

2025



Etude de l'impact du changement climatique sur l'évolution des concentrations de pollens allergisants

Eurométropole de Strasbourg 2023-2025



CONDITIONS DE DIFFUSION

Diffusion libre pour une réutilisation ultérieure des données dans les conditions ci-dessous :

- Les données produites par ATMO Grand Est sont accessibles sous licence ouverte
- Sur demande, ATMO Grand Est met à disposition les caractéristiques des techniques de mesures et des méthodes d'exploitation des données mises en œuvre ainsi que les normes d'environnement en vigueur et les guides méthodologiques nationaux.
- ATMO Grand Est peut rediffuser ce document à d'autres destinataires.
- Rapport non rediffusé en cas de modification ultérieure des données.

PERSONNES EN CHARGE DU DOSSIER

Rédaction : Anne AROUNOTHAY, *Chargée d'Etudes Unité Surveillance et études réglementaire*
Antoine DESCAMPS, *Stagiaire Unité Surveillance et études réglementaire*

Relecture : Bérénice JENNESON, *Responsable Unité Surveillance et études réglementaire*
Anh POIROT, *Technicienne de laboratoire, Hôpitaux Universitaires de Strasbourg*

Approbation : Cyril PALLARES, *Directeur Opérationnel*

Référence du modèle de rapport : COM-FE-001_8

Référence du projet : 900976

Référence du rapport : 900976_Pollens et Climat-EMS_25 _30062025

Date de publication : 30/06/2025

ATMO GRAND EST

Espace Européen de l'Entreprise
5 rue de Madrid, 67300 Schiltigheim

Tél : 03 69 24 73 73

Mail : contact@atmo-grandest.eu

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
PARAMETRES ETUDIES	4
1. LES DONNEES METEOROLOGIQUES.....	4
2. LES POLLENS ETUDIES	5
3. LES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES ETUDIES.....	5
EVOLUTION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES	6
1. TEMPERATURE MOYENNE JOURNALIERE.....	6
2. AMPLITUDE THERMIQUE QUOTIDIENNE	8
3. DUREE D'ENSOLEILLEMENT QUOTIDIEN.....	9
4. RAYONNEMENT GLOBAL QUOTIDIEN	10
5. VITESSE DU VENT	12
6. PLUVIOMETRIE QUOTIDIENNE	13
7. CONSEQUENCES POTENTIELLES DE L'EVOLUTION DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR LES POLLENS	14
EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES	16
1. EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE POLLUANTS DANS L'AIR DE 1998 A 2023	16
a. NO ₂	16
b. PM10	17
c. Ozone.....	18
2. BILAN DE L'EVOLUTION DES POLLUANTS CHIMIQUES SUR LES 25 DERNIERES ANNEES ET LIENS SUPPOSES AVEC LES POLLENS 19	
a. Evolution des polluants chimiques sur les 25 dernières années	19
b. Liens possibles entre polluants et pollens.....	20
EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE POLLENS	22
1. ETUDE DU BOULEAU	22
2. ETUDE DES GRAMINEES	24
3. ETUDE DE L'AULNE	26
4. ETUDE DU CHENE.....	27
5. ETUDE DU PLATANE.....	29
6. ANALYSE CROISEE DES 5 POLLENS	32
7. PREMIERES CONCLUSIONS.....	33
LES LIENS ETABLIS ENTRE POLLUANTS, POLLENS ET PARAMETRES METEOROLOGIQUES	34
1. METHODE D'ANALYSE	34
2. BOULEAU	36
a. Analyse sur la période de la saison pollinique.....	36
b. Analyse sur la période de dormance.....	36
c. Bilan des corrélations établies pour le bouleau	37
3. GRAMINEES	38
a. Analyse sur la période de la saison pollinique.....	38
b. Corrélations établies pour les graminées.....	38
4. AULNE	39
a. Analyse sur la période de la saison pollinique.....	39
b. Analyse sur la période de dormance.....	39
c. Corrélations établies pour l'aulne	40
5. CHENE	41
a. Analyse sur la période de la saison pollinique.....	41
b. Analyse sur la période de dormance.....	41
c. Bilan des corrélations établies pour le chêne	42
6. PLATANE	43
a. Analyse sur la période de la saison pollinique.....	43
b. Analyse sur la période de dormance.....	43
c. Corrélations établies pour le platane	43
7. BILAN SUR L'EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE POLLENS, LIENS ETABLIS ET PROJECTIONS FUTURES :	45
CONCLUSION	48

INTRODUCTION

Au cours des 30 dernières années, les allergies liées aux pollens n'ont cessé de croître jusqu'à toucher aujourd'hui 20 à 30% de la population française.

Irritations et picotements du nez, rhinite, crises d'éternuements, conjonctivites, larmolements, crises d'asthme dans de rares cas sont autant d'affections provoquées par la pénétration des pollens dans l'organisme. Ces pollinoses peuvent impacter la vie professionnelle et personnelle des personnes touchées : troubles du sommeil, diminution de la qualité de vie, perte de productivité ou diminution des performances scolaires ainsi que des coûts élevés de soins de santé.

Selon de nombreuses études, le réchauffement climatique provoquerait une hausse de la production de pollen, ainsi que l'allongement de la durée de pollinisation.

Ce dérèglement climatique modifie de plus les zones géographiques (expansion vers le nord), ce qui favorise le développement de plantes invasives telles que l'ambrosie hautement allergisante. Cette dernière, ne supportant pas la concurrence, pourra gagner du terrain sur des herbacées et graminées qui brûleraient vite au soleil.

En parallèle, l'augmentation des problèmes de santé liés à la pollution atmosphérique touche de nombreuses de personnes de tout âge.

Une étude Santé Publique France (SFP) avait estimé que la réduction de la pollution aux particules PM_{2,5} jusqu'aux lignes directrice de l'Organisation Mondiale de la Santé permettrait d'éviter 3 900 décès sur la région Grand Est. Une nouvelle étude sortie en 2024 s'est intéressée aux bénéfices pour la santé de cette même réduction sur la survenue de 8 maladies, respiratoires, cardiovasculaires et métaboliques pour les particules PM_{2,5} et le dioxyde d'azote sur la période 2016-2019. Selon cette étude par exemple, 7 % des cas d'infarctus chez les plus de 30 ans et 16% des cas d'asthme des moins de 17 ans pourraient être évités si les niveaux de pollution respectaient les lignes directrices de l'OMS.

Les tendances d'évolution des concentrations de pollens et de polluants dans l'air sont étroitement liées aux conditions météorologiques et aux changements climatiques.

Ainsi l'étude ci-après tend à **comprendre et approfondir les corrélations possiblement existantes entre le changement climatique et l'évolution des concentrations des pollens et des polluants dans l'air et sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg**. Pilotée par ATMO Grand Est, elle a été menée conjointement avec les HUS (Hôpitaux Universitaires de Strasbourg, avec le soutien financier de l'ARS Grand Est (Agence Régionale de Santé) dans le cadre d'un appel à projet du Contrat Local de Santé III de la ville et de l'Eurométropole de Strasbourg.

Cette étude se positionne dans le cadre de différents plans régionaux de santé visant à renforcer la surveillance, la prévision ainsi que l'information sur les concentrations de pollens et les risques allergiques associés. Il s'agit également d'inciter les collectivités à repenser biodiversité, choix raisonné des végétaux et favoriser le mélange des espèces végétales lors du renouvellement de leur parc arboré, afin de réduire la présence et le développement de plantes à pollen allergisant.

L'objectif final de cette étude est de fournir les informations nécessaires pour aider les collectivités à mettre en places différentes actions pertinentes au sein de leur territoire pour s'adapter et anticiper l'évolution du changement climatique.

PARAMETRES ETUDIES

Les données exploitées dans le cadre de ce projet proviennent des stations fixes de mesure d'ATMO Grand Est, du capteur à pollens des Hôpitaux Universitaires de Strasbourg, et de la station Météo France la plus proche. Les différentes stations et leurs emplacements sont présentés sur la *Figure 1*. Il s'agit des données sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg qui s'étendent du 1^{er} janvier 1998 au 31 décembre 2023.

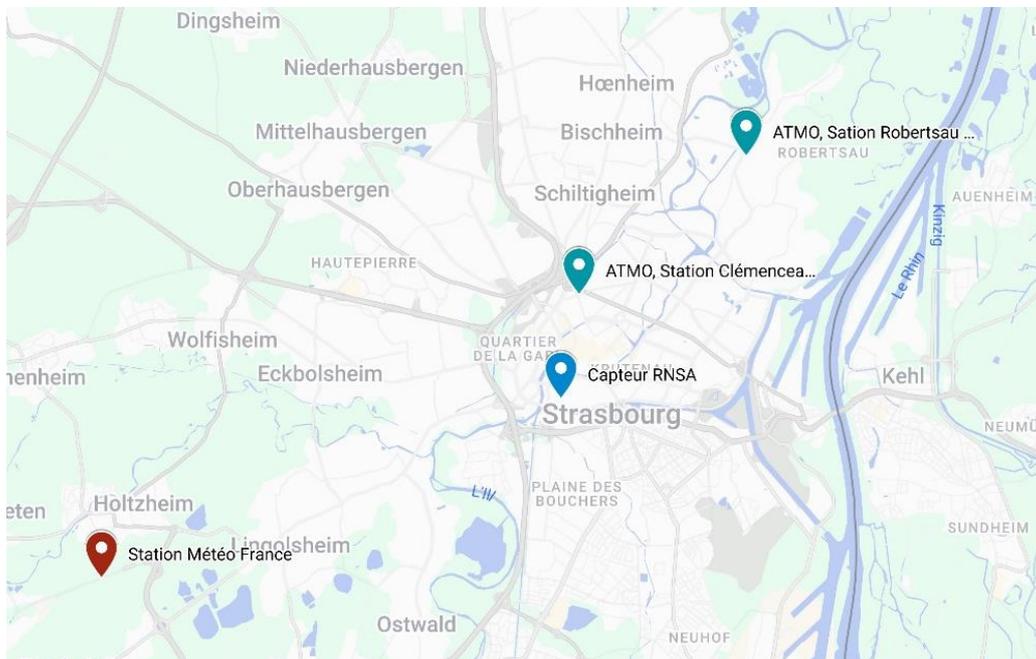


Figure 1 : Emplacement des stations et capteurs utilisées dans ce rapport : météo, polluants, pollens

1. Les données météorologiques

Les données **météorologiques**, issues de Météo France et accessibles sur le site meteo.data.gouv.fr, proviennent de la station météorologique la plus proche, implantée sur la commune de Holtzheim, à proximité de l'Aéroport de Strasbourg-Entzheim.

Un tri des données a été nécessaire afin de ne sélectionner que celles qui se révèlent les plus pertinentes pour l'étude. Ainsi sur 24 variables disponibles, 6 variables seront finalement exploitées dans le cadre de ce projet, celles dont l'impact potentiel est le plus important sur l'évolution des concentrations de pollens et des polluants chimiques ainsi que sur la phénologie des espèces étudiées :

- Température moyenne quotidienne
- Amplitude thermique quotidienne
- Durée d'ensoleillement quotidien
- Rayonnement global quotidien
- Vitesse du vent
- Quantité de précipitation quotidienne.

Les 5 premiers paramètres présentent potentiellement une corrélation notable favorisant l'augmentation des concentrations de pollens dans l'air. A l'inverse, le dernier présente une corrélation négative sur les concentrations de pollens.

2. Les pollens étudiés

Les données concernant les concentrations **polliniques** ont été fournies par le RNSA (Réseau National de Surveillance Aérobiologique) pour la période 1998-2023 et sont issues d'un capteur situé sur le toit du Nouvel Hôpital Civil de Strasbourg (NHC).

Le choix des essences a été réalisé en prenant en compte les concentrations de pollens les plus importantes, les espèces endémiques implantées en grand nombre, disposant d'un potentiel allergisant modéré à fort et responsables des risques d'allergies élevés tout au long des saisons polliniques. Cinq espèces ont ainsi été retenues :

- Le bouleau (potentiel allergisant fort)
- Les graminées (potentiel allergisant fort).
- L'aulne (potentiel allergisant fort)
- Le chêne (potentiel allergisant modéré)
- Le platane (potentiel allergisant modéré, mais risque accru en raison des poils urticants des fruits qui irritent les voies respiratoires et oculaires)

3. Les polluants atmosphériques étudiés

Les données concernant les concentrations des polluants dans l'air ont été fournies par ATMO Grand Est. Elles sont issues de 2 stations situées dans la ville de Strasbourg.

La première station nommée « Clémenceau » est située au boulevard Clémenceau. Il s'agit d'une station urbaine sous influence trafic dans laquelle sont mesurés les oxydes d'azote dont le dioxyde d'azote (NO_2), les particules PM_{10} et l'ozone (O_3).

La seconde station « Robertsau » est installée dans la rue de la Papeterie à La Robertsau. Il s'agit d'une station de typologie urbaine qui assure le suivi de l'ozone et du NO_2 .



Figure 2 : les stations fixes de mesure

Les polluants étudiés sont ceux qui jouent un rôle dans l'aggravation des allergies aux pollens, à savoir le NO_2 (dioxyde d'azote), les particules (PM_{10}) et l'ozone (O_3). Ils seraient effectivement susceptibles d'aggraver l'asthme ou d'augmenter la sensibilité allergique. De plus, ces polluants pourraient influencer sur les grains de pollens et leurs concentrations. Les effets sur la santé et l'environnement de ces trois polluants sont précisés en Annexe 1.

EVOLUTION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

La caractérisation du changement climatique via l'étude de l'évolution des paramètres météorologiques a été réalisée entre les années 1998 et 2023 et des hypothèses d'impact ont été projetées sur les évolutions de concentrations de pollens. Pour illustrer certaines évolutions, une comparaison des moyennes tri-annuelles 1998-1999-2000, 2009-2010-2011 et 2021-2022-2023 a été effectuée.

Les analyses saisonnières portant sur l'hiver regroupent les mois de janvier, février et une partie du mois de mars ainsi qu'une partie du mois de décembre de l'année n-1. Pour l'hiver de l'année 1998, seuls les mois de janvier, février et mars sont pris en compte en raison de l'indisponibilité des données de décembre 1997. De ce fait **l'analyse de la période hivernale sera réalisée sur les années 1999, 2000 et 2001 et non 1998, 1999 et 2000.**

1. Température moyenne journalière

La Figure 3 représente l'évolution de la température moyenne journalière entre 1998 et 2023.

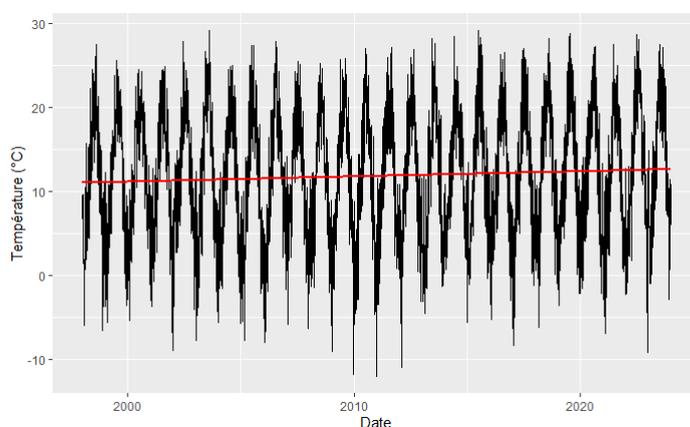


Figure 3 : Évolution de la température moyenne journalière sur l'Eurométropole de Strasbourg

Les moyennes journalières à Strasbourg augmentent sur la période passant de 11,5°C à 12,6°C en moyenne soit une augmentation de 1,1 °C. D'autre part, si Strasbourg a été en moyenne 1,4°C plus froide que la moyenne Française entre 1998 et 2000, cet écart a fortement diminué à partir de 2014, pour passer depuis 2021 au-dessus de la moyenne Française.

Analyse Saisonnière

Une étude plus approfondie de l'évolution des températures au cours des différentes saisons permet d'apprécier les écarts de températures saisonnières et de mieux comprendre la réduction de cet écart depuis 2015. Elle révèle notamment que les derniers hivers sont moins froids, et que les étés sont de plus en plus chauds.

