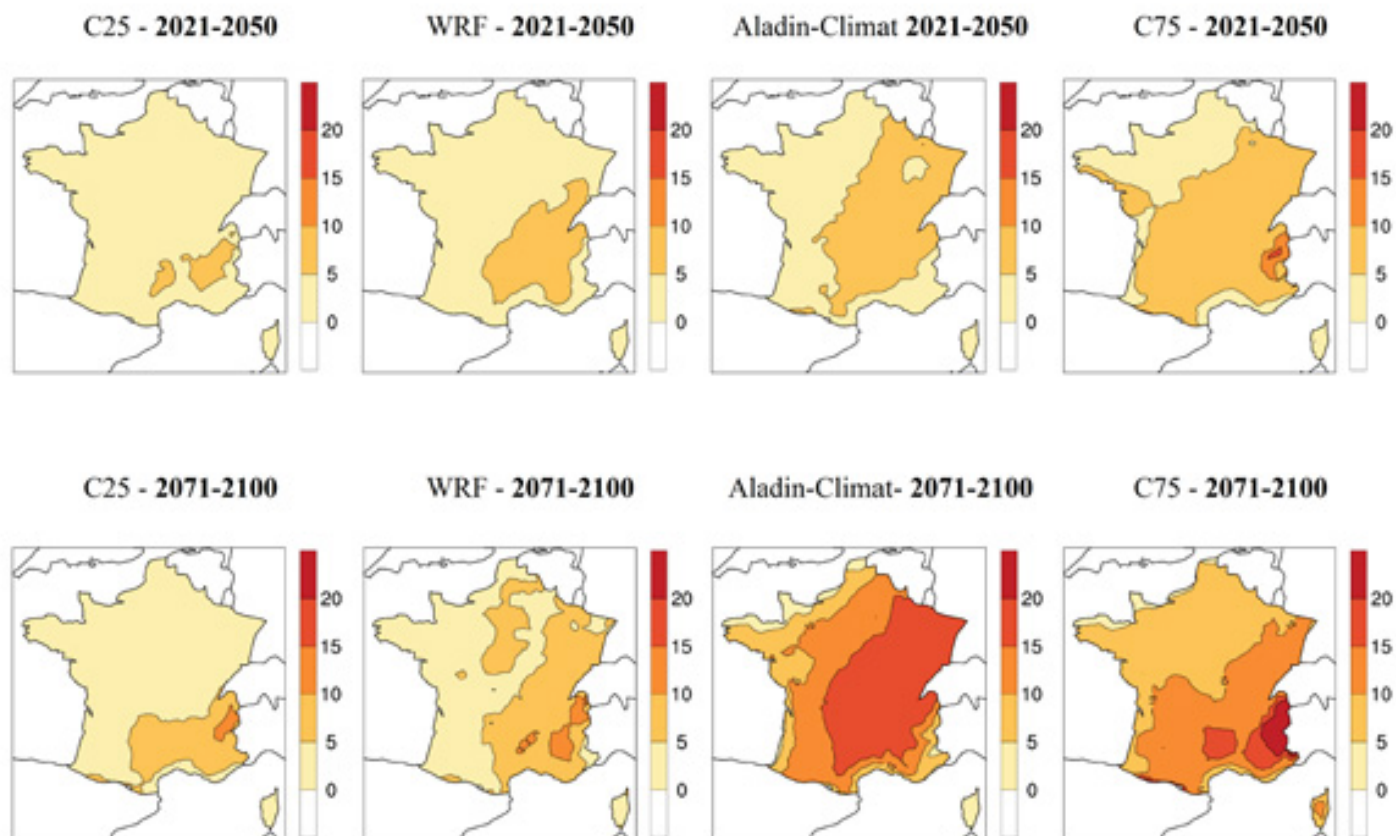


Figure 23 Projection de l'écart du nombre de jours de vague de chaleur par rapport aux moyennes de 1976-2015 pour les horizons 2021-2050 et 2071-2100 selon différents model(120).

D'après différentes projections des plus optimistes aux plus pessimistes, il pourrait y avoir une hausse des températures de 0,5 à 1,3°C d'ici 2050. De plus, il pourrait avoir une augmentation du nombre de jours de pics de chaleur en été et une diminution du nombre de jours plus froids en hiver. D'après ces mêmes prévisions, d'ici 2100, ces effets s'accroîtront toujours plus(121).

L'impact de ces différences de température au niveau de la pollinisation et de l'écosystème sera très important. En effet, le climat sera propice à l'évolution d'espèces allergisantes, mais aussi à une durée de pollinisation plus longue (Tableau II).

V. Le cout financier des pollinoses

Les allergies aux pollens ont un coût pour la sécurité sociale qui est parfois sous-estimé. Malheureusement, ces dépenses augmentent de façon importante depuis une cinquantaine d'années, et va continuer à augmenter, malgré beaucoup d'engagements menés par les actions publiques. Le but étant de diminuer la vitesse d'augmentation. Ainsi, le nombre croissant d'allergiques aux pollens à un coût en terme de prise en charge à long terme, en terme de prise en charge ambulatoire suite à des exacerbations, en terme d'arrêt de travail. La nécessité de devoir traiter les nouveaux allergiques de demain va considérablement augmenter ces dépenses. À ces dépenses s'ajoutent les politiques de lutte contre l'augmentation des allergies.

1) Le cout insoupçonné des allergies

a) Les coûts directs et indirects

Les allergies aux pollens se caractérisent par une symptomatologie très variée. Ainsi, ces allergies ont un retentissement important sur la qualité de vie. Il est difficile d'estimer le coût des allergies au vu des nombreux effets indirects des allergies. En effet, les pollinoses peuvent être à la base de coûts indirects *via* des arrêts de travail, des troubles du sommeil entraînant d'autres problèmes, peuvent augmenter le risque de comorbidités tel que l'asthme.

Les coûts directs liés à la prise en charge médicamenteuse passe parfois par l'utilisation de plusieurs molécules et différentes voies d'administrations au vu de la symptomatologie variée des allergies.

Par conséquent, les dépenses globales directes et indirectes sont assez difficiles à établir et varient d'une étude à l'autre. Cependant, très souvent, ces études estime que ces coûts sont sous-estimés.

b) Le seul exemple de l'Ambroisie

Le seul exemple de l'ambroisie nous permet d'avoir une estimation de ces coûts. Cette espèce très envahissante a un pollen très allergisant. En se développant dans certaines cultures agricoles, elle entraîne des pertes de rendement pouvant être importants. Son pollen entraîne une symptomatologie variée (rhinite, conjonctivite, etc.) nécessitant l'utilisation d'arsenal thérapeutique différent.

Au niveau de national, l'Anses¹ a établi des estimations de coût par année de l'impact de l'ambroisie. Les pertes sont de trois types :

- Les pertes financières attribuables à la prise en charges médicale : ces coûts sont estimés entre 59 et 186 millions d'euros par an.
- Les pertes de production économique, il peut s'agir des arrêts de travail : ces pertes sont estimées entre 10 et 30 millions d'euros par an.
- La perte de qualité de vie des personnes atteintes. Ces pertes, plus difficiles à établir sont les plus importantes. Elles sont estimées entre 346 et 438 millions d'euros par an.

¹ Anses : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Les conséquences

Donc toutes causes confondues, le seul exemple de l'ambroisie coûterait entre 415 et 654 millions d'euros à la France en seulement un an. Malheureusement, étant donné le gain de terrain de l'ambroisie en France et le changement climatique, ces coûts risquent d'augmenter dans les années à venir(122).

En 2013, l'Agence Régionale de Santé de la région Rhône-Alpes, particulièrement touchée par l'expansion de l'ambroisie, a estimé que les allergies au pollen d'ambroisie ont été responsables de la consommation de soins de près de 200'000 personnes. Cette consommation de soins en rapport avec l'allergie à l'ambroisie correspond à 15 millions d'euros.