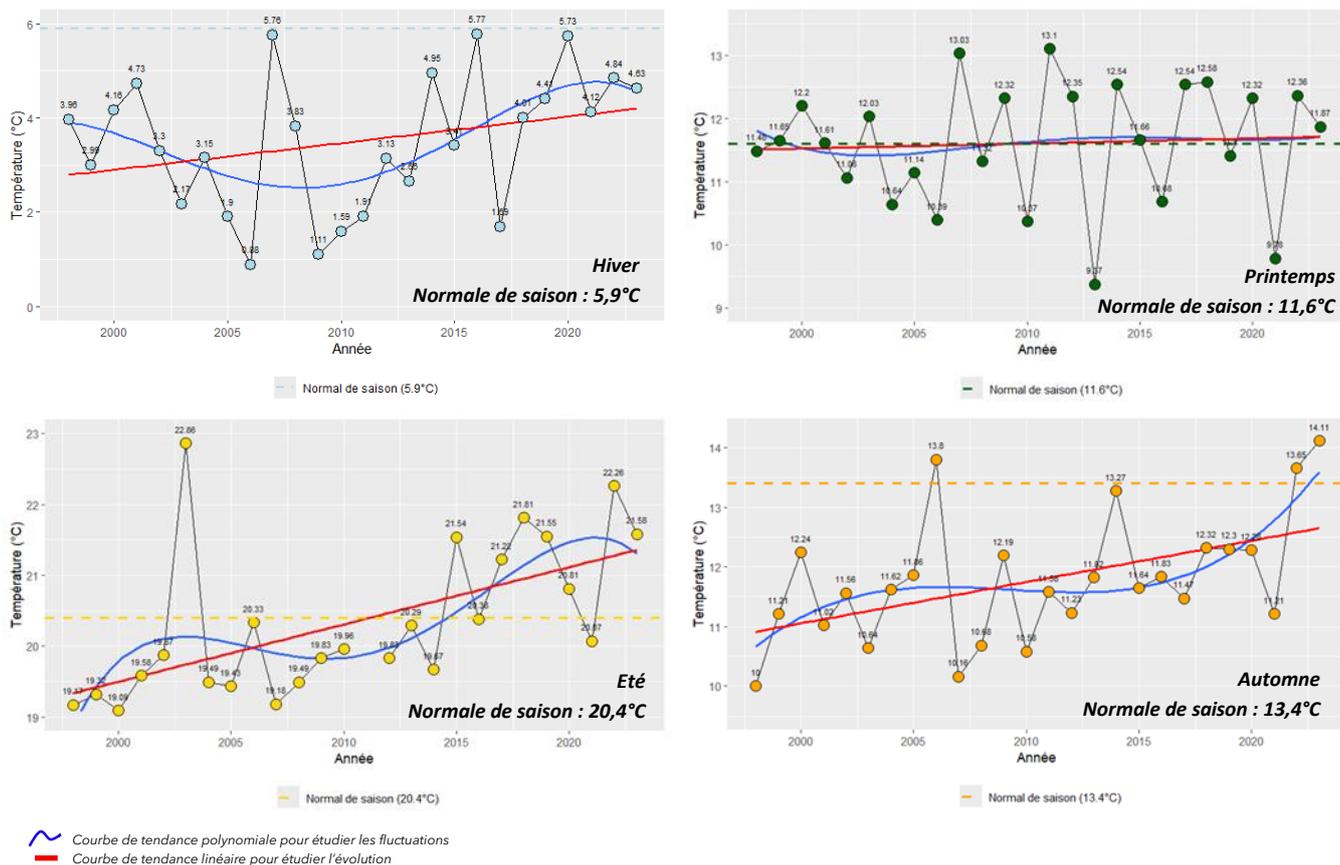


Figure 4 : Evolution des températures moyennes journalières au cours des quatre saisons entre l'Eurométropole de Strasbourg et les Normales de saison

Hiver : Malgré l'augmentation des températures hivernales au cours des années qui entraînent des hivers plus doux notamment depuis les années 2010, Strasbourg s'est toujours maintenue en-dessous des Normales nationales de saison.

Printemps : L'évolution des températures journalières printanières semble révéler la présence d'un cycle avec alternance de températures en dessous ou au-dessus des Normales de saison tous le 1 à 3 ans avec une légère évolution d'un réchauffement ces dernières années. Ce cycle pourrait coïncider avec les variations de concentrations de pollens remarquées au cours des années.

Eté : Il est à noter qu'à partir de 2015, Strasbourg a toujours connu un été, à deux années près, au-dessus des Normales de saison. Cela va avoir un impact sur la longévité de la saison des graminées.

Automne : Entre 1998 et 2017, en moyenne les différences de températures automnales ont présenté une moyenne de $-1,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ en-dessous des Normales de saison. Cependant, à partir de 2018, cette moyenne se réduit et les deux derniers automnes présentent une température moyenne au-dessus de cette Normale saisonnière.

Lors de ces 26 dernières années, Strasbourg a donc connu une augmentation globale des températures traduisant le phénomène de réchauffement global à l'œuvre. La température moyenne quotidienne a augmenté de $+1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en moyenne annuelle sur cette période. Elle s'est retranscrite plus au moins fortement sur les moyennes saisonnières avec une augmentation des températures plus forte en été et en automne ($+0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en hiver, $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ au printemps, $+2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en été et $+1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en automne).

2. Amplitude thermique quotidienne

Il s'agit de la différence entre la température maximale observée et la température minimale observée dans la journée.

Pour ce paramètre, une étude basée sur l'établissement de boîtes à moustache (ou box-plot) a été réalisée afin de figurer la distribution des données.

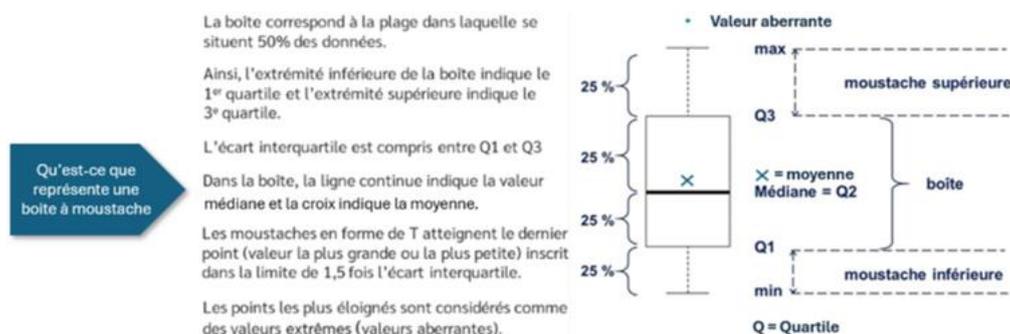


Figure 5 : Représentation d'une boîte à moustache

Les variations journalières de températures entre 1998 et 2023 peuvent se révéler plus ou moins importantes selon les saisons, comme le démontre la Figure 6.

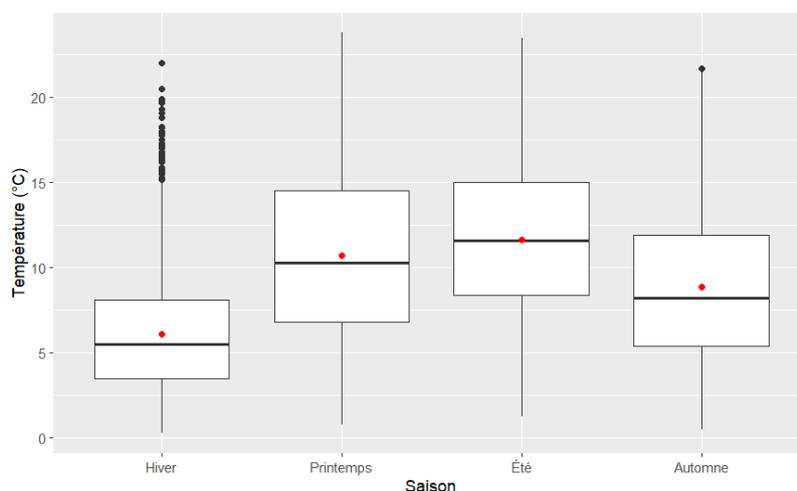


Figure 6 : Distribution de l'amplitude thermique journalière par saison sur l'Eurométropole de Strasbourg

L'amplitude thermique se révèle plus importante au printemps et en été, avec 50% des valeurs se trouvant entre 7 et 14°C pour le printemps et entre 8 et 15°C pour l'été.

L'amplitude thermique est plus faible en automne avec 50% des valeurs comprises entre 5,4 et 11,9°C et cela descend à une plage comprise entre 3,5 et 8,1°C en hiver. A noter des valeurs extrêmes remarquées en hiver, témoignant d'épisodes de douceur marquée de cette saison sur de nombreuses années.

L'étude de l'amplitude thermique journalière met en avant un impact non négligeable du réchauffement climatique sur ce paramètre météorologique.

D'après une étude parue le 8 novembre 2023 dans la revue Nature Communication, entre 1961 et 1990 les nuits se réchauffent plus vite que les jours, avec un écart moyen de 0,08°C par décennie. Cependant, la tendance s'est inversée de 1991 à 2020 avec des jours qui se réchauffent de plus de 0,06°C par décennie. Cela explique ainsi l'augmentation de l'amplitude thermique durant ces 26 années.

De 1998 à 2023, l'amplitude thermique moyenne annuelle à Strasbourg a augmenté de 1,4°C, soit plus 16%. L'automne correspond à la saison ayant connu la plus forte augmentation avec une hausse de l'amplitude thermique de 29% (+2,2°C). Pour rappel, les amplitudes thermiques les plus élevées

3. Durée d'ensoleillement quotidien

Il s'agit de la durée temporelle pendant laquelle un lieu est soumis à un rayonnement solaire suffisamment intense et puissant pour produire des ombres bien distinctes.

La Figure 7 présente l'évolution du cumul de la durée de l'ensoleillement au cours de l'année. Jusqu'à la fin de l'hiver (fin mars), on observe une évolution similaire entre les 3 périodes calculées (1^{ère} période : moyenne de 1998, 1999 et 2000 ; 2^{ème} période : 2009, 2010 et 2011 ; 3^{ème} période : 2021, 2022 et 2023).

Cependant, dès la fin de l'hiver-début du printemps, l'accroissement de la durée d'ensoleillement est observé et semble plus rapide entre 2021 et 2023, par rapport aux 2 autres périodes. Pour chaque courbe, cet accroissement s'accroît à mesure que l'on approche de l'été.

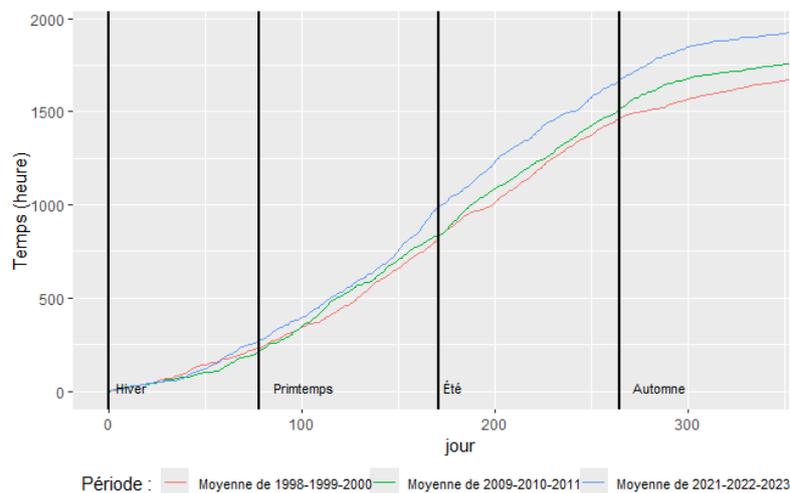


Figure 7 : Évolution du temps d'ensoleillement cumulé au cours de l'année sur l'Eurométropole de Strasbourg

Les figures suivantes montrent l'évolution du temps d'ensoleillement global de 1998 à 2024 sur l'Eurométropole de Strasbourg pour les différentes saisons.

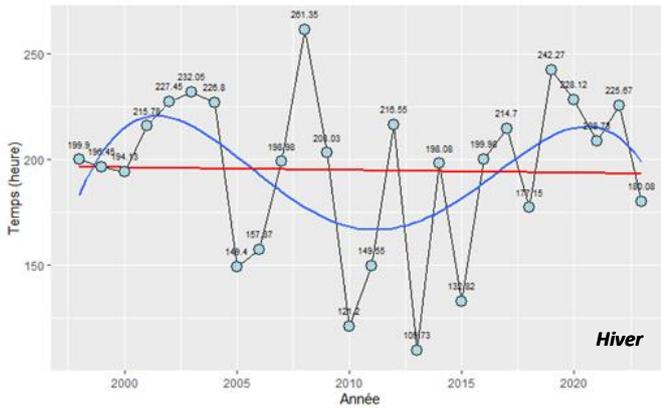


Figure 8 : Evolution du temps d'ensoleillement global hivernal sur l'Eurométropole de Strasbourg

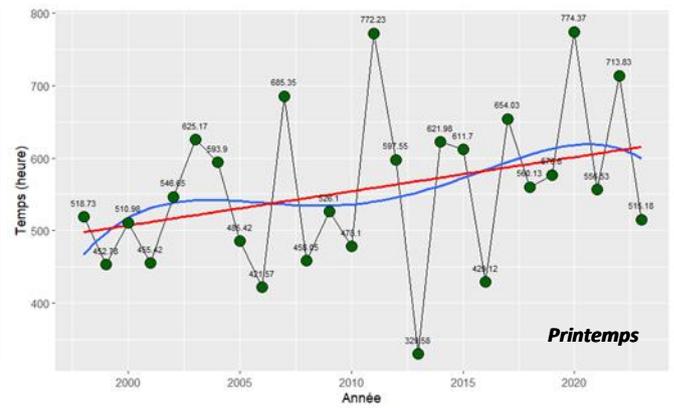


Figure 9 : Evolution du temps d'ensoleillement global printanier sur l'Eurométropole de Strasbourg

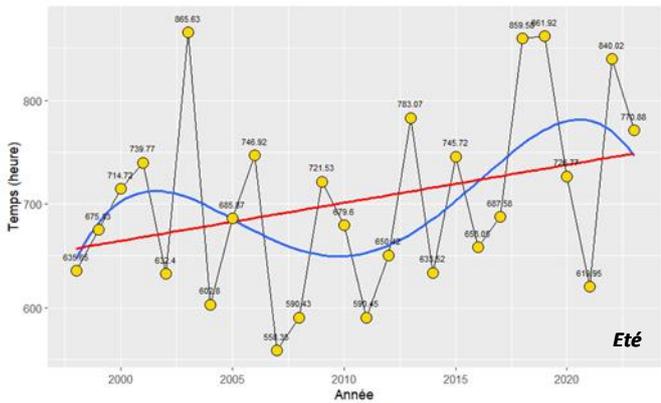


Figure 10 : Evolution du temps d'ensoleillement global estival sur l'Eurométropole de Strasbourg

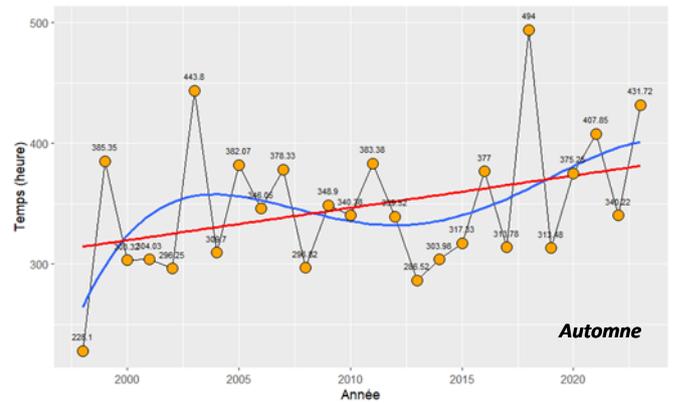


Figure 11 : Evolution du temps d'ensoleillement global automnal sur l'Eurométropole de Strasbourg

 Courbe de tendance polynomiale pour étudier les fluctuations
 Courbe de tendance linéaire pour étudier l'évolution

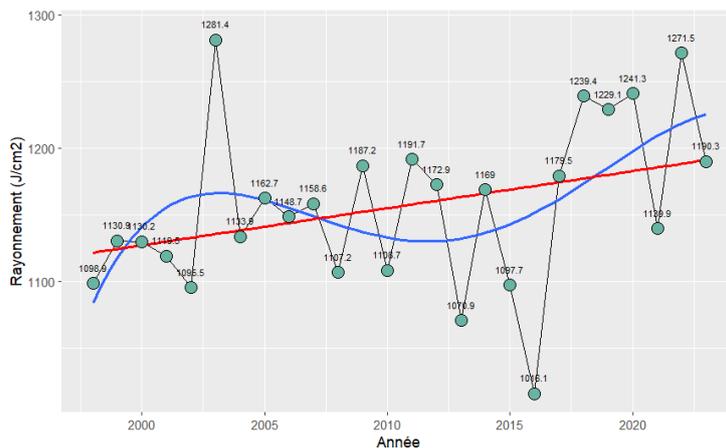
C'est en automne et au printemps que l'augmentation est la plus visible avec respectivement une hausse de plus de 29% (+88h) et 20% (+101h). L'hiver n'a, quant à lui, connu aucune variation durant cette période comme le montrent les figures ci-dessus. A noter qu'une très grande variabilité de l'évolution du temps d'ensoleillement est observée d'une année sur l'autre.