Ainsi, un contrôle strict de la propagation de cette plante est donc nécessaire pour empêcher les nombreuses conséquences sur la santé et l'économie.

c) L'impact économique global

Les dépenses de santé directes concernent toutes les prises en charge des allergies en passant par les traitements comme les antihistaminiques, les traitements de désensibilisation, mais aussi toutes les hospitalisations. En France, les dépenses de santé directe vis-à-vis des allergies sont estimées aux alentours de 3,5 milliards d'euros par an. La sévérité d'une affection allergique fera varier les coûts de sa prise en charge. Par exemple, un patient avec un asthme mal contrôlé peut coûter près de 6 fois plus cher qu'un patient avec un asthme contrôlé(123). À savoir aussi que 50 à 80% des asthmes sont d'origine allergique(3), et en France, l'asthme à lui seul coûte au moins 900 millions d'euros d'hospitalisations chaque année. Si l'on ajoute à l'asthme les coûts des consultations et des traitements, alors son impact économique est estimé à 1,5 milliards d'euros par an.

Lorsque nous ajoutons à ces frais les dépenses de santé indirectes, les estimations peuvent aller jusqu'à 16 milliards d'euros par an. Au niveau européen, ces pertes peuvent être estimées à plus 130 milliards d'euros par an.

Par exemple, la rhinite allergique (RA) est très bien reconnue comme ayant un impact sur la qualité de vie mais aussi sur les performances au travail. Ainsi, contrairement à l'absentéisme provoqué par les rhinites allergiques, le présentéisme¹ aura un impact tout aussi important, si ce n'est pas plus. Cependant, évaluer l'impact qu'a une baisse de production provoquée par des rhinites allergiques est très compliqué. Une étude(124) sur la population suédoise de l'impact économique des rhinites allergiques a estimé le coût total des rhinites allergiques à plus de 1,3 milliards d'euros par an pour 9,5 millions d'habitants. Dans le calcul de ce montant est compris les impacts directs et indirects des allergies. Le présentéisme représenterait près de 70% de ce coût.

¹ À l'inverse de l'absentéisme, le présentéisme peut se définir comme le fait d'être présent physiquement au travail, mais d'avoir une diminution de sa production. Ici, la raison du présentéisme est l'impact sur la santé des rhinites allergiques, baissant ainsi de façon plus ou moins importante la production du salarié.

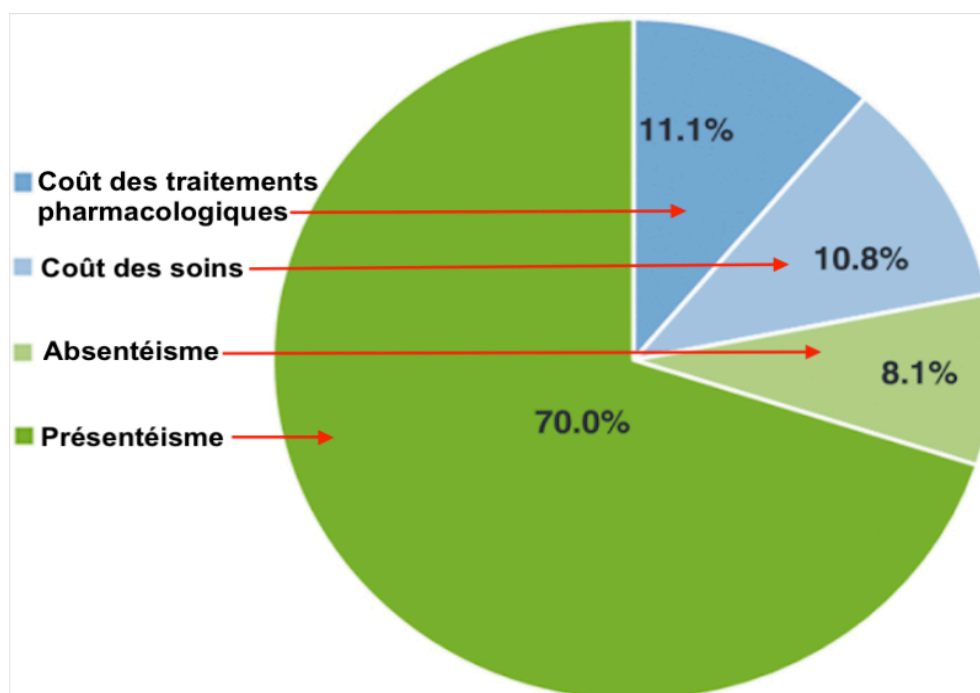


Figure 24 Répartition du pourcentage des coûts directs et indirects chez les patients atteints de rhinite allergique (124)

Dans cette étude, les coûts annuels directs et indirects des rhinites allergiques s'élevait à 961€ par individu et par an. Comme dit précédemment, la sévérité de la rhinite fait varier ce montant de 464€/individu/an pour les patients atteint de RA légère à plus de 1750€/individu/an pour les plus sévères (125).

Ainsi, le coût des traitements et de la prise en charge des allergies n'est pas la dépense plus importante vis à vis de l'économie du pays. À travers le monde, les allergies respiratoires sont considérées comme étant la première cause de perte de la productivité. Elle serait responsable d'une centaine de millions de jours de travail et d'école perdus chaque année en Europe.

Par conséquent, les coûts indirects peuvent être beaucoup plus important que les coûts visibles et directs des allergies. Pourtant, ces conséquences sont les dépenses totalement insoupçonnées des allergies.

2) L'augmentation de nouvelles personnes allergiques, l'augmentation de la nécessité de soigner

Les très nombreuses études sur le sujet arrivent à la même conclusion. La prévalence des pollinoses augmente, et va continuer à augmenter. Lorsque nous regardons la consommation médicamenteuse jusqu'à ce jour, nous observons une importante augmentation.

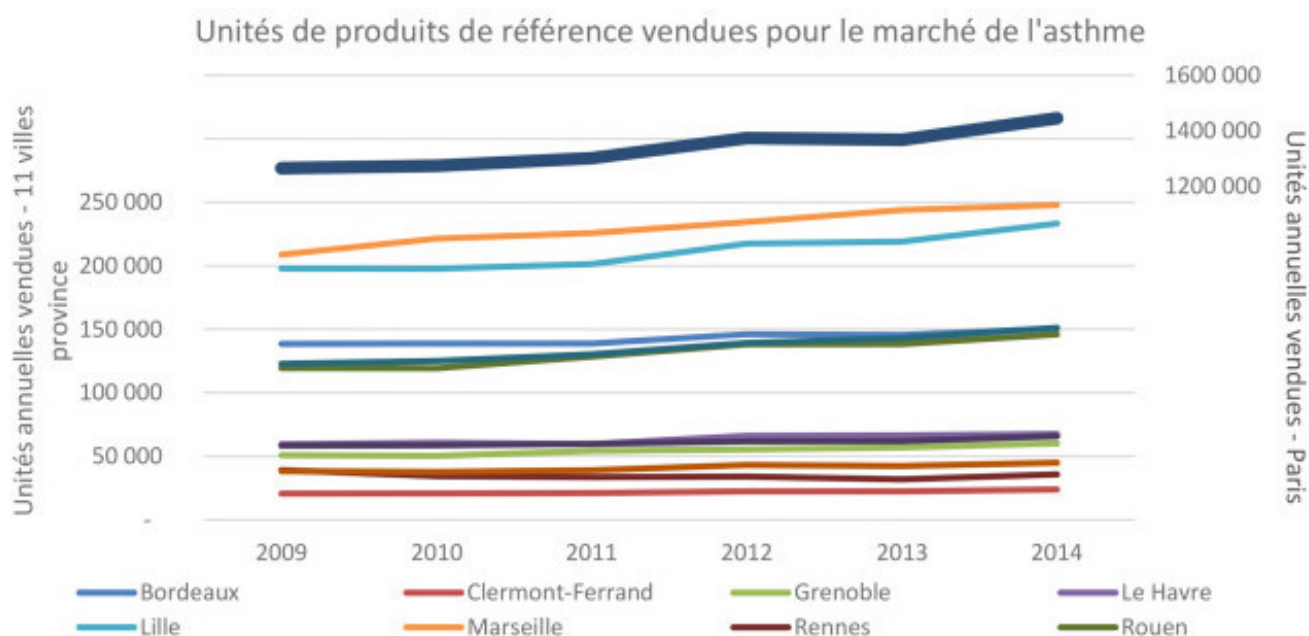


Figure 25 Unités de produits anti-asthmatiques vendus dans différentes villes françaises 2009 à 2014 (126)

Par exemple, l'évaluation du marché de l'asthme sur plusieurs années dans différentes villes françaises a permis de mettre en évidence une augmentation globale des ventes de produits anti-asthmatiques. Ces résultats s'expliquant par l'interaction de la pollution atmosphérique et de tous types d'allergies respiratoires.