Au cours des 26 dernières années, l'Eurométropole de Strasbourg a connu une augmentation de sa durée d'ensoleillement. Cette hausse est de 11 jours de temps d'ensoleillement, soit +16,9 % et est variable suivant les saisons.

4. Rayonnement global quotidien

Le rayonnement global quotidien est l'énergie rayonnante totale du soleil atteignant directement la surface de la Terre. Les unités utilisées pour le rayonnement global quotidien sont dans notre cas les J/cm^2 et KJ/cm^2 .

Globalement une légère augmentation du rayonnement global journalier est observée sur l'Eurométropole de Strasbourg, avec cependant une baisse marquée de ce dernier entre 2010 et 2016.



Courbe de tendance polynomiale pour étudier les fluctuations
 Courbe de tendance linéaire pour étudier l'évolution

Figure 12 : Évolution du rayonnement moyen journalier reçu par l'Eurométropole de Strasbourg

Une analyse saisonnière est menée afin d'étudier l'évolution du rayonnement global.

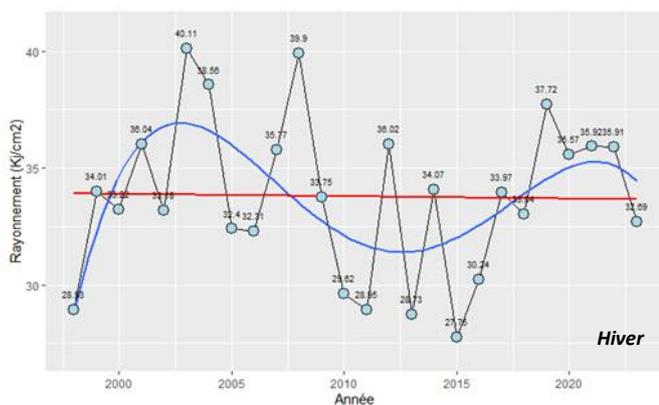


Figure 13 : Evolution du rayonnement global hivernal sur l'Eurométropole de Strasbourg

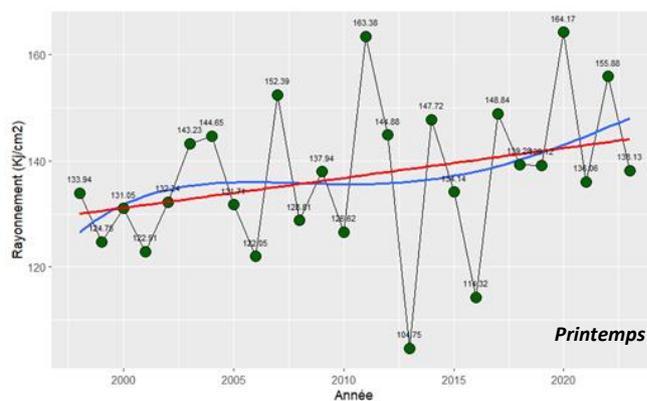


Figure 14 : Évolution du rayonnement global printanier sur l'Eurométropole de Strasbourg

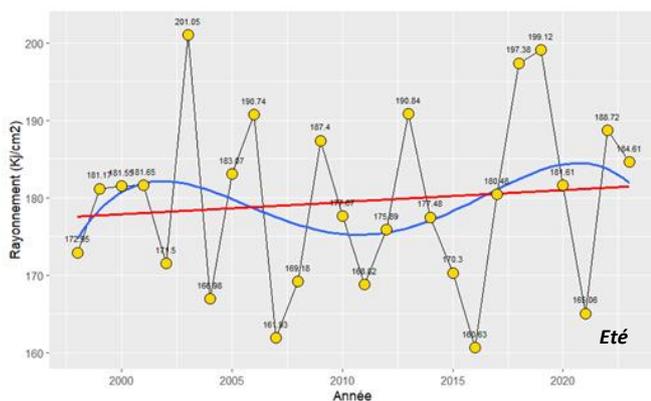


Figure 15 : Évolution du rayonnement global estival sur l'Eurométropole de Strasbourg

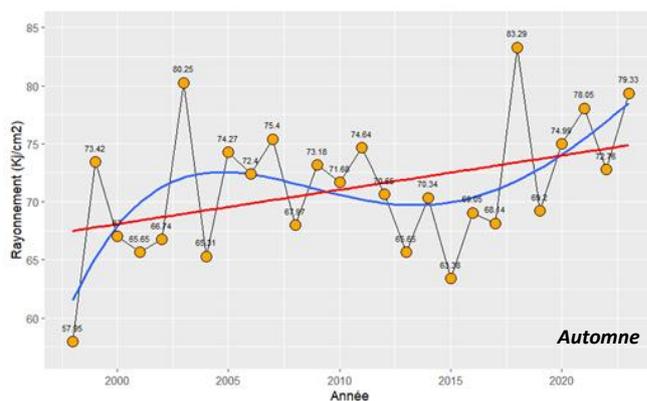


Figure 16 : Évolution du rayonnement global automnal sur l'Eurométropole de Strasbourg

Courbe de tendance polynomiale pour étudier les fluctuations
 Courbe de tendance linéaire pour étudier l'évolution

Le rayonnement global journalier reçu par l'Eurométropole de Strasbourg a connu une augmentation de +6% en 26 ans. Cependant, comme pour le temps d'insolation, l'augmentation du rayonnement n'est pas égale entre les saisons. L'automne a connu la plus forte hausse avec +16%, suivi par le printemps avec une hausse de +10%.

5. Vitesse du vent

Sur la *Figure 13*, on peut constater qu'en fonction de la saison, l'intensité du vent varie. L'hiver et le printemps sont les 2 saisons touchées par les vents les plus forts, avec respectivement une moyenne de 1,79 m/s (6,4 km/h) et de 1,74 m/s (6,3 km/h). Concernant l'été, la vitesse moyenne du vent est de 1,48 m/s (5,3 km/h) et pour l'automne de 1,43 m/s (5,2 km/h).

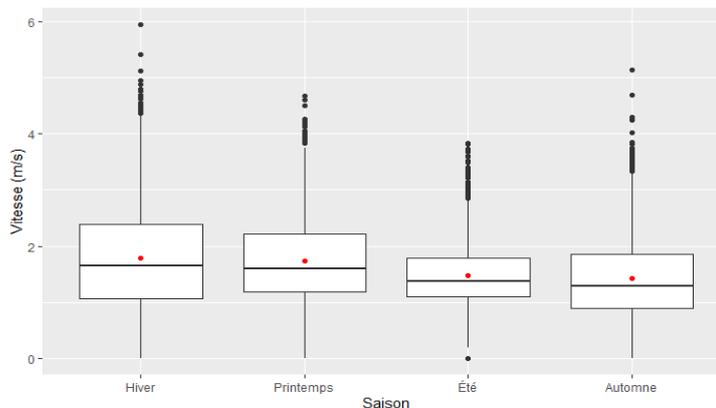


Figure 17 : Distribution des intensités de vents journalières par saison sur l'Eurométropole de Strasbourg

Un abaissement de la vitesse du vent entre 1998 et 2023 s'observe sur les quatre saisons.

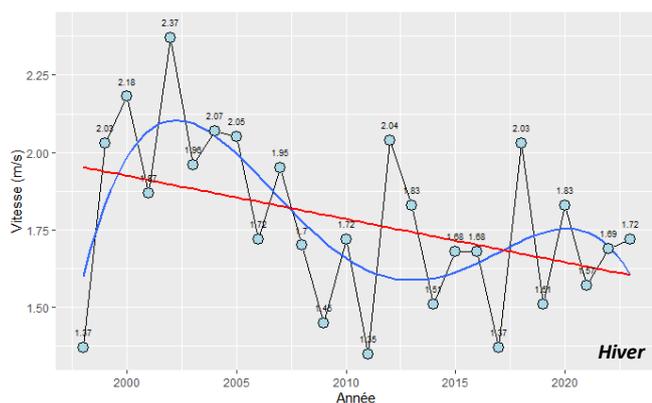


Figure 18 : Évolution de la vitesse du vent moyen hivernal sur l'Eurométropole de Strasbourg

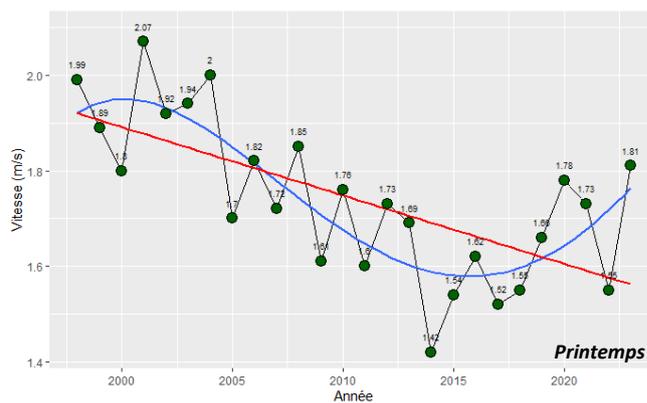


Figure 19 : Évolution de la vitesse du vent moyen printanier sur l'Eurométropole de Strasbourg

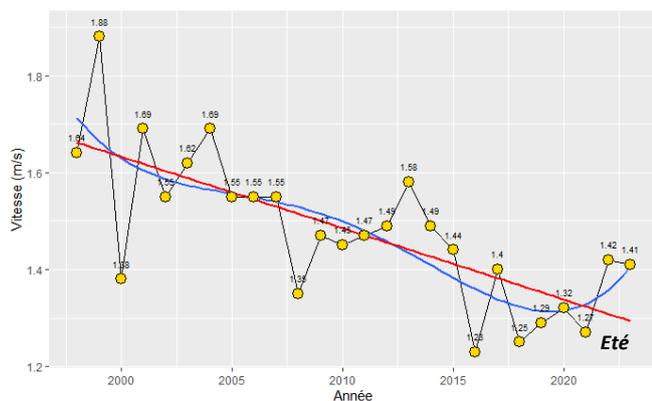


Figure 20 : Évolution de la vitesse du vent moyen estival sur l'Eurométropole de Strasbourg

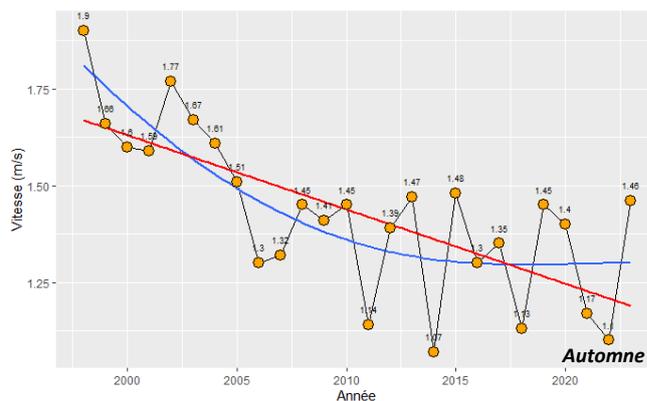


Figure 21 : Évolution de la vitesse du vent moyen automnal sur l'Eurométropole de Strasbourg

— Courbe de tendance polynomiale pour étudier les fluctuations
 — Courbe de tendance linéaire pour étudier l'évolution

Cependant, l'automne a connu la diminution la plus forte avec une baisse de -0,5 m/s. Un début d'augmentation de la vitesse du vent durant le printemps et l'hiver est remarqué sur les deux dernières années.

Sur la période 1999-2023, une diminution globale de la vitesse des vents touchant l'Eurométropole de Strasbourg est constatée. Ainsi en un quart de siècle, la vitesse moyenne des vents a diminué de **0,3m/s**.

6. Pluviométrie quotidienne

La Figure 18 révèle une forte variabilité annuelle avec néanmoins une tendance de fond à la baisse des précipitations globales annuelles tombées sur l'Eurométropole de Strasbourg depuis 1998, avec cependant des années particulièrement pluvieuses (exemple des années 1999, 2002, 2010 et 2021).

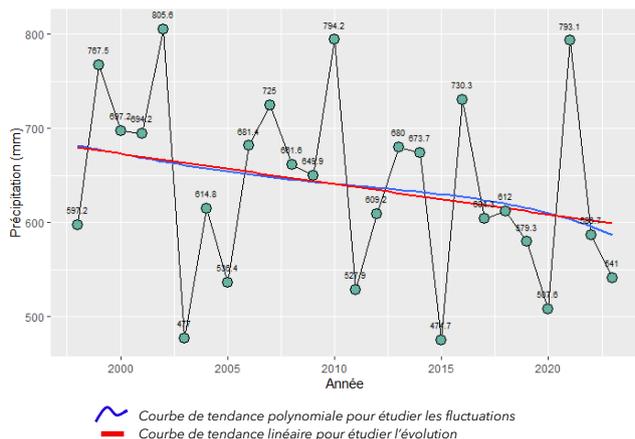


Figure 22 : Évolution des précipitations globales annuelles tombées sur l'Eurométropole de Strasbourg

L'étude saisonnière révèle que l'été est quasiment la seule saison qui enregistre une augmentation des précipitations, notamment depuis 2010. Les étés 2014 et 2021 sont ceux qui ont concentré entre 45% et 47% des précipitations. Le printemps se révèle beaucoup plus sec.

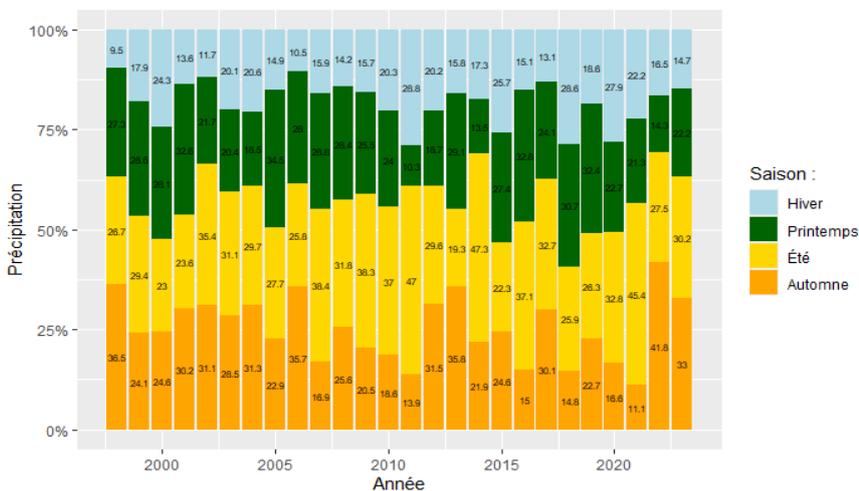


Figure 23 : Répartition des précipitations globales annuelles tombées sur l'Eurométropole de Strasbourg en fonction des saisons

Au bilan, au cours du dernier quart de siècle, on observe une baisse de **-6%** du volume pluviométrique tombé sur l'Eurométropole de Strasbourg. Le printemps est la saison ayant connu la plus forte baisse, suivie par l'automne. Pour finir, contrairement à ce que l'on peut penser, l'été correspond parfois à la saison qui connaît les cumuls pluviométriques les plus élevés et en augmentation au cours des années.