Ainsi, l'augmentation du nombre de nouveaux malades est un véritable enjeu. Selon l'OMS, d'ici 2050, près de 50% de la population mondiale risque d'être allergique(126).

Partie 5.
Des solutions ?

I. Politique publique

Les allergies aux pollens, la pollution et la synergie entre les deux sont un enjeu très important pour la santé publique, mais aussi pour l'économie française. En effet, lorsqu'on additionne le coût financier des allergies et de la pollution, les dépenses et les pertes peuvent se compter à plusieurs dizaines voire centaines de milliards d'euros par an. De plus, cette synergie entre les deux, c'est à dire l'augmentation des pollinoses provoquée par la pollution n'arrange pas cette situation. En effet, la prévalence des allergies ont allergies a triplé en 20 ans.

Par conséquent, face à l'évolution de la situation, le gouvernement Français a pris des mesures importantes ces dernières décennies.

1) Le Plan National Santé-Environnement (PNSE) (127)

Le Plan National Santé-Environnement ou PNSE est un plan d'action pour garantir une bonne qualité d'air et d'eau afin de prévenir la survenue de pathologies d'origine environnementale. Cette approche pluridisciplinaire prend en compte toutes les interactions entre la santé et l'environnement. Ainsi, parmi les nombreuses actions du PNSE, nous pouvons y retrouver des actions anti-pollution et anti-pollinose.

a) Le PNSE1

Le premier plan appelé PNSE1 débute pour la période 2004-2008 sous l'autorité des Ministère de la santé, de l'écologie, du travail et de la recherche. Ainsi, des objectifs sont donnés dans cet intervalle. Ces objectifs se basent sur les recommandations de la charte de l'environnement et des lignes directrice de l'OMS.

L'approche de ce plan est pluridisciplinaire. Il ne s'attaque pas seulement à la pollution atmosphérique. Le PNSE était un ensemble de 45 actions divisées en 8 axes. Le but final étant une amélioration de l'interaction entre l'Homme et son environnement en passant par des législations concernant l'eau, l'air, le sol et les déchets. Le premier PNSE proposait entres autres la prévention des décès liés à des infections ou intoxications, améliorer la qualité des milieux (air, eau, sol), améliorer les dispositifs de veille et d'alerte, etc.

Concernant les actions vis-à-vis de la pollution de l'air, le PNSE1 proposait une baisse de l'émission de dioxyde de soufre, COV et oxydes d'azote, etc. Pour l'action sur les pollens, l'action était ciblée sur l'amélioration de la surveillance pollinique pour faciliter le système d'alerte, et de contrôler de façon plus stricte l'émission de composés augmentant le risque allergique du pollen (*ozone et particules diesel en particulier*).

Finalement, le PNSE1 a mis en avant l'importance du lien entre la santé et l'environnement et a donc permis l'investissement du pouvoir public dans ce domaine. À la suite du PNSE1, chaque régions a eu un enjeu local régi par les plans régionaux santé environnement ou PRSE.

b) Les PNSE 2 et 3(107)

Le premier plan proposé sur la période 2004-2008 est directement suivi du PNSE2 sur la période 2009-2013. Celui-ci avait 12 mesures phares telles que la réduction des expositions à des agents responsables de pathologies importantes sur la santé, la réduction de 30% des $PM_{2,5}$ dans l'air avant la fin du plan, des programmes de biosurveillance sanitaire, etc. De plus, des grands thèmes déjà présents dans le PNSE1 sont repris.

Par la suite, le PNSE3 est proposé sur la période 2015-2019. C'est le dernier plan achevé à ce jour. Le PNSE3 a intégré les notions très importantes de risque allergique et de santé publique. Ce plan s'est déroulé en 110 grandes actions, et a insisté pour la première fois sur la prévention des effets sanitaires en lien avec l'exposition à certaines espèces végétales. En effet, le PNSE3 s'est basé sur les résultats de l'ANSES de 2014 qui mettait en avant l'enjeu socio-économique considérable des allergies aux pollens et donc l'importance des actions à mener pour diminuer cet impact. Ainsi, dans ce plan, des actions concernent la prévention des effets sanitaires des allergies et l'exposition à certaines espèces végétales, nous pouvons citer par exemple :

- Renforcer la surveillance et l'information ainsi que les prévisions des concentrations dans l'air extérieur de pollens allergisants. Le but de cette action est d'améliorer la prise en charge des allergies et la gestion des espèces allergisantes. Le fonctionnement du RNSA¹ est ainsi réévalué dans le but d'assurer une surveillance et un système d'information efficace.
- Réalisation d'un travail de hiérarchisation des pollens dans le but de surveiller les nouvelles espèces qui se développent et dont le pollen pourrait être allergisant. Ainsi, cela permet de mettre en place des plans d'action pour limiter leur expansion.
- Réduire la présence d'espèces aux pollens allergisants et informer des risques de vente de végétaux à risque allergique.
- Évaluer l'exposition à l'ambrosie et contrôler son expansion géographique.
- Amélioration de la gestion des risques sanitaires qui impliquent la faune et la flore sauvage.

Pour chaque action, des indicateurs de réalisation permettent de suivre le bon déroulé de celle-ci. Parmi les partenaires du PNSE, nous retrouvons les différents organismes tels que le RNSA, ANSES, les ARS, les collectivités territoriales, etc.

En plus des différentes actions en lien avec les effets sanitaires de l'exposition à certaines espèces végétales, le PNSE3 a aussi pour but d'agir pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et extérieur. En effet, parmi les nombreuses actions du PNSE3, nous pouvons retrouver l'élaboration d'un programme visant à réduire les émissions de polluants toxiques pour la santé et ayant un impact négatif sur le climat. Les polluants concernés sont ainsi les plus courants, c'est à dire le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils, les matières particulaires fines ($PM_{2,5}$), etc.

¹ Réseau National de Surveillance Aérobiologique

Ainsi, pour réaliser ces actions, il y a renforcement des actions dans différents domaines tel que:

- Le transport : restrictions de circulation pour les véhicules les plus polluants dans certaines régions.
- Chauffage domestique : Réduire les émissions liées aux chauffages domestiques peu performants voire obsolètes.

c) Le PNSE4(128)

Le PNSE3 a permis d'élaborer un rapport détaillé sur les différentes actions menées mais aussi celles qui doivent être encore déployées et améliorées. Avec la préoccupation grandissante de la population face aux différents problèmes engendrés par la dégradation environnementale, les Ministères de la santé et de la transition écologique ont lancé le 4^e plan ou PNSE4 sur la période 2020-2024. Ce plan se base entre autres sur la constatation de l'OMS selon laquelle 25% des pathologies chroniques sont attribuables à des facteurs environnementaux et comportementaux. Ainsi, l'objectif principal de ce plan est de comprendre toujours plus les risques pour mieux s'en protéger.

Le PNSE4 reprend de nombreuses d'actions du 3^e plan telles que la réduction de l'exposition aux polluants ayant un impact sur la santé, mais aussi augmenter et améliorer les actions territoriales. Il se déroule en 19 actions divisées en 4 axes :

- L'information de l'état de l'environnement et des gestes adopter. L'enjeu étant la formation et l'information de la population et des professionnels de santé dans le but d'étendre la connaissance de notre environnement afin de mieux s'en protéger mais aussi de mieux soigner.
- Diminuer les expositions environnementales qui ont un effet sur la santé. L'exposition environnementale concerne tous ce qui peut avoir un impact néfaste sur la santé humaine. Il s'agit entre autres des pollens et des espèces envahissantes telles que l'ambrosie, mais aussi l'exposition aux ondes électromagnétiques, la pollution des sols, etc.
- Augmenter les actions concrètes réalisées dans les différents territoires. Le but étant ici de créer une plateforme collaborative pour les collectivités pour toutes les actions en lien avec la santé environnementale.
- Améliorer les connaissances de l'exposition de l'environnement et les effets sur la santé à long terme sur la population. Le but est d'introduire dans le code de santé publique la notion d'exposome. Cette notion correspond à l'ensemble des expositions environnementales de l'organisme humain au cours de la vie d'un individu. Cette notion permettrait ainsi de mieux comprendre la survenue de certaines pathologies afin de soigner plus facilement ou même de les éviter. Pour cela, il est d'abord proposé de faciliter l'accès à l'ensemble des données environnementales. De plus, il y a aussi le financement de recherche dans le but de mieux caractériser cet exposome.