7. Conséquences potentielles de l'évolution des paramètres météorologiques sur les pollens

Lors de ces 26 dernières années, Strasbourg a connu une **augmentation de +1,1°C** en moyenne annuelle traduisant le phénomène de réchauffement global à l'œuvre.

Les variations saisonnières de températures ne sont pas sans conséquence sur la végétation et la production de pollens dans l'air en fonction du calendrier pollinique de la plante. En effet, malgré des hivers plus doux notamment depuis les années 2010, Strasbourg s'est toujours maintenue en-dessous des Normales nationales de saison. De ces constats, deux scénarios se dessinent :

- Un **hiver plutôt doux** peut **entraîner un printemps précoce** et une libération plus importante de pollen.
- En revanche, un **hiver froid**, avec de nombreux épisodes de gel, pourrait **retarder la pollinisation**.

A partir de 2015, Strasbourg a toujours connu un été, à deux années près, au-dessus des Normales de saison. Cela pourrait avoir un impact sur **la longévité de la saison des graminées**.

De 1998 à 2023, **l'amplitude moyenne annuelle a augmenté de 1,4°C**, l'automne ayant connu la plus forte augmentation (+2,2°C).

Une forte amplitude thermique au cours d'une journée (phénomène typique au printemps), associée à l'absence de pluie et un beau temps anticyclonique ensoleillé et chaud, contribuerait à **accentuer la libération des pollens** et à **augmenter leur production**.

Au cours des 26 dernières années, l'Eurométropole de Strasbourg a connu une **augmentation de sa durée d'ensoleillement de 11 jours**, soit +17 %, variable suivant les saisons.

- Un **ensoleillement plus important au cours de l'automne** pourrait entraîner une entrée dans la période de dormance plus tardive.
- **Un ensoleillement moindre en hiver** permettrait de maintenir la plante en dormance mais surtout d'alimenter ses besoins en froid.
- **Un ensoleillement plus important au printemps** favoriserait le déclenchement de la pollinisation.

Le rayonnement global journalier reçu par l'Eurométropole de Strasbourg a connu une **augmentation de +6%** en 26 ans, l'automne et le printemps étant les saisons qui ont connu les plus fortes hausses. Le **rayonnement solaire** direct est indispensable au développement des bourgeons floraux, aussi cela pourrait expliquer la floraison et la pollinisation plus précoce du noisetier et de l'aulne (dès la mi-décembre), mais également des premières graminées dès le mois de mars.

Sur les 25 dernières années, la vitesse moyenne des vents sur l'Eurométropole de Strasbourg a diminué de **0,3m/s**. Une **diminution de la vitesse** de vent pourrait entraîner une stagnation des concentrations de pollens dans l'air. Cela pourra être vérifié lors de la recherche de corrélation exposée plus loin.

En 26 ans, le **volume pluviométrique** sur l'Eurométropole de Strasbourg a **diminué de 6%**, le printemps et l'automne ont été les saisons les plus sèches. Ces conditions permettraient la libération **d'une plus grande**

quantité de pollens dans l'air, les pluies ne pouvant assurer le plaquage au sol de ces derniers. L'été a enregistré une hausse de son cumul pluviométrique, ce qui favoriserait la croissance des graminées qui pourraient libérer de très grandes quantités de pollens dans l'air quand le temps sera moins humide.

Synthèse

Toutes ces hypothèses sont récapitulées dans le tableau suivant. L'objectif désormais de l'étude est de voir si ces hypothèses sont confirmées ou non.

Critères	Tendances				Impact potentiel pollen		
	Hiver	Printemps	Eté	Automne	Arbres hivernaux	Arbres printaniers	Graminées
Température moyenne quotidienne	↗	↗↗	↗↗	↗	+	++	++
Amplitude thermique quotidienne	↗	↗↗	↗↗	↗	+	+	+
Ensoleillement quotidien	↔	↗↗	↗	↗	++	++	++
Rayonnement global quotidien	↗	↗↗	↗	↗↗	++	++	++
Vitesse du vent	↘	↘	↘	↘↘	+	+	+
Pluviométrie quotidienne	↘	↘↘	↗	↘↘	Pas d'impact significatif		+

Tableau 1 : Récapitulatif de l'impact supposé des paramètres météorologiques sur les concentrations des pollens étudiés

↗ augmentation ↘ diminution
 ↔ pas de changement + impact significatif ++ impact fort

1. Evolution des concentrations de polluants dans l'air de 1998 à 2023

a. NO₂

Les figures ci-dessous présentent l'évolution des concentrations annuelle du NO₂ depuis 1998 sur les stations Clémenceau et Robertsau de Strasbourg.

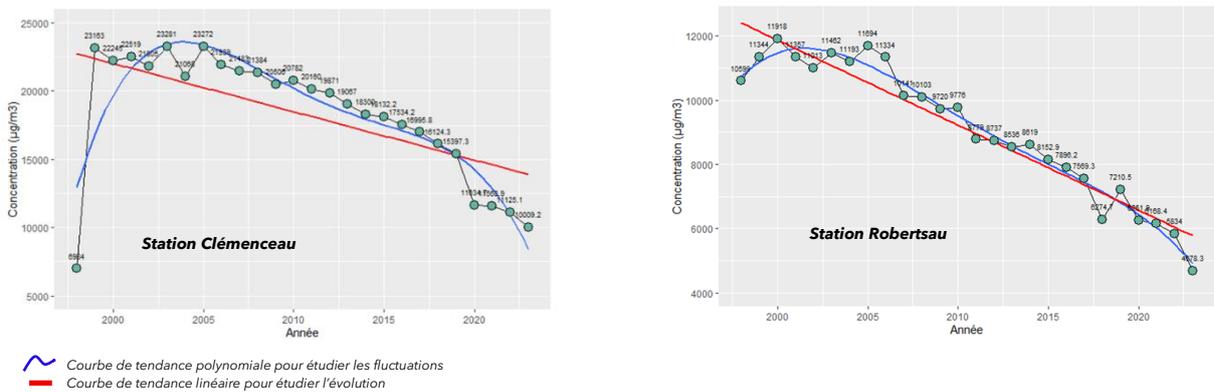


Figure 24 : Evolution de la concentration annuelle en NO₂ sur les deux stations de mesure sur l'Eurométropole de Strasbourg

Les concentrations moyennes journalières en NO₂ sur les stations Clémenceau et Robertsau montrent respectivement une diminution marquée de près de **-54% et -52%** entre les années 1999 et 2023. La baisse des concentrations moyennes annuelles s'accroît après 2010 mais de manière beaucoup plus prononcée à proximité du trafic routier, comme le montre l'évolution des teneurs sur la station Clémenceau (station sous influence trafic). Cette diminution constante des concentrations est remarquée toute saison confondue. Entre 2019 et 2020, il est à noter que la diminution est plus importante, en lien avec la baisse des émissions lors de la crise sanitaire.

Une comparaison des 3 périodes (1999-2001, 2009-2011, 2021-2023) au niveau de la figure 21.

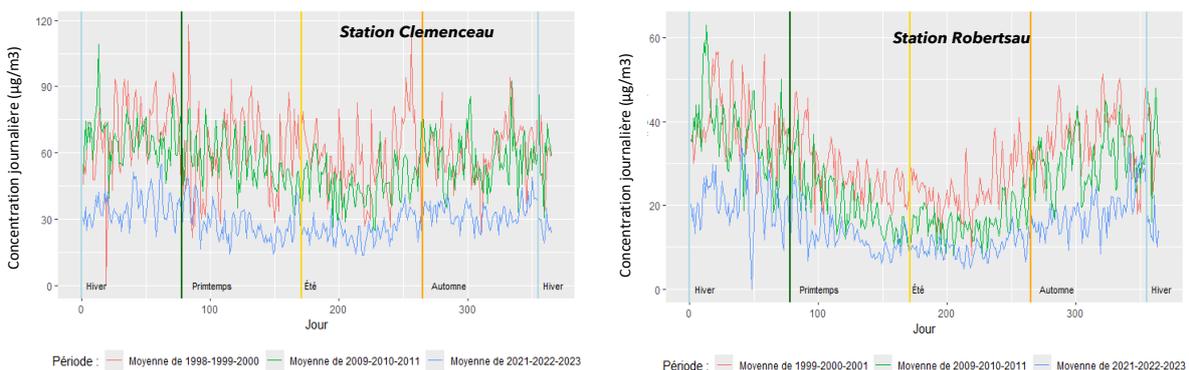


Figure 25 : Evolution de la concentration en NO₂ journalière au cours de l'année sur l'Eurométropole de Strasbourg

Elle permet de mettre en évidence des pics élevés de concentrations en NO₂ dans les années 1999 à 2001. La diminution est beaucoup plus nette entre 2021 et 2023, avec des concentrations journalières restant en deçà des 60 µg/m³, quand entre 1999 et 2001, elles dépassaient les 80 µg/m³ et pouvaient monter jusqu'à 120 µg/m³.

Les progrès réalisés sur les émissions dans tous les secteurs excepté le résidentiel/tertiaire expliquent cette baisse, également remarquable au niveau national. Pour le secteur des transports routiers, les améliorations observées s'expliquent par le renouvellement du parc de véhicules, par l'équipement progressif des véhicules particuliers en pots catalytiques depuis 1993 et par le développement d'autres technologies de réduction des émissions. La mise en place de normes européennes d'émissions sur les véhicules a également participé à la baisse des émissions du secteur des transports.

b. PM10

Concernant la station Clemenceau, les premières données PM₁₀ ont débuté le 11 juin 2013.
 Concernant la station Robertsau, les mesures en PM₁₀ se sont arrêtées le 31 décembre 2020, mais un nombre important de données manquantes entre 2001 et 2016 ne permet pas l'exploitation de ces dernières.
 Aussi l'étude de l'évolution des PM₁₀ se concentrera sur la station Clemenceau.

La station révèle une tendance à la diminution des concentrations en PM₁₀ remarquable depuis le début des mesures, d'environ **-26%** en moyenne journalière entre 1998 et 2023.

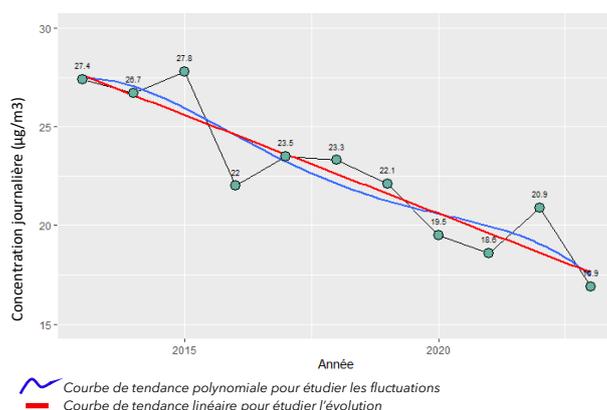


Figure 26 : Évolution de la concentration moyenne journalière en PM₁₀ sur la station Clemenceau

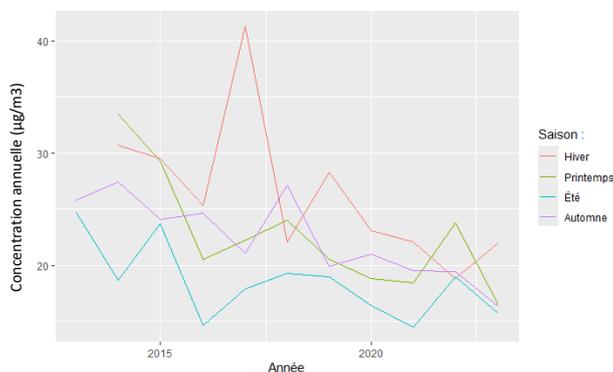


Figure 27 : Évolution de la concentration annuelle en PM₁₀ sur la station Clemenceau

Les fortes concentrations en PM₁₀ sont retrouvées au cours de l'hiver, du printemps et de l'automne, en lien avec les sources de ces dernières, émises au niveau national dans des proportions équivalentes par le secteur résidentiel, l'industrie et l'agriculture. L'année 2016 a été marquée par un épisode de pollution aux particules d'ampleur nationale fin décembre, expliquant ainsi le fort pic remarqué en hiver sur la Figure 27. La baisse des concentrations annuelles au fil des années est moins marquée en été que sur les autres saisons. Il s'agit d'un polluant dont les concentrations les plus élevées sont observées en hiver en lien avec des conditions météorologiques froides et peu dispersives.

La baisse généralisée des niveaux de PM₁₀ entre 1999 et 2023 sur l'Eurométropole de Strasbourg est liée d'une part à une baisse des émissions et d'autre part à l'impact des conditions météorologiques.

c. Ozone

Les mesures d’ozone proviennent de la station Robertsau et révèlent une **augmentation de la concentration moyenne journalière de 21,3% en O₃ entre 1998 et 2023**.

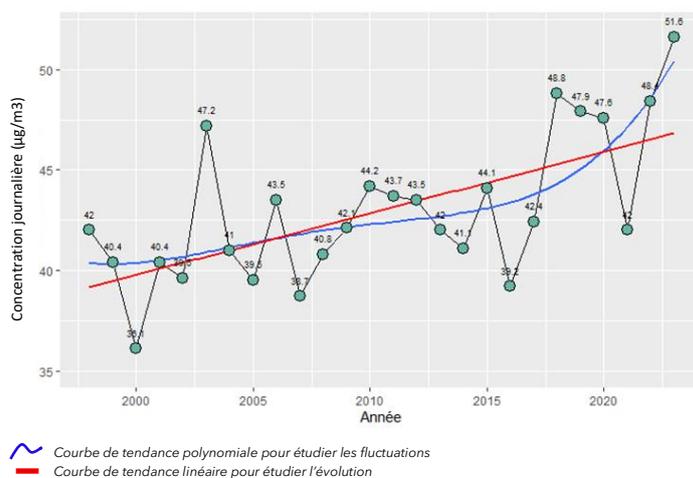


Figure 28 : Évolution de la concentration moyenne journalière en O₃, station Robertsau sur l'Eurométropole de Strasbourg

De 1999 à 2023, l’augmentation de la concentration annuelle en O₃ a été de **+21%**. Toutefois cette augmentation n’est pas égale entre les saisons. En effet l’augmentation est plus marquée lors des deux saisons les plus froides. La concentration en hiver a connu une augmentation de +32% et de +46% en automne, qui est loin des augmentations printanières (+16,5%) et estivales (+9,3%).