Nous constatons ainsi une approche toujours globale du PNSE4.

2) Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique(44)

Le RNSA ou Réseau National de Surveillance Aérobiologique est une association créée en 1996. Le but de ce réseau est l'étude du contenu en particules biologiques de l'air. Les particules biologiques surveillées sont celles ayant un impact sur la santé telles que les grains de pollens ou les moisissures. Ces données sont ainsi publiées sur le site du RNSA (www.pollens.fr) dans le but d'avertir et de prévenir des risques allergiques en publiant des bulletins allergeo-polliniques.

Ce réseau fonctionne grâce à des sites de recueil *via* des capteurs de concentration de pollen. Ces sites sont stratégiquement placés en fonction de critères botaniques, climatiques et de densité de populations. Chaque site est continué d'au moins un capteur auquel est rattaché un responsable, un analyste ainsi qu'un médecin.

Par la suite, le centre de coordination du RNSA reçoit et traite les résultats des différentes analyses polliniques à travers le pays et peut ainsi rédiger les bulletins allergeo-polliniques. Ces bulletins sont ensuite transmis aux Ministères de la santé et de l'écologie, mais aussi aux médias.

Les capteurs utilisés par le RNSA sont des capteurs volumétriques de type HIRST présentant trois grandes caractéristiques :

- L'aspiration d'un débit d'air régulier qui est équivalent à la respiration humaine, soit environ 10L/min
- Un mode d'enregistrement qui permet une analyse par tranches journalières ou horaires.
- Stabilité et transparence du support du matériel. Ceci permet une lecture plus précise et facile.

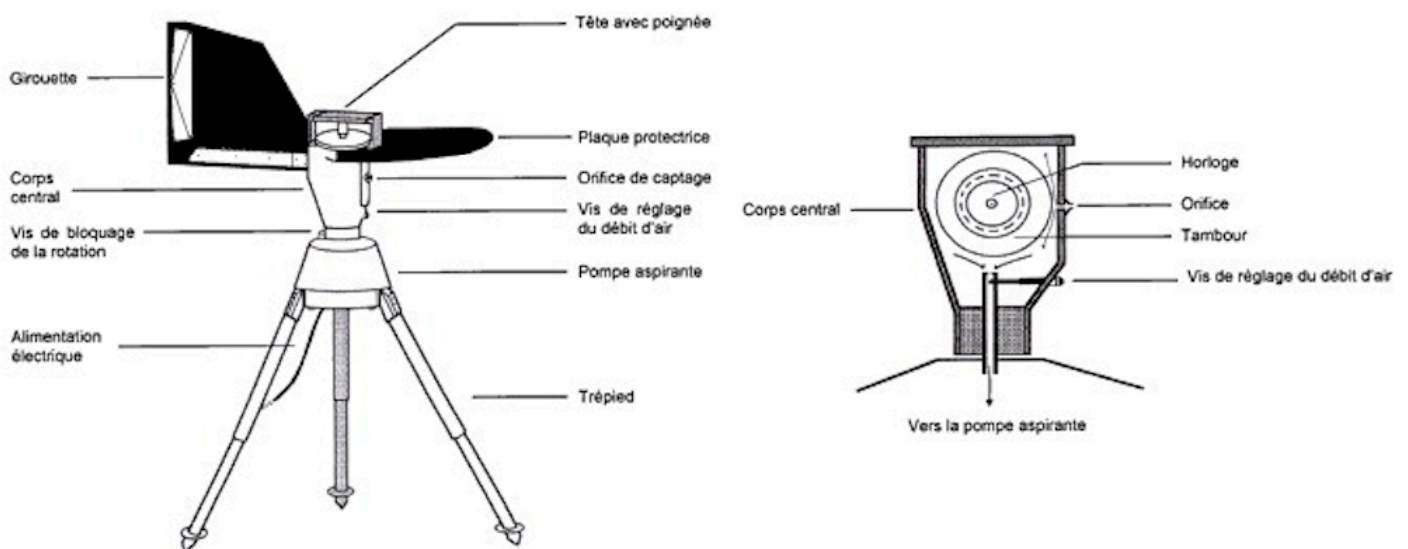


Figure 26 Schéma d'un capteur de HIRST(129)

Le capteur de HIRST est solidement fixé au sol et est protégé de la pluie. Le débit d'air entrant dans le capteur rencontre un film de cellophane enduit de substance adhésive sur laquelle les particules aéroportées viennent s'impacter. Ce capteur est associé à un système d'horloge avec une autonomie de 7 jours en faisant défiler cette bande adhésive. Au cours d'une journée, toutes les particules en suspension s'y déposent. Le système d'horloge automatique permet ainsi d'identifier le jour ainsi que l'heure de dépôt. Ces segments sont par la suite colorés grâce à un colorant qui se fixe spécifiquement sur l'exine des grains de pollens. L'identification et le dénombrement des grains de pollens sont faits dans un deuxième temps par microscopie optique. Un capteur est considéré comme étant représentatif de la concentration en pollen dans un rayon de 20 à 30kms autour de celui-ci.

Ainsi, cette surveillance allerge-pollinique est un élément très important pour la prévention, le diagnostic et le traitement des maladies respiratoires saisonnières (129).

II. La place du pharmacien

1) Les conseils

Le pharmacien est un acteur important dans la prise en charge du patient allergique. L'objectif est de traiter et réduire les symptômes allergiques, mais aussi de les prévenir.

Les principales mesures pour diminuer les allergies aux pollens consistent à limiter le contact avec l'allergène car l'éviction du pollen reste compliquée. En effet, dans le cas d'allergie à des chats ou chiens, l'éviction reste plus simple que le pollen présent en grande quantité dans l'atmosphère. Pour cela, il est conseillé aux patients de consulter les calendriers polliniques. Ce sont des bulletins relatifs à la quantité de pollens présents dans l'air afin d'évaluer le risque allergique de la journée. Cela permettra aux patients d'adapter leur traitement. Cependant, pour cela, le patient doit bien connaître ses allergies ainsi que ses symptômes.

Comme dit précédemment, la simple éviction n'est pas suffisante étant donné le type de pollinisation qui libère de très grandes quantités de pollen dans l'air. Cependant, il est possible d'empêcher la contamination de l'air intérieur des logements par les pollens. Pour cela, il sera conseillé aux patients d'aérer la maison lorsqu'il pleut ou bien très tôt le matin ou tard le soir, c'est à dire à des heures où les concentrations en pollens dans l'air sont le moins élevées. De plus, lorsque les calendriers polliniques indiquent des risques allergiques élevés, il est préférable de ne pas faire sécher son linge à l'extérieur. D'autres conseils peuvent être donnés comme par exemple se laver les cheveux le soir avant de se coucher afin de retirer tous les pollens qui se seraient fixés aux cheveux de l'individu.

2) L'information patientèle(130)

Avec l'augmentation importante des allergies dans le monde, la simple éviction n'est malheureusement pas suffisante. C'est pour cette raison que les patients sont dans l'obligation de prendre des traitements. En officine, beaucoup de patients se présentent avec des symptômes évocateurs d'allergies. C'est donc le rôle du pharmacien de les reconnaître et de donner les conseils adéquats.

Lorsque le patient a été diagnostiqué par un allergologue, il connaît la nature de son allergie et est donc traité pour l'allergie. Dans ce cas, le rôle du pharmacien est l'explication des traitements et les conseils associés. Cependant, lorsque le patient ne connaît ni la nature de son allergie, ni les conduites à tenir, le pharmacien a un rôle d'information très important. En effet, le temps d'errance thérapeutique chez les patients allergiques est en moyenne de 7 ans. Cette très longue période durant laquelle le patient n'est pas diagnostiqué, et donc non traité est à l'origine de l'aggravation de la maladie allergique qui, bien souvent, était bénigne à l'origine. La prise en charge précoce des patients allergiques permet un meilleur contrôle et nécessite donc des traitements moins coûteux. De plus, plus un patient est pris en charge tôt, plus les conséquences de son allergie seront faibles sur son activité professionnelle. Par conséquent, cette errance thérapeutique est un coût humain et financier très important. Le pharmacien a donc un rôle très important dans l'éducation de sa patientèle afin de les diriger lorsqu'ils en ont besoin vers un allergologue.

Partie 6. Conclusion

De nos jours, les allergies aux pollens sont malheureusement beaucoup plus présentes et sévères. Ces dernières décennies, elles ont véritablement augmenté. De très nombreuses études ont démontré les implications directe et indirecte de la pollution atmosphérique.

Le sujet de la pollution atmosphérique se trouve être au cœur de l'actualité et devrait être une des préoccupations principales des autorités. Les effets de la pollution atmosphérique sont très nombreux. Ils peuvent provoquer de graves problèmes de santé et sont responsables de la mort prématurée de millions de personnes à travers le monde. Les effets de la pollution ne se sont malheureusement pas limités à la santé humaine puisque la biodiversité est elle aussi fortement impactée

A l'heure actuelle, l'humanité se trouve dans un cercle vicieux à travers lequel il sera très difficile de sortir. En réalité, l'émission de polluants atmosphériques provoque des atteintes à la santé humaine, mais certains de ces polluants sont aussi des gaz à effet de serre. Il y a donc un double impact sur le réchauffement climatique.

À travers cette thèse, nous avons vu que la pollution atmosphérique a des conséquences importantes sur la physiologie des plantes. En effet, certaines plantes vont augmenter leur émission de pollen dans l'atmosphère. Une fois dans l'air, ces pollens sont en contact avec les polluants, ce qui provoque leur fragilité, les rendant beaucoup plus allergènes. De plus, nous savons que la composition en protéines du grain de pollen peut aussi être altérée. Il en résulte un pollen avec des protéines allergiques plus importantes.

Le réchauffement climatique a lui aussi des enjeux sur cette pollinisation. Les plantes pollinisent durant les saisons chaudes, donc le réchauffement climatique aura tendance à accroître la durée de pollinisation.

Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine ne sont pas moindres. En effet, il est prouvé que le contact avec certains polluants a tendance à altérer le système immunitaire, le rendant plus réactif et plus sensible.

Par ailleurs, la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique développent les périodes de pollinisation durant lesquelles il y a une augmentation du nombre de pollens qui sont eux-mêmes plus allergènes et fragiles, facilitant alors la libération de leur contenu.

Les conséquences de la corrélation entre la pollution atmosphérique et les pollinoses sont très nombreuses.

D'abord, les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine ont des coûts humains et financiers extrêmement importants. Lorsqu'on l'on ajoute à cela les effets sur les pollinoses, on s'aperçoit de la gravité de la situation. Effectivement, les études sur le devenir de notre planète sont bien connues, mais surement ignorées. Les étés dureront plus longtemps, et seront plus intenses.

Bien que beaucoup de réglementations anti-pollution aient été mises en vigueur dans certains pays, le constat est sans appel, rien ne s'améliore. Bien conscient de la gravité de la situation, peu d'actions concrètes sont réellement prises.

L'inquiétude pour notre avenir est donc bien réelle.

Est-il devenu dangereux de respirer?

Référence Bibliographique

1. Allergies - Un dérèglement du système immunitaire de plus en plus fréquents - INSERM. Inserm - La science pour la santé.
2. DE BLAY F., LIEUTIER-COLAS F., LEFÈVRE-BALLEYDIER. Allergies et environnement intérieur, risques et prévention. 2005.
3. Wallaert B, Birnbaum J. Le grand livre des allergies - Fédération française d'allergologie (FFA).
4. The Gell–Coombs classification of hypersensitivity reactions: a re-interpretation », Trends in Immunology [Internet].. Disponible sur: http://lvts.fr/Pages_html/Encyclopedies/Cours%20Immuno/chapitre16.htm
5. Larousse É. étamine bas latin stamina pluriel du latin classique stamen -inis fil - LAROUSSE [Internet]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/encyclopedia/divers/%C3%A9tamine/49609>
6. Larousse É. Double fécondation végétale – Média LAROUSSE [Internet]. [cité 19 sept 2021]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/encyclopedia/animations/Double_f%C3%A9condation_v%C3%A9g%C3%A9tale/1100089
7. Physiologie Végétale - Formation d'un grain de pollen bicellulé ou tricellulé : Bicellulé : A StuDocu. Disponible sur: <https://www.studocu.com/fr/document/universite-toulouse-iii-paul-sabatier/physiologie-vegetale/cm4-physiologie-vegetale/1799715>
8. Dahl Å. Pollen Lipids Can Play a Role in Allergic Airway Inflammation. Front Immunol [Internet]. 2018;9. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fimmu.2018.02816/full#h6>
9. Proctor M, Yeo PF, Yeo P, Lack A. The Natural History of Pollination. Timber Press; 1996. 502 p.
10. Les polluants [Internet]. Disponible sur: <https://www.ligair.fr/la-pollution/les-polluants-1>
11. Fiches toxicologiques - Publications et outils - INRS [Internet]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox.html>

-
12. Qualité de l'air ambiant et santé [Internet]. Disponible sur: [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)
 13. LOI SUR L'AIR (LAURE - 1996) [Internet]. Respire. Disponible sur: <https://www.respire-asso.org/loi-sur-lair-laure-1996/>
 14. Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2018 [Internet]. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-de-la-qualite-de-lair-exterieur-en-france-en-2018>
 15. Lig'Air - Qualité de l'air en région Centre-Val de Loire [Internet]. Disponible sur: <https://www.ligair.fr/>
 16. Koo LC, Ho JH, Ho CY, Matsuki H, Shimizu H, Mori T, et al. Personal exposure to nitrogen dioxide and its association with respiratory illness in Hong Kong. *Am Rev Respir Dis*. mai 1990;141(5 Pt 1):1119-26.
 17. Titre II: Air et atmosphère (Articles R221-1 à R229-102) - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006143775/#LEGISCTA000006143775
 18. Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2019 [Internet]. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-de-la-qualite-de-lair-exterieur-en-france-en-2019-0>
 19. Article 55 - LOI n° 2020-1721 du 29 décembre 2020 de finances pour 2021 (1) - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000042753646?r=cAUENQO MQG
 20. Citepa 2020 [Internet]. Citepa. 2019 [cité 20 sept 2021]. Disponible sur: <https://www.citepa.org/fr/secten/>
 21. Visez N, Ivanovsky A, Roose A, Gosselin S, Sénéchal H, Poncet P, et al. Atmospheric particulate matter adhesion onto pollen: a review. *Aerobiologia*. 1 mars 2020;36(1):49-62.
 22. Lin H, Gomez I, Meredith JC. Pollenkitt Wetting Mechanism Enables Species-Specific Tunable Pollen Adhesion. *Langmuir*. 5 mars 2013;29(9):3012-23.
 23. Duque L, Guimarães F, Ribeiro H, Sousa R, Abreu I. Airborne Platanus Pollen Analysis by EPMA. *Microsc Microanal*. août 2012;18(S5):39-40.

-
24. Cerceau-Larrival, M. T., Nilsson, S., Berggren, Carbonnier-Jarreau, Derouet, L. Influence de l'environnement sur les pollens de *Betula verrucosa* Ehrl. Actual Bot. 1990;(137).
 25. Duque L, Guimarães F, Ribeiro H, Sousa R, Abreu I. Elemental characterization of the airborne pollen surface using Electron Probe Microanalysis (EPMA). Atmos Environ. 1 août 2013;75:296-302.
 26. Sénéchal H, Visez N, Charpin D, Shahali Y, Peltre G, Biolley J-P, et al. A Review of the Effects of Major Atmospheric Pollutants on Pollen Grains, Pollen Content, and Allergenicity. Sci World J. 24 déc 2015;2015:e940243.
 27. Ouyang Y, Xu Z, Fan E, Li Y, Zhang L. Effect of nitrogen dioxide and sulfur dioxide on viability and morphology of oak pollen. Int Forum Allergy Rhinol. 2016;6(1):95-100.
 28. Naas O, Mendez M, Quijada M, Gosselin S, Farah J, Choukri A, et al. Chemical modification of coating of *Pinus halepensis* pollen by ozone exposure. Environ Pollut. 1 juill 2016;214:816-21.
 29. Impacts de l'exposition à la pollution de l'air sur les propriétés allergènes des pollens de cyprès d'Arizona - IOPscience [Internet]. [cité 21 sept 2021]. Disponible sur: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/151/1/012027/meta>
 30. Motta AC, Marliere M, Peltre G, Sterenberg PA, Lacroix G. Traffic-related air pollutants induce the release of allergen-containing cytoplasmic granules from grass pollen. Int Arch Allergy Immunol. 2006;139(4):294-8.
 31. Abou Chakra O. Allergénicité des Granules Cytoplasmiques de Pollen [Internet] [thesis]. <http://www.theses.fr>. Paris 7; 2009. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2009PA077058>
 32. Isabelle Beck, Susanne Jochner, Gilles Stefanie, Mareike McIntyre. High Environmental Ozone Levels Lead to Enhanced Allergenicity of Birch Pollen. 101371/journal.pone0080147.
 33. Choi Y-J, Oh H-R, Oh J-W, Kim KR, Kim M-J, Kim B-J, et al. Chamber and Field Studies demonstrate Differential Ambient CO_2 Contents in Common Ragweed Depending on CO_2 Levels. Allergy Asthma Immunol Res. 26 févr 2018;10(3):278-82.
 34. Møller AP, Mousseau TA. Radiation Levels Affect Pollen Viability and Germination among Sites and Species at Chernobyl. Int J Plant Sci. 17 juill 2017;178(7):537-45.
 35. Misztal PK, Hewitt CN, Wildt J, Blande JD, Eller ASD, Fares S, et al. Atmospheric benzenoid emissions from plants rival those from fossil fuels. Sci Rep. 13 juill 2015;5(1):12064.