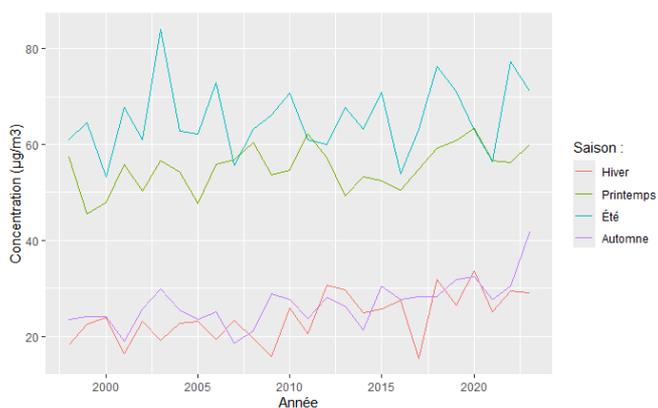


Figure 29 : Évolution de la concentration moyenne journalière en O₃ sur l'Eurométropole de Strasbourg

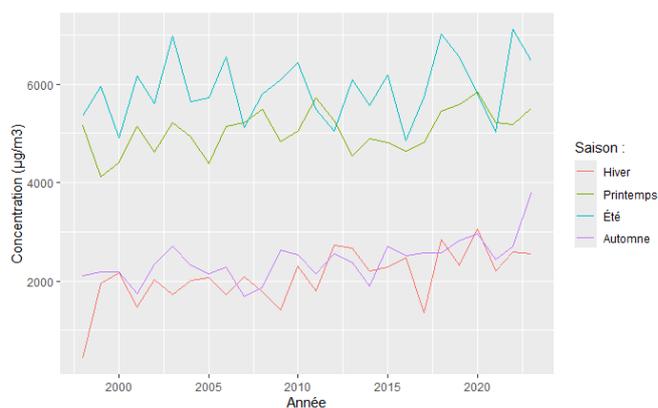


Figure 30 : Évolution de la concentration moyenne annuelle en O₃ sur l'Eurométropole de Strasbourg

2. Bilan de l'évolution des polluants chimiques sur les 25 dernières années et liens supposés avec les pollens

a. Evolution des polluants chimiques sur les 25 dernières années

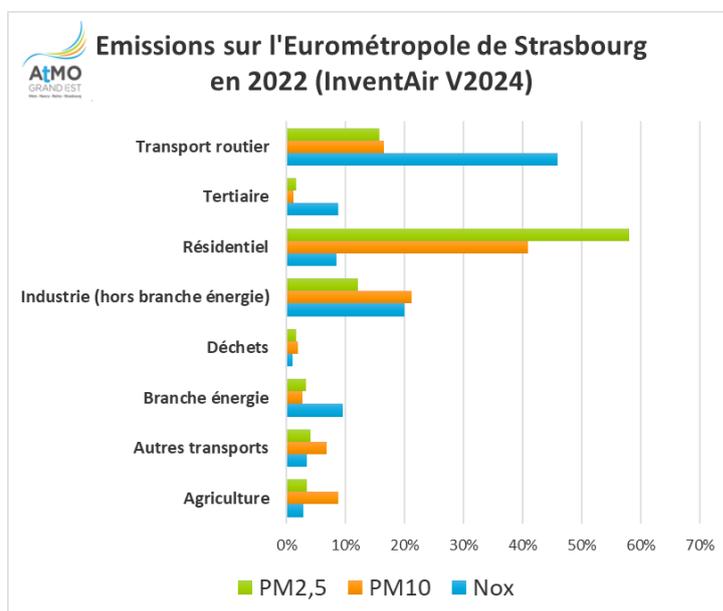


Figure 31 : Synthèse des émissions sur l'Eurométropole de Strasbourg en 2022

Une diminution des concentrations en dioxyde d'azote (NO₂) et particules (PM₁₀) aussi appelé « polluant primaire ». En effet de 1999 à 2023 les concentrations en NO₂ ont diminué de **-54%** et **-52%** aux deux stations. De même pour les concentrations de PM₁₀ des diminutions de l'ordre de **-26%** sont remarquées pour les concentrations journalières.

Ces diminutions sont notamment liées aux progrès réalisés dans tous les secteurs excepté le résidentiel/tertiaire. Pour le secteur des transports routiers, le renouvellement du parc de véhicules, l'équipement progressif des véhicules particuliers en pots catalytiques depuis 1993, le développement de technologies de réduction des émissions ainsi que la mise en place de normes européennes d'émissions sur les véhicules sont autant de facteurs expliquant la baisse des émissions du secteur des transports.

Cependant les concentrations en O₃, appelé « polluant secondaire », ont augmenté de **+21%**. Pour rappel, l'ozone est produit par transformation chimique de différents composés précurseurs en présence de NO₂ sous l'effet d'un ensoleillement important et de fortes températures.

Polluant et Station	Période de l'évolution :	Concentration :	Évolution :
NO ₂	Clémenceau	1999 à 2023	Moyenne journalière -53,6%
		Gloable annuelle -51,9%	
	Robertsau (Nord)	1999 à 2023	Moyenne journalière -51,7%
		Gloable annuelle -51,8%	
PM ₁₀	Clémenceau	2014 à 2023	Moyenne journalière -26,3%
		Gloable annuelle -19,2%	
	Robertsau (Nord)	2000 à 2020	Moyenne journalière -26,0%
		Gloable annuelle 19,6%	
O ₃	Clémenceau		Moyenne journalière
			Gloable annuelle
	Robertsau (Nord)	1999 à 2023	Moyenne journalière 21,3%
		Gloable annuelle 20,5%	

Tableau 2 : récapitulatif de l'évolution des concentrations des polluants atmosphériques

b. Liens possibles entre polluants et pollens

Les polluants atmosphériques semblent jouer un rôle dans les manifestations allergiques en interagissant avec le grain de pollen, sur le patient ou sur la plante.

Des études¹ ont révélé que **la pollution modifie la structure des pollens**. En effet, certains polluants chimiques, notamment l'ozone (O₃), le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂), ont la capacité de déformer et de fracturer la paroi des grains de pollens. Les fragments de grains de pollens peuvent ainsi pénétrer beaucoup plus profondément dans nos voies respiratoires.

- A Mulhouse, des **grains de pollens de bouleau prélevés dans des quartiers industriels ou à forte pollution automobile** présentent **beaucoup de microfissures pouvant faciliter la libération des allergènes des pollens**.
- Les polluants peuvent se lier aux allergènes présents dans l'air et libérés à la suite de l'éclatement des grains de pollens pendant un orage ou une averse (choc osmotique avec l'humidité, choc physique avec le vent).
- La **rupture des grains de pollen** libère un **aérosol de microparticules fines allergisantes**, capable d'atteindre le poumon profond.

Par ailleurs, **certains polluants chimiques** (le NO₂ et les particules fines) sont **capables de modifier la structure des protéines de pollens** ou de **se fixer directement sur les pollens, les rendant** alors beaucoup **plus allergisants**².

D'autre part, **la pollution irrite les muqueuses** des yeux, du nez, de la gorge – et parfois des poumons. Les voies respiratoires sont ainsi fragilisées et plus sensibles aux différents allergènes présents dans l'air. De fait, **les personnes allergiques sont plus vulnérables pendant les pics de pollution**.

Enfin, la pollution **stresse la plante** qui fabrique plus d'allergènes. Des travaux de recherche menés au niveau national indiquent :

- **Une augmentation de la quantité d'allergènes** présents dans les grains de pollen et de leur capacité à se libérer dans l'air (**stress chimique**) en présence de pollution,
- Un enrichissement de certains pollens (ivraie, fétuque, bouleau, chêne, orme) en acides aminés (allergènes) lorsqu'ils sont exposés à de fortes concentrations de NO₂, SO₂, O₃ et/ou en CO₂³,

A contrario, en présence d'une **meilleure qualité de l'air**, certaines plantes pourraient être en meilleure santé et produire **plus de pollen**. Par ailleurs, les particules fines servent parfois de support aux grains de pollen, les aidant à rester en suspension plus longtemps. Une diminution des PM10 pourrait **réduire la durée de présence des pollens dans l'air**, mais **favoriser leur dispersion plus large**, rendant l'exposition plus diffuse.

¹ Puc M. Influence of meteorological parameters and air pollution on hourly fluctuation of birch (*Betula L.*) and ash (*Fraxinus L.*) airborne pollen. *Ann Agric Environ Med* 2012;19(4):660–5. 2. Beck et al, *Plos One* 2013

² Berendt H., Becker W.M., Friedrichs K.H., Darsow U., Tomingas R. - Interaction between aero-allergens and airborne particulate matter. *Int. Arch. Allergy Immunol.*, 1992, 99, 425-428

³ Masuch G., Franz J. Th., Schoene K., Musken H., Bergmann K.Ch. - Ozone increases group 5 allergen content of *Lolium perenne*. *Allergy*, 1997, 52, 874-875.

Moins de pollution peut également rendre le pollen "moins agressif". Une baisse de la pollution pourrait donc **réduire la capacité du pollen à déclencher des réactions allergiques sévères**. Cependant, si la production de pollen augmente, les allergies pourraient rester problématiques pour les personnes sensibles.

Moins de pollution améliore la santé des plantes → possible augmentation de la production de pollen.

Moins de particules dans l'air → meilleure dispersion du pollen, mais durée de suspension réduite.

Moins de NO₂ et de particules fines → pollen moins agressif, mais potentiellement en plus grande quantité

EVOLUTION DES CONCENTRATIONS DE POLLENS

L'exploitation des données polliniques a été réalisée sur la période 1998-2023. Tout comme pour les paramètres météorologiques et les polluants, le traitement a porté sur 3 périodes 1998-1999-2000, 2009-2010-2011, 2021-2022-2023, afin de mettre en évidence des tendances d'évolution sur 3 décennies. Cette étude prend uniquement en compte le calendrier pollinique estimé des espèces suivies.

1. Etude du bouleau

La Figure 32 représente l'évolution de la concentration de pollen de bouleau dans l'air (en grains/m³) en fonction du jour de l'année, comparant différentes périodes moyennées correspondant aux jours de l'année, entre environ 50 et 150 jours (principalement le printemps).

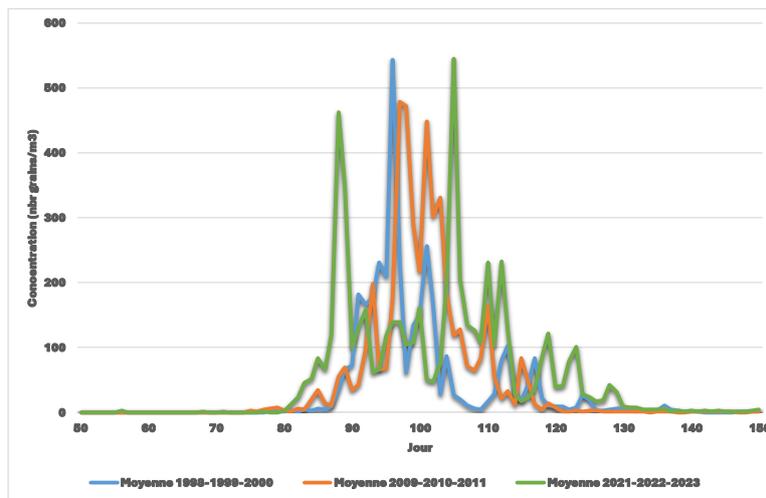


Figure 32 : Évolution des concentrations journalières des pollens de bouleau

Les pics de concentration de pollen se situent principalement entre les jours 80 et 120.

- La période **1998-2000** révèle un **pic intense** et qui semble **plus étalé** (montée progressive des concentrations avant le maximum journalier), suivi d'un deuxième pic dont la teneur est divisée par deux.
- La période **2009-2011** présente **deux pics d'intensité plus faible** par rapport à la première période se succédant sur une courte période, mais dont la montée a été très rapide.
- Au cours de la période **2021-2023** les **pics** sont **plus marqués** et les **concentrations plus élevées** par rapport aux périodes précédentes (**+55 % entre le cumul moyen de 2021 à 2023 et celui de 1998 à 2000**), suggérant une **augmentation récente des niveaux de pollen**.

Ainsi, les **pics de pollinisation** semblent se **concentrer autour des mêmes jours** chaque année, indiquant une **saisonnalité** dans l'ensemble **homogène**. Cependant, l'intensité des pics tend à augmenter ces dernières années.

La période pollinique du bouleau sur plusieurs années a été étudiée afin de voir les fluctuations de cette dernière depuis le début des prélèvements.

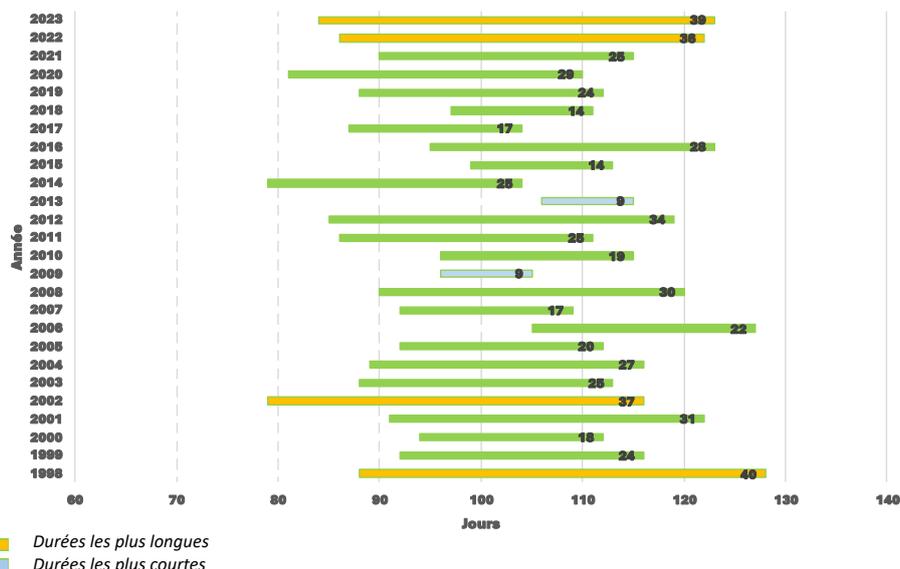


Figure 33 : Période pollinique du bouleau

La période pollinique du bouleau se situe majoritairement au printemps (vers le jour 100).

La durée de la saison est variable, certaines années révèlent des périodes de pollinisation plus longues (jusqu'à 41 jours), tandis que d'autres sont plus courtes (moins de 20 jours). A titre de comparaison :

- 2000-2005 : Plusieurs années avec des périodes longues (~30-40 jours).
- 2010-2015 : Des variations plus marquées, avec certaines années plus courtes (~10-20 jours).
- 2020-2023 : Grande instabilité, avec des années très courtes (~14 jours) et d'autres plus longues (~40 jours).

Si on compare les années, la pollinisation semble commencer légèrement plus tôt après 2010. Durant les trois dernières années (2021, 2022 et 2023), le premier pic de concentration est arrivé avec environ dix jours d'avance par rapport aux deux périodes passées de comparaison.

Bilan :

Au cours de ces vingt-six dernières années, la concentration de pollen du bouleau au niveau de l'EMS a connu une augmentation plus intense de **+55%**. La saison pollinique du bouleau a connu un changement avec un avancement de la date de début de saison.

Durant les trois dernières années (2021, 2022 et 2023), le premier pic de concentration est arrivé avec environ dix jours d'avance par rapport aux deux périodes passées de comparaison. Cela peut être dû à des hivers plus courts ou à un réchauffement printanier plus précoce.

Une **pollinisation très brève est constatée certaines années**, ce qui pourrait être lié à :

- Des **fortes températures printanières** qui accélèrent la libération du pollen.
- Une **météo plus instable** (précipitations qui peuvent plaquer les pollens au sol).

D'autres années, la pollinisation semble **plus étalée**, ce qui pourrait être causé par des conditions climatiques qui prolongent la période de libération du pollen.

2. Etude des graminées

Le graphique ci-dessous représente l'évolution de la concentration de pollen de graminées (en grains/m³) en fonction du jour de l'année, comparant différentes périodes moyennées correspondant aux jours de l'année, entre environ 80 et 250 (période estivale).

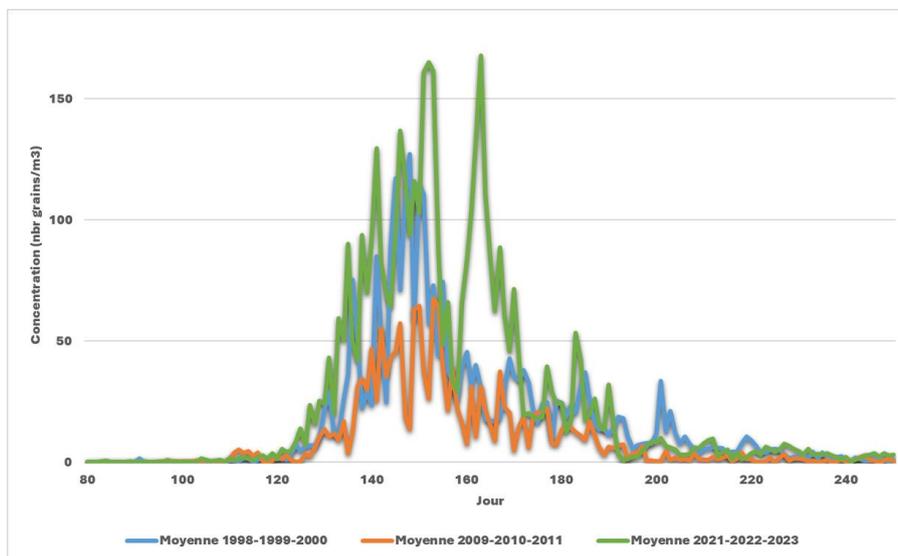


Figure 34 : Évolution des concentrations journalières de pollens de graminées sur 3 décennies

Déroulement de la saison pollinique des graminées

- Début de la saison : La concentration de pollens commence à augmenter vers le jour 100 (printemps).
- Pic principal : Il est atteint entre les jours 120 et 180 (fin du printemps - début de l'été). Ce pic est plus marqué dans les périodes récentes à partir de 2021
- Diminution progressive :
 - Après le jour 180, la concentration de pollens chute.
 - À partir du jour 220 (fin de l'été), elle devient presque nulle.