-
36. Singh N, Thakur AK, Sharma PL, Sharma P. Climate Change and Environmental Issues. The Energy and Resources Institute (TERI); 2016. p97 p.
37. Baier M, Kandlbinder A, Golldack D, Dietz K-J. Oxidative stress and ozone: perception, signalling and response. *Plant Cell Environ.* 2005;28(8):1012-20.
38. Kim KR, Oh J-W, Woo S-Y, Seo YA, Choi Y-J, Kim HS, et al. Does the increase in ambient CO₂ concentration elevate allergy risks posed by oak pollen? *Int J Biometeorol.* 1 sept 2018;62(9):1587-94.
39. Albertine JM, Manning WJ, DaCosta M, Stinson KA, Muilenberg ML, Rogers CA. Projected Carbon Dioxide to Increase Grass Pollen and Allergen Exposure Despite Higher Ozone Levels. *PLOS ONE.* 5 nov 2014;9(11):e111712.
40. Scripps Institution of Oceanography | [Internet]. Disponible sur: <https://scripps.ucsd.edu/>
41. News CH Nathaniel Gronewold,E&E. CO₂ Emissions Will Break Another Record in 2019 [Internet]. *Scientific American.* Disponible sur: <https://www.scientificamerican.com/article/co2-emissions-will-break-another-record-in-2019/>
42. 509983main_adjusted_annual_temperature_anomalies _final.pdf [Internet].. Disponible sur: https://www.nasa.gov/pdf/509983main_adjusted_annual_temperature_anomalies%20_final.pdf
43. durable C général au développement. Ministère de la transition écologique [Internet]. Chiffres clés du climat. Disponible sur: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/>
44. Accueil — Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique — RNSA [Internet].. Disponible sur: <https://www.pollens.fr/>
45. Besancenot J-P, Thibaudon M. Changement climatique et pollinisation. *Rev Mal Respir.* 1 déc 2012;29(10):1238-53.
46. Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique — RNSA [Internet]. Disponible sur: <https://www.pollens.fr/>
47. Hallouët P. FICHE 24 - Le système respiratoire. In: Hallouët P, éditeur. *Méga Mémo IFSI (Deuxième Édition)* [Internet]. Paris: Elsevier Masson; 2016. p. 244-50. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9782294749247500300>

-
48. Tachdjian G, Brisset S, Courtot A-M, Schoëvaert D, Tosca L, éditeurs. Chapitre 2 - Appareil respiratoire. In: Embryologie et Histologie Humaines [Internet]. Paris: Elsevier Masson; 2016. p. 19-39. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9782294737794000020>
49. Khelloufi M-K, Gras D, Garulli C, Viallat A, Chanez P. Étude de l'activité mucociliaire dans l'asthme sévère. *Rev Mal Respir*. 1 janv 2014;31:A196-7.
50. Nanomatériaux, nanoparticules. Ce qu'il faut retenir - Risques - INRS [Internet]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/nanomateriaux/ce-qu-il-faut-retenir.html>
51. La pollution de l'air intérieur: Sources, Effets sanitaires, Ventilation - ScholarVox Université [Internet]. Disponible sur: <https://univ-scholarvox-com.proxy.scd.univ-tours.fr/reader/docid/45006325/page/5?searchterm=dioxyde%20d%27azote>
52. Bowatte G, Lodge C, Lowe AJ, Erbas B, Perret J, Abramson MJ, et al. The influence of childhood traffic-related air pollution exposure on asthma, allergy and sensitization: a systematic review and a meta-analysis of birth cohort studies. *Allergy*. 2015;70(3):245-56.
53. D'Amato G, Liccardi G, D'Amato M, Cazzola M. Outdoor air pollution, climatic changes and allergic bronchial asthma. *Eur Respir J*. 1 sept 2002;20(3):763-76.
54. Eilstein D. Exposition prolongée à la pollution atmosphérique et mortalité par pathologies respiratoires. *Rev Mal Respir*. 1 déc 2009;26(10):1146-58.
55. Short-Term Effects of the Particulate Pollutants Contained in Saharan Dust on the Visits of Children to the Emergency Department due to Asthmatic Conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean) [Internet]. Disponible sur: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0091136>
56. Kim K-H, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ Int*. 1 janv 2015;74:136-43.
57. Lubitz S, Schober W, Pusch G, Effner R, Klopp N, Behrendt H, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons from diesel emissions exert proallergic effects in birch pollen allergic individuals through enhanced mediator release from basophils. *Environ Toxicol*. 2010;25(2):188-97.
58. Louis R, Schleich F. La vignette thérapeutique de l'étudiant Quand l'asthme se révèle. *Rev Med Liège*. :5.
59. Jayes L, Haslam PL, Gratziau CG, Powell P, Britton J, Vardavas C, et al. SmokeHaz: Systematic Reviews and Meta-analyses of the Effects of Smoking on Respiratory Health. *Chest*. 1 juill 2016;150(1):164-79.

-
60. Labbé G, Egron C, Labbé A. Le tabagisme passif chez l'enfant et les risques allergiques. *Rev Fr Allergol*. 1 oct 2020;60(6):540-6.
61. Strzelak, A., Ratajczak, A., Adamiec, A., Feleszko, W. Tobacco smoke induces and alters immune responses in the lung triggering inflammation, allergy, asthma and other lung diseases: A mechanistic review. 21 mai 2018;
62. Brun O, Caillaud D, Charpin D, Dalphin J-C. La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire : les experts du groupe PAPPEI répondent au Bureau de la SPLF. *Rev Mal Respir*. 1 déc 2019;36(10):1083-7.
63. Li S, Batterman S, Wasilevich E, Elasaad H, Wahl R, Mukherjee B. Asthma exacerbation and proximity of residence to major roads: a population-based matched case-control study among the pediatric Medicaid population in Detroit, Michigan. *Environ Health*. 23 avr 2011;10(1):34.
64. Carlsten C, Melén E. Air pollution, genetics, and allergy: an update. *Curr Opin Allergy Clin Immunol*. oct 2012;12(5):455-61.
65. Bayram H, Sapsford RJ, Abdelaziz MM, Khair OA. Effect of ozone and nitrogen dioxide on the release of proinflammatory mediators from bronchial epithelial cells of nonatopic nonasthmatic subjects and atopic asthmatic patients in vitro. *J Allergy Clin Immunol*. févr 2001;107(2):287-94.
66. Sparfel L. Effets immunotoxiques des polluants environnementaux : exemple des hydrocarbures aromatiques polycycliques. *Arch Mal Prof Environ*. 1 déc 2016;77(6):990-7.
67. Hew KM, Walker AI, Kohli A, Garcia M, Syed A, McDonald-Hyman C, et al. Childhood exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons is linked to epigenetic modifications and impaired systemic immunity in T cells. *Clin Exp Allergy*. 2015;45(1):238-48.
68. Cherrie JW, Apsley A, Cowie H, Steinle S, Mueller W, Lin C, et al. Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air pollution. *Occup Environ Med*. 1 juin 2018;75(6):446-52.
69. Laumbach RJ, Kipen HM, Ko S, Kelly-McNeil K, Cepeda C, Pettit A, et al. A controlled trial of acute effects of human exposure to traffic particles on pulmonary oxidative stress and heart rate variability. *Part Fibre Toxicol*. 1 nov 2014;11(1):45.
70. Atkinson RW, Fuller GW, Anderson HR, Harrison RM, Armstrong B. Urban Ambient Particle Metrics and Health: A Time-series Analysis. *Epidemiology*. 2010;21(4):501-11.
71. Atkinson RW, Anderson HR, Sunyer J, Ayres J, Baccini M, Vonk JM, et al.

Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. Air Pollution and Health: a European Approach. Am J Respir Crit Care Med. 15 nov 2001;164(10 Pt 1):1860-6.

72. Godzinski A, Suarez Castillo M. La pollution de l'air due au trafic automobile augmente les admissions aux urgences pour maladies respiratoires - Insee Analyses - 46 [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4160040>

73. McCreanor J, Cullinan P, Nieuwenhuijsen MJ, Stewart-Evans J, Malliarou E, Jarup L, et al. Respiratory Effects of Exposure to Diesel Traffic in Persons with Asthma. N Engl J Med. 6 déc 2007;357(23):2348-58.

74. Segala C, Fauroux B, Just J, Pascual L, Grimfeld A, Neukirch F. Short-term effect of winter air pollution on respiratory health of asthmatic children in Paris. Eur Respir J. 1 mars 1998;11(3):677-85.

75. Exposure to airborne particulate matter is associated with methylation pattern in the asthma pathway | Epigenomics [Internet]. Disponible sur: <https://www.futuremedicine.com/doi/abs/10.2217/epi.13.16>

76. Tecer LH, Alagha O, Karaca F, Tuncel G, Eldes N. Particulate Matter (PM2.5, PM10-2.5, and PM10) and Children's Hospital Admissions for Asthma and Respiratory Diseases: A Bidirectional Case-Crossover Study. J Toxicol Environ Health A. 12 mars 2008;71(8):512-20.

77. Shah ASV, Lee KK, McAllister DA, Hunter A, Nair H, Whiteley W, et al. Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis. BMJ. 24 mars 2015;350:h1295.

78. Définition de Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) [Internet]. Actu-Environnement. Actu-environnement; [cité 21 sept 2021]. Disponible sur: https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/associations_agreees_de_surveillance_de_la_qualite_de_l_air_aasqa.php4

79. ATIH: Agence technique de l'information sur l'hospitalisation [Internet]. [cité 21 sept 2021]. Disponible sur: <https://www.atih.sante.fr/>

80. Bell ML, Davis DL. Reassessment of the lethal London fog of 1952: novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution. Environ Health Perspect. juin 2001;109(Suppl 3):389-94.

81. SPF. Sante publique france [Internet]. SPF Santé Publique France. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/>

82. SPF. Programme de surveillance Air et Santé 9 villes. Surveillance des effets

sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain. Phase II. Revue de synthèse [Internet]. Disponible sur: /determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/programme-de-surveillance-air-et-sante-9-villes.-surveillance-des-effets-sur-la-sante-lies-a-la-pollution-atmospherique-en-milieu-urbain.-phase-ii

83. SPF. Programme de surveillance. Air et santé. (PSAS-9). Estimation des effets à long terme sur la mortalité de la pollution atmosphérique urbaine : quels critères pour le choix d'une cohorte ? [Internet]. [cité 21 sept 2021]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/programme-de-surveillance.-air-et-sante.-psas-9.-estimation-des-effets-a-long-terme-sur-la-mortalite-de-la-pollution-atmospherique-urbaine-quel>

84. Newby DE, Mannucci PM, Tell GS, Baccarelli AA, Brook RD, Donaldson K, et al. Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. Eur Heart J. 7 janv 2015;36(2):83-93.

85. YEMADJE M, MENUDIER (L.) Y, JEANNEL (D.), YAHYAOUÏ (A.), CORBEL (C.). Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine dans l'agglomération de Tours, 2008-2010. Impact à court et à long terme. 2013;

86. Pollution atmosphérique : quels sont les risques ? [Internet]. [cité 21 sept 2021]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/articles/pollution-atmospherique-quels-sont-les-risques>

87. Fang Y, Naik V, Horowitz LW, Mauzerall DL. Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present. Atmospheric Chem Phys. 4 févr 2013;13(3):1377-94.

88. Evaluating the Effects of Ambient Air Pollution on Life Expectancy | NEJM [Internet]. [cité 10 avr 2021]. Disponible sur: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejme0809178>

89. Household air pollution and health [Internet]. Disponible sur: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

90. Brandt EB, Beck AF, Mersha TB. Air pollution, racial disparities, and COVID-19 mortality. J Allergy Clin Immunol. juill 2020;146(1):61-3.

91. Coker ES, Cavalli L, Fabrizi E, Guastella G, Lippo E, Parisi ML, et al. The Effects of Air Pollution on COVID-19 Related Mortality in Northern Italy. Environ Resour Econ. 1 août 2020;76(4):611-34.

92. Persico CL, Johnson KR. The effects of increased pollution on COVID-19 cases and deaths. J Environ Econ Manag. 1 mai 2021;107:102431.

93. Zhu Y, Xie J, Huang F, Cao L. Association between short-term exposure to air

pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. *Sci Total Environ.* 20 juill 2020;727:138704.

94. Zhang Z, Xue T, Jin X. Effects of meteorological conditions and air pollution on COVID-19 transmission: Evidence from 219 Chinese cities. *Sci Total Environ.* 1 nov 2020;741:140244.

95. Charpin D, Pairon J-C, Annesi-Maesano I, Caillaud D, de Blay F, Dixsaut G, 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.* 1 juin 2016;33(6):484-508.

96. Air pollution and asthma control in the Epidemiological study on the Genetics and Environment of Asthma | *Journal of Epidemiology & Community Health* [Internet]. Disponible sur: <https://jech.bmj.com/content/66/9/796.short>

97. Pope CA, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, et al. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *Am J Respir Crit Care Med.* mars 1995;151(3 Pt 1):669-74.

98. Annesi-Maesano I, Caillaud D, Lavaud F, Moreau D, Le Moullec Y, Taytard A, et al. Exposition aux particules atmosphériques fines et développement des maladies allergiques de l'enfant. Résultats épidémiologiques issus de l'étude des six villes (ISAAC-2 France). *Rev Fr Allergol Immunol Clin.* 1 oct 2008;48(6):427-33.

99. Guarnieri M, Balmes JR. Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet.* 3 mai 2014;383(9928):1581-92.

100. Krewski D, Burnett RT, Goldberg MS, Hoover BK, Siemiatycki J, Jerrett M, et al. Overview of the reanalysis of the Harvard Six Cities Study and American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. *J Toxicol Environ Health A.* 22 oct 2003;66(16-19):1507-51.

101. Nieuwenhuijsen MJ, Basagaña X, Dadvand P, Martinez D, Cirach M, Beelen R, et al. Air pollution and human fertility rates. *Environ Int.* 1 sept 2014;70:9-14.