Évolution dans le temps

- De **1998-2000**, la saison pollinique est modérée, avec une succession de **pics d'intensité moyenne**.
- Entre **2009 et 2011**, la saison pollinique est modérée avec une succession de **pics de faible intensité** par rapport à 1998-2000 mais dont la durée et l'évolution est similaire.
- De 2021 à 2023, **l'émission de pollen a augmenté plus rapidement avec des pics polliniques plus intenses**. Quatre pics polliniques sont visibles, dont les trois premiers se trouvent dans la même période que les années précédentes
- Le **cumul moyen de graminées sur trois ans a augmenté de +47 % entre 2021-2023 par rapport à 1998-2000**.

Le graphique suivant représente l'évolution de la période de pollinisation des graminées (Poacées) au fil des années.

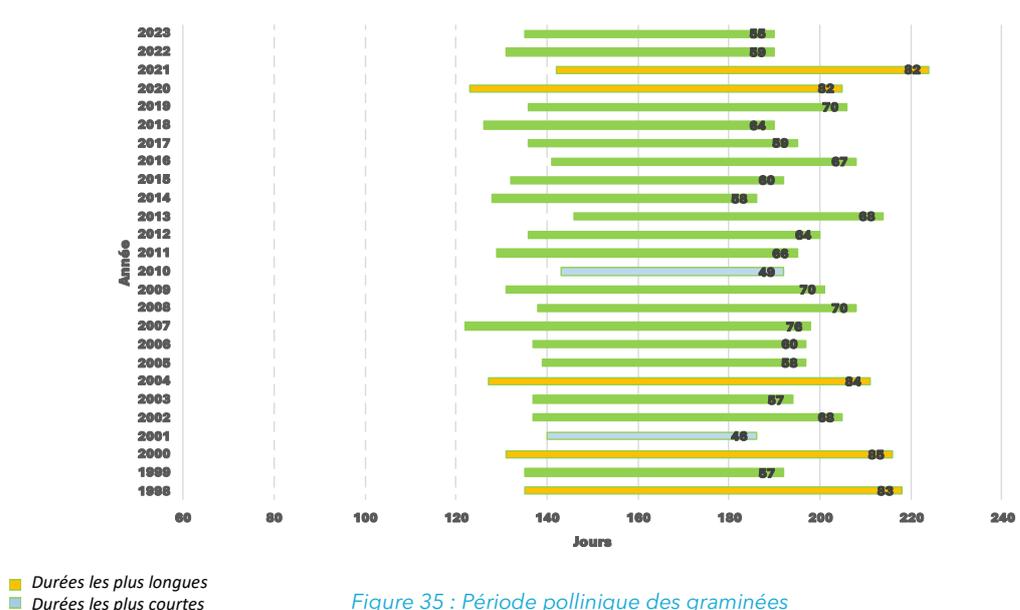


Figure 35 : Période pollinique des graminées

Début et fin de la saison pollinique

- La période pollinique commence généralement autour du jour 120-140 (printemps).
- Elle s'étend sur plusieurs semaines, avec des durées variables chaque année (indiquées en jours sur le graphique).
- Pour certaines années, la pollinisation dure près de 90 jours, tandis que dans d'autres, elle est plus courte (environ 50 jours).

Il n'y a pas de tendance évidente à l'allongement ou au raccourcissement de la période de pollinisation des graminées. Contrairement à d'autres pollens, la saison des graminées semble rester relativement stable, bien que l'on note un raccourcissement de la durée au cours des deux dernières années.

Bilan

- La **concentration de pollen des graminées a augmenté ces dernières années**, avec un pic plus intense en 2021-2023. Cela pourrait s'expliquer par la **hausse du cumul pluviométrique remarquée sur l'été depuis 26 ans**. Les précipitations **favoriseraient la croissance des graminées**, qui pourraient **libérer de très grandes quantités de pollens** dans l'air quand le temps sera **moins humide**.
- La période de pollinisation reste stable, mais une légère tendance à l'allongement peut être observée. La **période critique** se situe entre les **jours 120 et 180** (mai-juillet).
- **La saison pollinique des graminées est longue (entre 50 et 90 jours), en raison notamment du grand nombre d'espèces qui pollinisent successivement**, ce qui signifie une exposition prolongée aux allergènes.
- **Des variations interannuelles existent**, rendant certaines années plus difficiles que d'autres pour les personnes allergiques.

3. Etude de l'aulne

Le graphique suivant représente l'évolution de la concentration de pollen de l'aulne (en nombre de grains/m³) au fil des jours de l'année, en comparant différentes périodes moyennes, afin d'étudier plus en détail l'évolution des concentrations sur trois décennies.

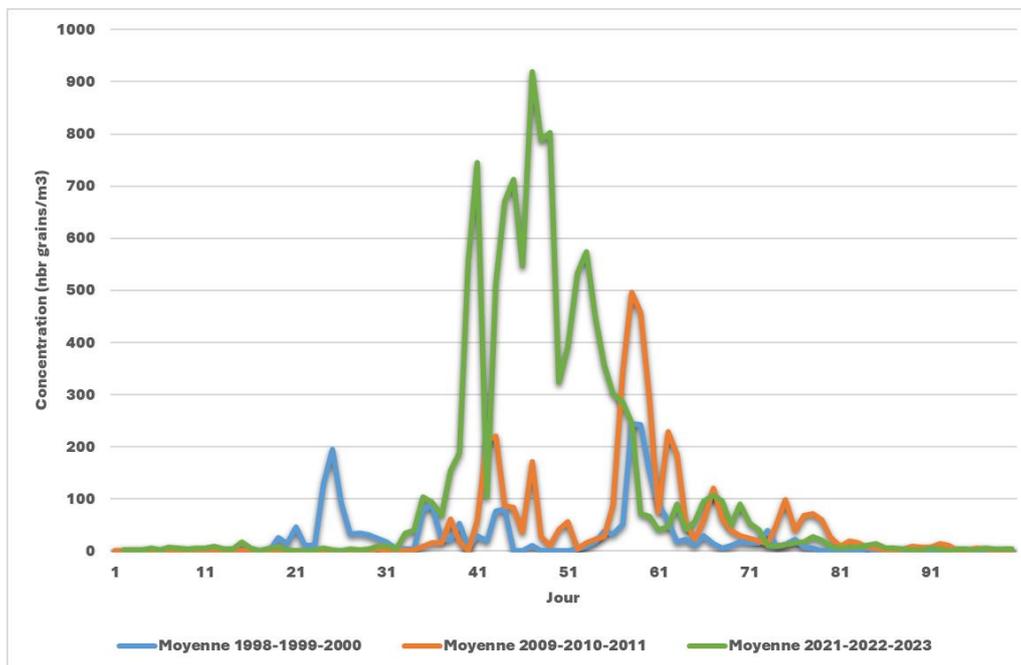


Figure 36 : Évolution des concentrations journalières de pollens d'aulne sur 3 décennies

La pollinisation de l'aulne commence en hiver vers les jours 20-30, le pic se situe entre les jours 40 et 60 (février-mars). La pollinisation se termine avant le jour 75, ce qui correspond au début du printemps.

Une hausse progressive des concentrations au fil des décennies est constatée :

- En 1998-2000 : les concentrations étaient plus faibles, avec des pics modérés.
- En 2009-2011 : les concentrations ont augmenté, avec des pics plus marqués et des niveaux deux fois plus importants que lors de la précédente période.
- En 2021-2023 : les pics sont nettement plus élevés, dépassant 750 grains/m³, la saison pollinique se révèle plus intense que sur les deux dernières décennies.

La période de pollinisation reste concentrée en hiver et début du printemps, mais semble se décaler légèrement vers un début plus précoce depuis 2009. Cependant si l'on compare la durée moyenne des saisons 2021-2023 avec celle de 1998-2000 aucune différence n'est observée. Le graphique ci-dessous représente la période pollinique de l'aulne sur plusieurs années en fonction du jour de l'année.

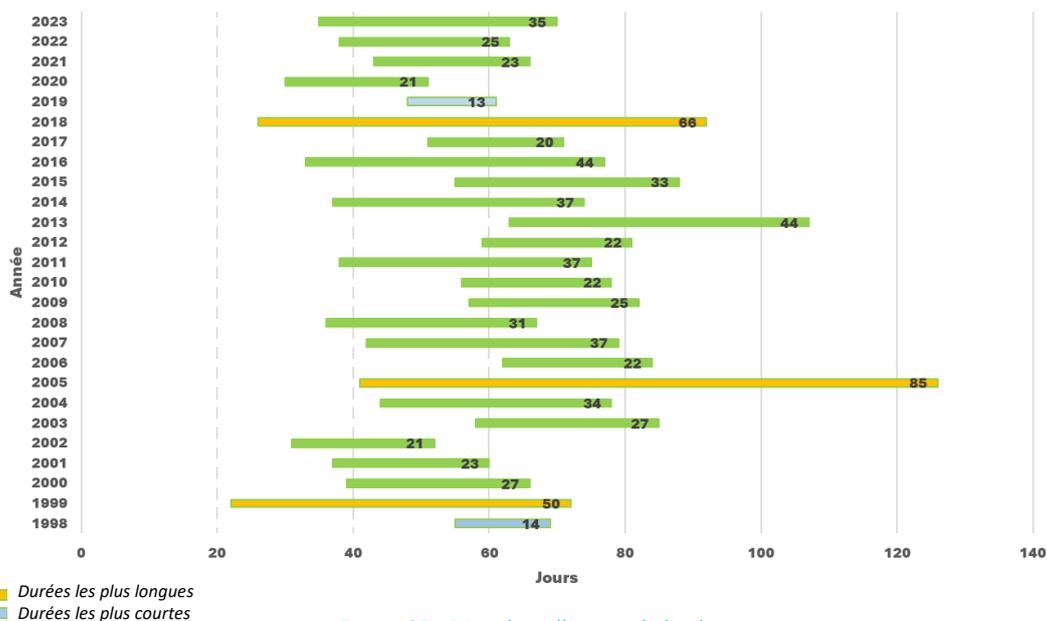


Figure 37 : Période pollinique de l'aulne

La durée de la période pollinique varie selon les années, allant d'environ 14 jours à plus de 88 jours.

On observe une grande variabilité interannuelle, probablement influencée par des conditions météorologiques comme la température et les précipitations.

Pour certaines années (ex. vers 2005), la saison pollinique semble exceptionnellement longue (environ 88 jours).

Bilan

La quantité de pollen d'aulne dans l'air a augmenté de façon notable ces deux dernières décennies (**+388 % entre 2021-2023 et 1998-2020**), dans lesquelles figurent les années les plus chaudes qu'ait connu le Grand Est. Les pics sont de plus en plus marqués, ce qui indique une **intensification de la pollinisation**.

La **période de pollinisation** reste **concentrée en hiver et début du printemps**, mais **ne semble pas se décaler vers un début plus précoce**. Elle serait même **légèrement plus courte (-2 jours)**.

Deux hypothèses pourraient expliquer ces premiers constats :

- Un **hiver plutôt doux** pourrait **entraîner un printemps précoce** et une **libération plus importante de pollens**.
- Le **rayonnement solaire** direct, indispensable au développement des bourgeons floraux, a fortement augmenté sur les saisons automnales et printanières. Cela pourrait expliquer la floraison et la pollinisation plus précoce de l'aulne (dès la mi-décembre)

4. Etude du chêne

Ce graphique représente l'évolution des concentrations de pollen de **chêne** (en grains/m³) au cours du **printemps** sur plusieurs périodes distinctes, afin d'étudier l'évolution des niveaux sur trois décennies.

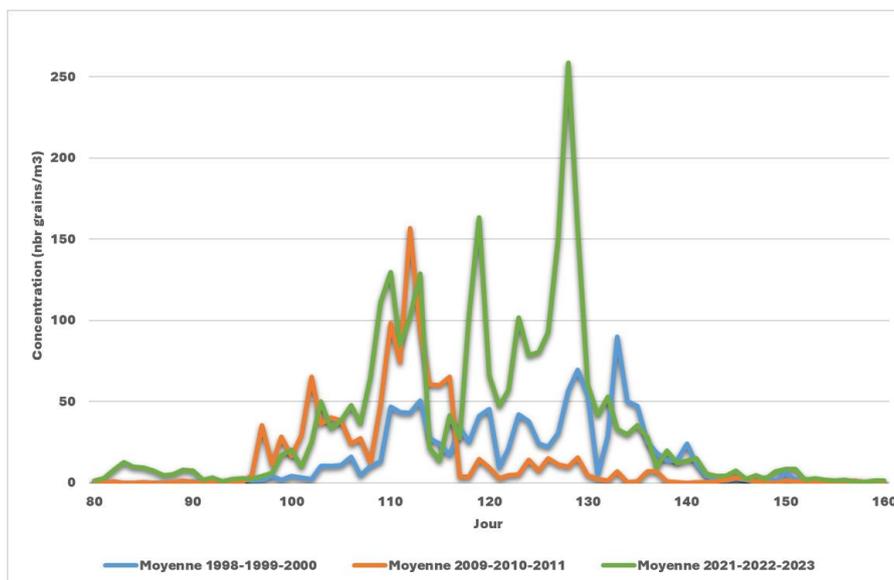


Figure 38 : Évolution des concentrations journalières des pollens de chêne sur 3 décennies

La saison pollinique du chêne semble démarrer progressivement avant le 90^{ème} jour de l'année, les concentrations sont en effet très faibles, puis à partir du jour 90 à 100, on assiste à la montée en puissance des pollens.

Les pics de concentration sont variables suivant les périodes étudiées, néanmoins :

- Au cours de la période 1998-2000 :

Les niveaux fluctuent, se maintenant en-deçà des 50 grains/m³ entre le 109^{ème} et le 125^{ème} jour, avant d'atteindre un premier pic principal autour du jour 129, de faible intensité (75 grains/m³ au maximum), suivi d'un deuxième pic (80 grains/m³) le jour 133.

- Durant la période 2009-2011 :

La montée des niveaux se révèle plus précoce débutant dès le jour 98, avec une première montée des niveaux remarquable entre jours 110 et 115. Le pic est observé au 112^{ème} jour (152 grains/m³), avant une rapide chute des niveaux dès le 118^{ème} jour.

- Période 2021-2023 :

La pollinisation s'intensifie, démarrant comme sur la période précédente dès le jour 98, et une augmentation du nombre de pics est observée. Les premiers sont remarquables sur les mêmes périodes que les premières décennies, mais deux autres pics se succèdent, avec une très forte intensité pour le dernier, dépassant les 250 grains/m³.

Ainsi le début de la période pollinique semble avancer légèrement, les premières augmentations notables de pollen arrivent plus tôt en 2021-2023 (~jour 90-100) comparé aux autres périodes (~jour 100-110).

Une augmentation de l'intensité des pics de pollen, avec notamment une hausse des concentrations maximales en 2021-2023, est remarquable. L'augmentation du cumul annuel sur trois ans est de +115 % entre 1998-2000 et 2021-2023. De premières hypothèses laissent à penser qu'un hiver plus doux accompagné de températures plus importantes au printemps entraînent une intensification de la floraison et une production accrue de pollen.

Le graphique suivant illustre l'évolution de la période de pollinisation du chêne au fil des années.