102. Giorgis-Allemand L. Atmospheric pollution and Human reproduction. [phdthesis]. Université Grenoble Alpes; 2017.

103. Bilan économique 2018 - Centre-Val de Loire | Insee [Internet]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/information/4168401>

-
104. La France et les objectifs de développement durable – L'économie française - Comptes et dossiers | Insee [Internet]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4181438?sommaire=4180914&q=bilan>
105. Agriculture et qualité de l'air [Internet]. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. 2018. Disponible sur: <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/agriculture-et-qualite-de-lair>
106. Pollution de l'air : le coût de l'inaction - Sénat [Internet]. . Disponible sur: <https://www.senat.fr/notice-rapport/2014/r14-610-1-notice.html>
107. Santé M des S et de la, Santé M des S et de la. Plan national santé environnement (PNSE3) 2015-2019 [Internet]. Ministère des Solidarités et de la Santé. 2021. Disponible sur: <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/les-plans-nationaux-sante-environnement/article/plan-national-sante-environnement-pnse3-2015-2019>
108. Un air irrespirable : la pollution atmosphérique tue et coûte de l'argent [Internet]. World Bank. Disponible sur: <https://www.banquemondiale.org/fr/news/infographic/2016/09/08/death-in-the-air-air-pollution-costs-money-and-lives>
109. Germain J-M, Lellouch T. Prix social du carbone et engagement pour le climat : des pistes pour une comptabilité économique environnementale ? INSEE [Internet]. INSEE; 2020. Disponible sur: <https://www.insee.fr/>
110. Baumstark L, Boiteux M. Transports : choix des investissements et coût des nuisances. juin 2001 Baumstark L, Boiteux M. Transports : choix des investissements et coût des nuisances. juin 2001;
111. Sofiev M, Bousquet J, Linkosalo T, Ranta H, Rantio-Lehtimäki A, Siljamo P, et al. Pollen, Allergies and Adaptation. In: Ebi KL, Burton I, McGregor GR, éditeurs. Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change Adaptation to Climate Variability and Change [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2009 . p. 75-106. (biométéorologie). Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3_5
112. Lavaud F, Fore M, Fontaine J-F, Pérotin JM, de Blay F. Allergie au pollen de bouleau. Rev Mal Respir. 1 févr 2014;31(2):150-61.
113. Guillaum M-T, Ségala C. Pollens et effets sanitaires : synthèse des études épidémiologiques. Rev Fr Allergol Immunol Clin. 1 janv 2008;48(1):14-9.
114. D'Amato G, Cecchi L, Bonini S, Nunes C, Annesi-Maesano I, Behrendt H, et

al. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*. 2007;62(9):976-90.

115. Charpin D, Poncet P. Allergie au pollen de cyprès. *Rev Fr Allergol*. 1 déc 2019;59(8):584-91.

116. Papa G, Romano A, Quarantino D, Di Fonso M, Viola M, Cristina Artesani M, et al. Prevalence of sensitization to *Cupressus sempervirens*: a 4-year retrospective study. *Sci Total Environ*. 10 avr 2001;270(1):83-7.

117. Scichilone N, Sorino C, Sanfilippo A. Allergen sensitizations in southern Italy: A 5-year retrospective study in allergic respiratory patients. *Allergy*. mars 2013;Pages 97-102.

118. Exposition Climat & Santé (livret) [Internet]. calameo.com. Disponible sur: <https://www.calameo.com/read/005154450ee69e6f62947?page=2>

119. FREDON FRANCE [Internet]. Disponible sur: <http://fredon.fr/>

120. PREVISIONS METEO FRANCE - Site Officiel de Météo-France - Prévisions gratuites à 15 jours sur la France et sur le monde [Internet]. Disponible sur: <https://meteofrance.com/>

121. Réchauffement climatique en France: scénarios, projections - Rapport Jouzel 2014 - Météo-France [Internet]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-climat-futur-en-france>

122. L'ambroisie en France : coûts des impacts sanitaires et pistes d'actions | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 19 avr 2021]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/l%E2%80%99ambroisie-en-france-co%C3%BBts-des-impacts-sanitaires-et-pistes-d%E2%80%99actions>

123. Doz M, Chouaid C, Com-Ruelle L, Calvo E, Brosa M, Robert J, et al. The association between asthma control, health care costs, and quality of life in France and Spain. *BMC Pulm Med*. 22 mars 2013;13(1):15.

124. Cardell L-O, Olsson P, Andersson M, Welin K-O, Svensson J, Tennvall GR, et al. TOTAL: high cost of allergic rhinitis—a national Swedish population-based questionnaire study. *NPJ Prim Care Respir Med*. 4 févr 2016;26:15082.

125. Livre Blanc pour un plan d'action allergies respiratoires sévères 2017/2020 [Internet]. Société de Pneumologie de Langue Française. 2020 Disponible sur: <https://splf.fr/pour-un-plan-daction-allergies-respiratoires-severes-2017-2020/>

-
126. Sclison S, Prud'homme J, Amrani F, Perrot D, Huguet D, Annesi-Maesano I. Association entre les niveaux de pollution atmosphérique et l'augmentation de la consommation médicamenteuse pour asthme et allergies dans 12 grandes villes de France métropolitaine, pour un total de 12 millions d'individus entre 2009 et 2015. *Rev Fr Allergol*. 1 mars 2019;59(2):69-74.
127. Le plan national santé environnement (PNSE) [Internet]. Ministère de la Transition écologique. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/plan-national-sante-environnement-pnse>
128. environnement (PNSE4) C 4e P national santé. Consultation 4e Plan national santé environnement (PNSE4) [Internet]. 2020 Disponible sur: <http://www.consultation-plan-sante-environnement.gouv.fr>
129. Thibaudon M, Caillaud D, Besancenot J-P. Méthodes d'étude des pollens atmosphériques et calendriers polliniques. *Rev Mal Respir*. 1 juin 2013;30(6):463-79.
130. POUR UN PLAN D'ACTION ALLERGIES RESPIRATOIRES SÉVÈRES [Internet]. Disponible sur: <https://asthme-allergies.org/images/Livre-blanc-allergies-respiratoires-se%CC%81ve%CC%80r>

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné SARIOĞLU Atakan

Déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. (*Décret n°92-657 du 13 juillet 1992*)

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature :



SIGNATURES DU DIRECTEUR DE THESE ET DU DOYEN

N° Étudiant : 21201489t.....

N° Thèse : 104.....

Nom et Prénom : SARIOGLU Atakan.....

Sujet : Allergies aux pollens : impact de la pollution
atmosphérique et conséquences épidémiologiques et
économiques.....

Tours, le : 07/02/2022

Le(s) Directeur(s) de Thèse :

GLEVAREC Gaëlle

G. Vase

Vu et Transmis :
Le Doyen



NOM, PRÉNOM de l'étudiant	SARIOGLU Atakan	N°104
<p align="center">TITRE DE LA THÈSE</p> <p align="center">Allergies aux pollens : impact de la pollution atmosphérique et conséquences épidémiologiques et économiques</p>		
<p align="center">RÉSUMÉ DE LA THÈSE</p> <p>Depuis ces dernières décennies, une augmentation très importante de la prévalence des allergies est nettement observée. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) classe les allergies à la quatrième position des pathologies chronique, après les affections cardiovasculaires, les cancers et le diabète. Elles peuvent être causées par différentes sources. Il existe en effet plusieurs types d'allergènes tels que les allergènes respiratoires (pollens, acariens, poils d'animaux, moisissures), les allergènes alimentaires, les médicaments ou encore les allergènes de contact (nickel). En France, des millions de personnes souffrent d'allergies aux pollens. Ce sont près de 20% des enfants et 30% des adultes qui seraient concernés par les allergies aux pollens. Ces allergies peuvent être plus ou moins invalidantes et entraînent des conséquences en santé publique non négligeable. En effet, les allergies respiratoires sont la première cause de perte de productivité dans le monde, surpassant les maladies cardio-vasculaires. Bien que l'incidence des allergies soit très élevée de nos jours, cela n'a pas toujours été le cas. En effet, il y a eu une importante augmentation des allergies aux pollens en France et dans le monde, plus particulièrement dans les pays industrialisés. Des liens très significatifs sont mis en évidence entre l'augmentation de la pollution atmosphérique et les allergies aux pollens. Ils interviennent à travers trois processus: Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé humaine, sur les végétaux ainsi que sur le pollen de façon directe. L'augmentation de la prévalence des pollinoses s'explique en partie par ces trois processus.</p>		
<p>MOTS-CLÉS SIGNIFICATIFS DE SON CONTENU, ATTIBUÉS PAR LE CANDIDAT EN LIAISON AVEC LA BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE ET LES MEMBRES DU JURY</p> <p>Pollution Atmosphérique - pollen - allergie</p>		
<p align="center"><u>JURY</u></p> <p>PRÉSIDENT : Mr CLASTRE Marc - Professeur, Biologie cellulaire et biochimie végétale - TOURS</p> <p>MEMBRES :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Mme GLEVAREC Gaëlle, Maître de Conférences, Faculté de Pharmacie - TOURS -Mr CHABBI Amine Ahmed, Docteur en pharmacie, Pharmacie Rouget de l'Isle, Choisy le roi -Mme ÖZDEMİR Melek, Docteur en pharmacie, Pharmacie Mandoraise, Villemandeur 		
<p>DATE ET LIEU DE SOUTENANCE Faculté de pharmacie de tours le 30 Novemebre 2021</p>		