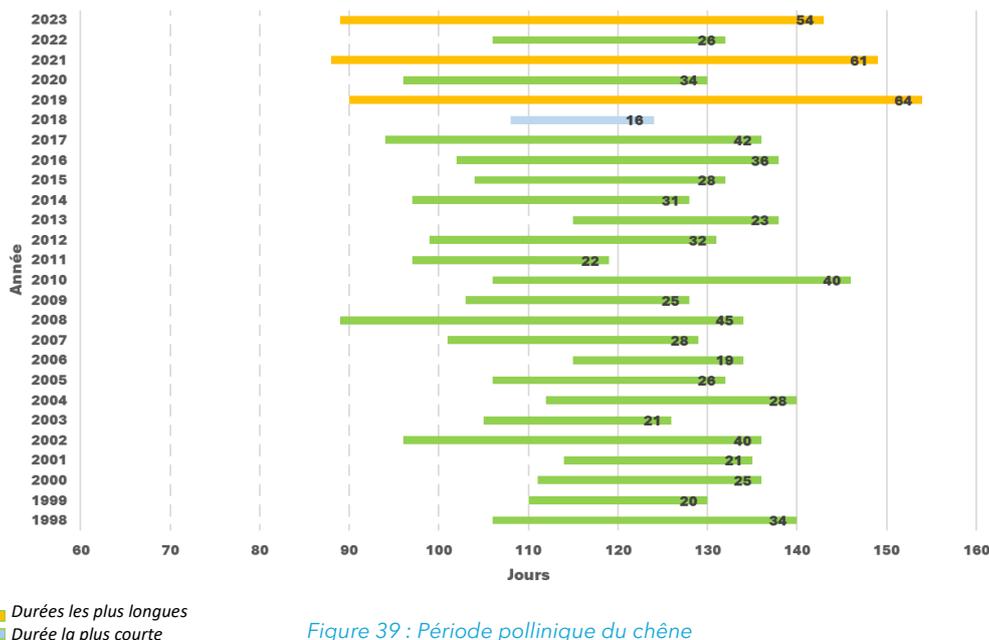


Figure 39 : Période pollinique du chêne

La durée de la saison pollinique du chêne fluctue selon les années. En effet, certaines années présentent une période pollinique courte (~20 jours), tandis que d'autres affichent des durées exceptionnellement longues (~85 jours).

La majorité des périodes polliniques commencent entre les jours 90 et 120 (début du printemps). La fin varie entre les jours 120 et 180, avec quelques exceptions plus longues.

Depuis les années 2020, on observe plusieurs longues périodes (ex. 62, 85 jours), ce qui pourrait suggérer un allongement de la saison pollinique ces dernières années.

Bilan :

- La concentration en pollen du chêne a connu une augmentation de **+115%** passant d'une concentration globale annuelle de 1231 grains/m³ (moyenne des années 1998, 1999 et 2000) à 2652 grains/m³ lors des trois dernières années. De plus on a constaté un doublement de pics polliniques entre les années 2010 et 2022 passant de deux à quatre pics annuels. Ces hausses sont de plus fortes intensités et plus étalées dans le temps. En effet la durée de la saison pollinique du chêne a connu une hausse **+21 jours** (+77%) en un quart de siècle.
- De premières hypothèses laissent supposer **que des températures plus douces en hiver** peuvent entraîner un **début plus précoce de la floraison** comme cela est observé entre 2020/2023 et 1998/2000. Des **printemps plus longs et plus chauds** occasionnent une **pollinisation prolongée**.
- D'autre part, des **années enregistrant des précipitations importantes** peuvent raccourcir la pollinisation (lessivage du pollen), au contraire des **années prédominées par la sécheresse** peuvent prolonger la libération du pollen.

5. Etude du platane

Ce graphique représente l'évolution de la concentration en pollen du platane (en grains/m³) au fil des jours de l'année, comparant trois périodes distinctes, afin d'étudier l'évolution sur 3 décennies.

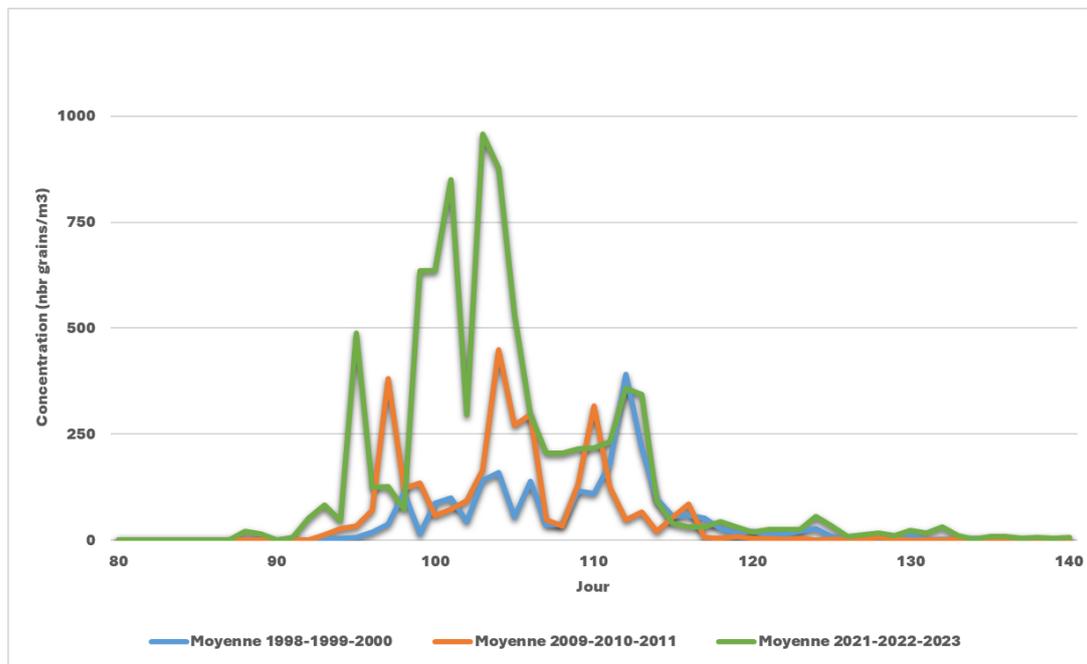


Figure 40 : Évolution de la concentration journalière du pollen du platane centrée sur les pics

La période analysée va environ du jour 60 au jour 140 et la pollinisation commence vers le jour 80 (début du printemps) et se termine autour du jour 130. Une réelle évolution est observée sur les 3 dernières décennies :

- Au cours de la **période 1998-2000**, la **pollinisation** se révèle **d'intensité faible** avec une montée progressive des niveaux jusqu'à atteindre le pic de pollinisation (377 grains/m³) au 112^{ème} jour.
- La **période 2009-2011** révèle une **augmentation notable** par rapport à la période précédente, avec la présence de **3 pics distincts**, dont le premier a été atteint rapidement dès le 97^{ème} jour avec une valeur de 375 grains/m³. Le second pic plus marqué, autour de 450 grains/m³, est atteint au 104^{ème} jour, ce qui montre une **intensification du phénomène**, avant l'apparition du dernier pic au 110^{ème} jour (315 grain/m³).
- La **période 2021-2023** se distingue des autres décennies avec une concentration nettement plus élevée, **dépassant les 900 grains/m³ à son maximum**. La **période de pollinisation** semble aussi **plus intense** avec **quatre pics plus marqués**.

Ainsi la saison du platane semble débiter pour toutes les périodes autour du jour 80, cependant l'intensité des pics de pollinisation croît au fil des décennies (+248 %). La tendance semble aller vers un allongement possible de la période pollinique avec une fin plus progressive dans les dernières années.

Le graphique suivant montre les périodes de pollinisation du platane sur plusieurs années, indiquant la durée de chaque période de pollinisation et la distribution de ces durées au fil des années.

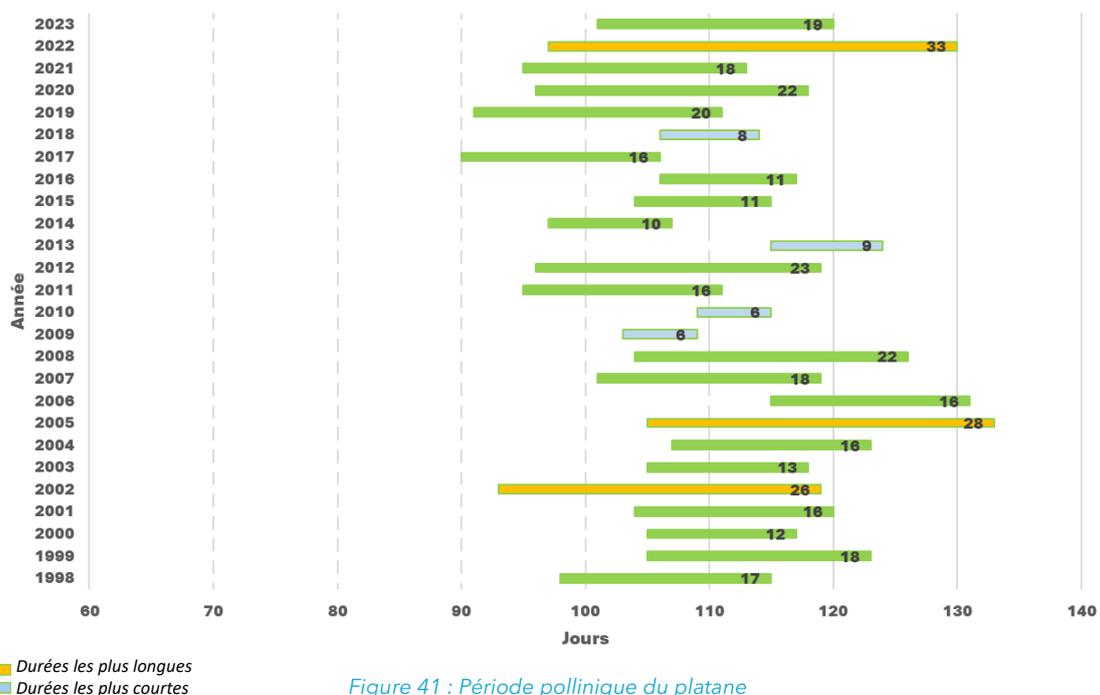


Figure 41 : Période pollinique du platane

La durée de la pollinisation (indiquée en nombre de jours) fluctue entre 7 jours et plus de 34 jours, selon les années.

- Sur la période 2000-2009, la durée de pollinisation varie, mais elle semble plus irrégulière, avec des périodes polliniques parfois plus courtes, autour de 7 à 21 jours.
- Entre 2010 et 2019 les périodes sont également d'une durée plus courte, entre 7 et 23 jours.
- De 2020 à 2022 la durée de pollinisation est en moyenne de 19 à 34 jours, avec des valeurs réparties autour du jour 100.

Bilan

Lors de ces dernières années, la concentration en pollen du platane a augmenté **+248%**. On observe que **cette augmentation s'effectue durant le printemps, mais commence à s'étendre sur l'été.**

Ce débord sur l'été n'est pas causé par un décalage de la saison pollinique mais par **une augmentation de la durée de la saison (+41%)** et une fin de saison plus tardive. Pour finir, lors des 3 dernières années, on constate une augmentation du nombre de pics polliniques, de leur intensité et le fait que la concentration en pollen augmente plus vite par rapport aux années 2000.

6. Analyse croisée des 5 pollens

Les Figures 42 et 43 nous permettent de constater la hausse des concentrations de pollen dans l'air de l'Eurométropole de Strasbourg. On observe qu'en fonction des années, les concentrations entre chaque pollen fluctuent, cependant l'aulne, le bouleau et le platane restent les pollens les plus présents. On peut aussi observer l'ordre d'apparition des différents pics polliniques : l'aulne est le premier arbre à émettre son pollen, suivi du bouleau, du platane, du chêne et des poacées concluant la saison des pollens.

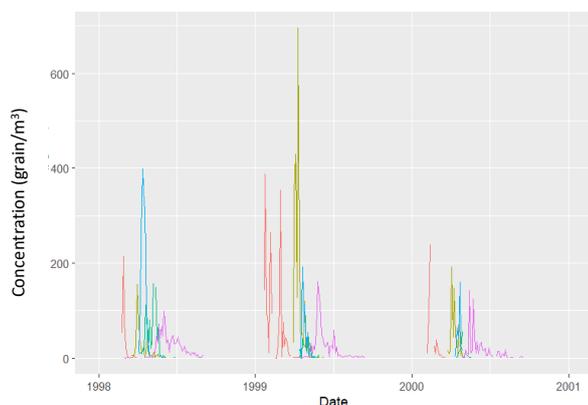


Figure 42 : Évolution des concentrations polliniques journalière sur l'Eurométropole de Strasbourg sur les années 1998 à 2000

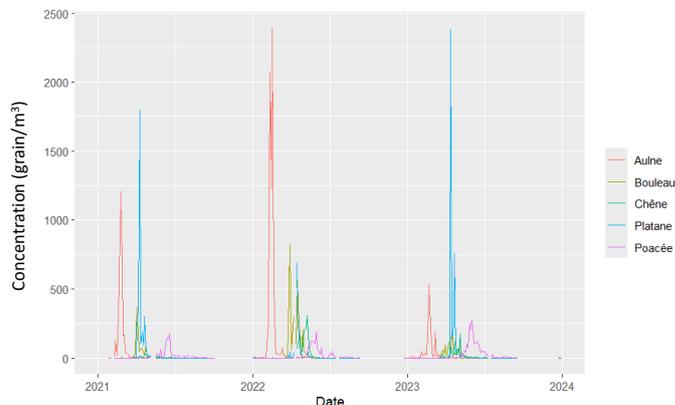


Figure 43 : Évolution des concentrations polliniques journalière sur de Strasbourg sur les années 2021 à 2023

Lors de ces vingt-six dernières années, la concentration pollinique sur l'Eurométropole de Strasbourg a connu une forte augmentation. Le cumul global annuel des cinq pollens étudiés des années 1998 à 2000 était de 12 519 grains/m³. Celui-ci a augmenté pour atteindre un taux de 32 707 grains/m³ pour les années 2021 à 2023, soit une augmentation de +20 187 grains/m³ (+161%).

En observant le tableau ci-dessous, on constate que l'augmentation de la concentration n'est pas aussi importante pour chaque pollen. **Les pollens de l'aulne et du platane étant ceux qui ont connu la plus forte augmentation avec respectivement +388% et +248%.**

On remarque aussi **une augmentation du nombre de pics polliniques au cours la saison et une évolution dans la durée de la saison.** En effet l'évolution de la concentration pollinique et du nombre de pics polliniques ne sont pas forcément liés à un allongement de la durée de la saison du pollen concerné. Pour exemple, l'aulne avec une augmentation de +388% a connu une légère baisse de -2 jours de sa saison.

	Taux d'évolution	Nombre de pics en P1	Nombre de pics en P2	Début de la saison*	Fin de la saison*	Durée de la saison*
Bouleau	+55%	2 pics	2 pics	- 4 jours	+ 1 jour	+ 6 jours
Graminées	+47%	2 - 3 pics	4 pics	+ 2 jours	- 8 jours	- 10 jours
Aulne	+388%	2 pics	3 - 4 pics	0	- 3 jours	- 2 jours
Chêne	+115%	2 pics	4 pics	- 10 jours	+ 6 jours	+ 21 jours
Platane	+248%	1 pic	3 - 4 pics	+ 5 jours	+ 3 jours	+ 7 jours
P1 = moyenne des années 1998, 1999 et 2000		P2 = moyenne des années 2021, 2022 et 2023				
* différence entre les dates de P1 et P2						

Tableau 3 : Récapitulatif des taux d'évolution des concentrations des pollens étudiés, du nombre de pics de pollinisation et de la durée des saisons polliniques entre 1998 et 2023

7. Premières conclusions

Au cours de ces vingt-six dernières années, l'Eurométropole de Strasbourg a connu de nombreux changements qu'ils soient climatiques ou en lien avec la qualité de l'air strasbourgeois. En effet, Strasbourg subit le changement climatique avec une augmentation des températures annuelles de +1,1°C. En rentrant plus dans le détail, les étés ont connu une hausse des températures de +2,2°C et les automnes de +1,8°C.

Conjointement à cela, d'autres facteurs importants ont connu des évolutions tel que la durée d'ensoleillement avec +15%, le rayonnement solaire avec +5,4% mais aussi le volume pluviométrique avec une baisse de -6,8%. Toutes ces évolutions font que le climat est devenu plus sec passant d'un taux d'humidité de 77,9% à 73,5%.

La qualité de l'air a aussi évolué. On constate une baisse des concentrations des polluants primaires NO₂ et PM₁₀ de l'ordre respectivement de -50% et -26%. Cependant l'O₃, polluant secondaire résultat de réactions chimiques liées au rayonnement solaire et aux fortes températures, connaît une hausse de +21% depuis 1999.

Bien que la qualité de l'air se soit améliorée avec la baisse des concentrations de certains polluants, celle-ci se retrouve plus chargée en pollens. En effet, sur ces 26 dernières années, la concentration des cinq pollens étudiés (Aulne, Bouleau, Chêne, Platane et Poacées) n'a fait qu'augmenter avec des intensités variant selon l'espèce. L'aulne est l'arbre qui a connu la plus forte hausse de sa concentration pollinique avec +388%, suivis par le platane avec +248% et le chêne avec +115%. On observe aussi, pour certaines espèces, une augmentation du nombre de pics polliniques et une évolution de la durée de la période pollinique.

L'évolution simultanée des conditions météorologiques, des concentrations de polluants et des pollens dans l'air amène à s'interroger sur les liens existants entre ces paramètres et particulièrement sur ceux qui auraient un impact significatif sur la hausse des concentrations de pollens.

1. Méthode d'analyse

Différentes études de corrélation ont été effectuées entre les paramètres étudiés. Cela est à différencier d'une étude de causalité (Annexe 2). Il s'agit en effet d'une exploitation de données sans aucune expérience menée en parallèle. Il faut donc garder à l'esprit qu'à aucun moment, il ne peut être affirmé qu'une variable cause la réduction ou l'augmentation des concentrations en pollen, mais qu'il existe un lien, une relation entre ces deux variables qu'elle soit directe ou indirecte.

Trois principaux types de corrélation ont pu être établis :

- **Corrélation positive** : lorsque l'une des 2 variables connaît une augmentation, la seconde connaît elle aussi cette augmentation, cela fonctionnant également dans l'autre sens avec les diminutions. Elles évoluent dans la même direction.
- **Corrélation négative** : Les variables évoluent dans des sens opposés. Lorsque l'une diminue, l'autre augmente et vice-versa.
- **Aucune corrélation** : lorsqu'un changement est observé dans l'une des deux variables, il peut ne pas y avoir de changement dans l'autre.

Avant de commencer les recherches de corrélations, une sélection de variables a été opérée pour expliquer ces augmentations de concentrations de pollens. Le choix de ces variables s'est effectué via le nombre de valeur manquantes et des liens possibles entre augmentations des concentrations polliniques et ces variables. Les variables choisies et les abréviations utilisées sont précisées dans le tableau suivant :

Paramètres météorologiques
Température moyenne journalière
Amplitude thermique quotidienne
Durée d'insolation quotidienne
Rayonnement global quotidien
Orientation du vent
Vitesse du vent
Précipitation quotidienne

Tableau 4 : Synthèse des paramètres météorologiques étudiés et abréviations associées

Suite à cette sélection, la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été choisie pour rechercher d'éventuels liens entre les variables. Cette méthode permet de positionner sur un cercle de corrélation les variables, et en fonction de leur positionnement les unes par rapport aux autres, cela permet de mettre en évidence certaines relations entre les variables. Coupler cette méthode avec des tests de corrélation permet de donner une idée globale des liens existants entre l'évolution de la concentration en pollen et les conditions climatiques.

Pour chaque analyse une méthode différente sera employée :

- Pour les facteurs de dispersion sera réalisée :
 - Une ACP sur la période de saison pollinique afin de voir quel paramètre météorologique ou polluant pourrait impacter les concentrations de pollens
- Pour les facteurs lors de la phase de dormance des arbres seront réalisées :
 - Des régressions linéaires et des tests de corrélation sur les moyennes des différents facteurs
 - Une étude sur la période de dormance afin de voir les facteurs jouant sur la formation du pollen et sur la durée de la saison pollinique

De plus chacune de ces analyses en composantes principales sera complétée par des tests de corrélation afin de voir l'intensité de la corrélation :

Fourchette des valeurs		Intensité de la corrélation
0	0,1	Pas de corrélation
0,1	0,3	Faible corrélation
0,3	0,5	Corrélation moyenne
0,5	0,7	Corrélation élevée
0,7	1	Très forte corrélation
-0,7	-1	Très forte corrélation
-0,5	-0,7	Corrélation élevée
-0,3	-0,5	Corrélation moyenne
-0,1	-0,3	Faible corrélation
0	-1	Pas de corrélation

Tableau 5 : Caractérisation de l'intensité des corrélations

Ces corrélations sont accompagnées d'un p-valeur (p_value) indiquant la fiabilité du test. On prend comme valeur de référence 0,05. Toute valeur se trouvant au-dessus est considérée comme non fiable. Sur les tableaux ci-dessous les valeurs de p-value significatives sont indiquées en jaune.

Un exemple de traitement de corrélation basée sur le bouleau est détaillé en annexe. Les résultats présentés ci-après regroupent les différentes conclusions issues des ACP.

2. Bouleau

a. Analyse sur la période de la saison pollinique

Les analyses qui vont suivre ont été réalisées sur la période du 20 mars au 5 mai, correspondant à la saison d'émission des pollens de bouleaux.

Une ACP a été réalisée afin d'approfondir la recherche de corrélation et a été détaillée en annexe. Les tests de corrélation qui ont suivi permettent de caractériser l'intensité des corrélations.

type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob
corrélation	0,22457	0,28936	0,24499	0,21948	-0,011286	-0,22193	0,080338	0,042943	0,15624
p_value	9,75E-13	1,80E-20	6,08E-15	3,21E-12	7,23E-01	1,82E-12	1,16E-02	1,78E-01	8,21E-07

Tableau 6 : Corrélation entre la variable concentration de pollens et les autres variables

Les principaux résultats qui en découlent sont :

- Corrélation menant à une forte concentration en pollen :

Un beau temps caractérisé par une température journalière élevée, une amplitude thermique, un temps d'ensoleillement et un rayonnement important contribuent à l'augmentation des concentrations.

- Corrélation menant à une faible concentration en pollen :

Les précipitations entraînent une diminution des concentrations.

b. Analyse sur la période de dormance

- Début de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison
Début de saison	corrélation	-0,36486	-0,54248	-0,65228	-0,56059	0,22385	0,22886	0,19649	0,19457	-0,12907	0,06588	-0,72590
	p_value	0,07292	0,00508	0,00041	0,00356	0,28208	0,27116	0,34650	0,35135	0,53863	0,75436	0,00004

Tableau 7 : Corrélation entre la variable Début de la saison et les autres variables

Concernant la période de dormance, les variables températures, l'amplitude thermique journalière, le temps d'ensoleillement et le rayonnement joueraient un rôle sur le début de la saison pollinique. Plus ces variables connaissent des valeurs hautes, plus la saison pollinique serait précoce. En revanche, il ne semble pas y avoir de corrélation significative entre les polluants et les concentrations en pollen de bouleau.

- Durée de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison	Debut
Durée de la saison	corrélation	0,25415	0,33436	0,41496	0,27806	0,03124	-0,25762	-0,09796	-0,10721	0,10567	0,02005		-0,72590
	p_value	0,22023	0,10234	0,03915	0,17836	0,88216	0,21377	0,64134	0,60999	0,61517	0,92420		0,00004

Tableau 8 : Corrélation entre la variable Durée de la saison et les autres variables

La durée d'ensoleillement lors de la période de dormance serait le paramètre le plus impactant sur la durée de la saison pollinique : plus la durée s'allonge plus la saison pollinique sera prolongée. Une corrélation négative assez forte a été mise en évidence entre la durée de la saison et le début de la saison. Ceci peut donc indiquer que plus la saison démarre tôt, plus la durée de celle-ci se voit allongée. Pour les autres paramètres, la p-value se révèle > 0,05 et ne démontre ainsi pas de corrélation significative.

c. Bilan des corrélations établies pour le bouleau

Les différents résultats obtenus par l'ACP pour l'analyse de la période pollinique et les régressions linéaires et tests de corrélation appliqués sur la période de dormance permettent d'établir des liens entre les concentrations de pollens de bouleaux, les polluants atmosphériques et les paramètres météorologiques.

A noter que n'apparaissent dans ce tableau⁴ que les corrélations significatives avec p-value <0,05. Lorsque rien n'est indiqué cela signifie que l'on ne peut pas conclure sur la présence ou non d'une corrélation par rapport aux tests réalisés.

	Température	Rayonnement solaire	Amplitude thermique	Temps d'ensoleillement	Pluie	O ₃
Concentration de bouleau	↗ +				↘ +	↗ +
Début de pollinisation		← +++				
Durée de pollinisation				↗ ++		

↗ augmentation / pas de corrélation ou très faible ↘ diminution ← avancée → retard
 + corrélation faible ++ corrélation moyenne +++ corrélation élevée

Tableau 9 : Synthèse de l'intensité des corrélations établies pour le bouleau

Le rayonnement solaire, l'amplitude thermique journalière et le temps d'ensoleillement qui ont augmenté depuis 25 ans jouent un rôle lors de la période de dormance sur le début de la saison pollinique du bouleau. Plus ces paramètres sont élevés, plus la saison pollinique est précoce comme cela est observé depuis plusieurs années.

⁴ Aide à la lecture du tableau : une augmentation du rayonnement solaire est fortement corrélée avec une anticipation de la date du début de pollinisation. Un temps d'ensoleillement élevé est moyennement corrélé à un allongement de la durée de la saison pollinique.

3. Graminées

Il existe tellement d'espèce de graminées, qu'il est difficile d'établir une saison phénologique précise, aussi la période de dormance ne sera pas analysée car elle ne ferait pas sens au vu du nombre d'espèces.

a. Analyse sur la période de la saison pollinique

Les analyses qui vont suivre ont été réalisées sur la période du 1^{er} mai au 15 août.

Un test de corrélation a été mené pour caractériser l'intensité des corrélations entre concentrations de pollens de graminées, les polluants et les paramètres météorologiques.

type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob
corrélation	0,054319	0,2064	0,25557	0,31615	0,075248	-0,20554	0,12817	0,081368	0,28341
p_value	8,84E-03	9,31E-24	6,05E-36	4,63E-55	2,84E-04	1,43E-23	5,71E-10	8,66E-05	3,82E-44

Tableau 10 : Corrélation entre la variable concentration de pollens et les autres variables

A noter que dans ce tableau toutes les corrélations se révèlent significatives avec p-value <0,05.

- Corrélation menant à une augmentation des concentrations en pollen :

Une amplitude thermique quotidienne, une durée d'ensoleillement UV et un rayonnement UV importants contribuent à l'augmentation des concentrations.

- Corrélation menant à une faible concentration en pollen :

Les précipitations ont tendance à diminuer les concentrations.

Il semble qu'il n'y ait aucune corrélation entre le nombre de grains de pollen de graminées et la concentration de NO₂. Cependant une corrélation est mise en évidence entre l'ozone et les concentrations en poacées. Ceci peut être causé par le fait que ces deux facteurs apparaissent au même moment. La saison des poacées se trouve être de mai à août, durant les mois les plus chauds, et l'ozone connaît ses plus fortes concentrations durant l'été.

b. Corrélations établies pour les graminées

Les différents résultats obtenus par l'ACP pour l'analyse de la période pollinique et les tests de corrélation appliqués permettent d'établir des liens entre concentrations de pollens de graminées, polluants atmosphériques et paramètres météorologiques.

	Température	Rayonnement solaire	Amplitude thermique	Temps d'ensoleillement	Pluie	Vent	O ₃	NO ₂
Concentration de graminées	/	↗ +++	↗ +		↘ +	/	↗ +	/

↗ augmentation / pas de corrélation ou très faible ↘ diminution + corrélation faible ← avancée ++ corrélation moyenne → retard +++ corrélation élevée

Tableau 11 : Synthèse de l'intensité des corrélations établies pour les graminées

Plusieurs facteurs pouvant impacter positivement et négativement les concentrations en graminées ont été décelés. Ainsi le beau temps et l'O₃ présentent des corrélations positives sur les graminées.

Il faut remarquer que ce n'est pas la température qui semble jouer un rôle dans l'augmentation des concentrations de pollens de graminées mais plutôt le rayonnement solaire qui présente la corrélation la plus marquée suivi de l'amplitude thermique journalière et du temps d'ensoleillement.

4. Aulne

a. Analyse sur la période de la saison pollinique

Les analyses qui vont suivre sont réalisées sur la période du 15 janvier au 15 mars. C'est lors de cette période que de nombreuses variations des concentrations en pollen d'aulne sont remarquées.

Une ACP a donc été réalisée afin d'approfondir la recherche de corrélation, accompagnée de tests révélant l'intensité des corrélations.

type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob
corrélation	0,29636	0,23725	0,16383	0,14651	0,049407	-0,088032	-0,063741	-0,097087	0,11685
p_value	2,27E-20	2,10E-13	4,87E-07	7,00E-06	1,32E-01	7,13E-03	5,16E-02	2,99E-03	3,48E-04

Tableau 12 : Corrélation entre la variable concentration de pollens et les autres variables

Les principaux résultats qui en découlent sont :

- Corrélation menant à une forte concentration en pollen :

Un beau temps, ensoleillé et accompagné d'une forte amplitude thermique journalière ferait augmenter la concentration en pollen de chêne.

- Corrélation menant à une faible concentration en pollen :

Les précipitations ont tendance à diminuer les concentrations.

A noter que toutes ces corrélations restent faibles.

b. Analyse sur la période de dormance

- Début de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison
Début de saison	corrélation	-0,49634	-0,19777	-0,17199	-0,14621	-0,04194	-0,00038	0,12428	0,12967	-0,14390	-0,22893	-0,29393
	p_value	0,01162	0,34332	0,41104	0,48556	0,84223	0,99854	0,55393	0,53674	0,49255	0,27100	0,15384

Tableau 13 : Corrélation entre la variable Début de la saison et les autres variables

Des températures hautes durant la période de dormance auraient pour effet d'avancer le début de la saison pollinique.

- Durée de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison	Debut
Durée de la saison	corrélation	0,04820	-0,23212	-0,44110	-0,28726	0,31232	0,27376	-0,00116	-0,01195	0,07480	-0,28649		-0,29393
	p_value	0,81904	0,26420	0,02730	0,16383	0,12852	0,18544	0,99562	0,95478	0,72232	0,16501		0,15384

Tableau 14 : Corrélation entre la variable Durée de la saison et les autres variables

Un temps d'ensoleillement élevé durant la période de dormance entrainerait un raccourcissement de la durée de la saison.

c. Corrélations établies pour l'aulne

Les différents résultats obtenus par l'ACP pour l'analyse de la période pollinique et les régressions linéaires et tests de corrélation appliqués sur la période de dormance permettent d'établir des liens entre concentrations de pollens d'aulne, polluants atmosphériques et paramètres météorologiques. A noter que toutes les corrélations sont indiquées sur le tableau mais que certaines sont plus significatives que d'autres (les commentaires portent uniquement sur les corrélations avec p-value < 0,05).

	Température	Rayonnement solaire	Amplitude thermique	Temps d'ensoleillement	Pluie	Vent	O3	NO2
Concentration d'aulne	↗ +				/		↗ +	/
Début de pollinisation	← ++	/						
Durée de pollinisation	/			↘ ++	/			

↗ augmentation / pas de corrélation ou très faible ↘ diminution ← avancée → retard
 + corrélation faible ++ corrélation moyenne +++ corrélation élevée

Tableau 15 : Synthèse de l'intensité des corrélations établies pour l'aulne

Des températures hautes durant la période de repos de la plante auraient pour effet d'avancer le début de la saison pollinique qui semble effectivement se décaler légèrement vers un début plus précoce ces dernières années.

Un temps d'ensoleillement élevé durant la période de dormance entrainerait un raccourcissement de la durée de la saison.

5. Chêne

a. Analyse sur la période de la saison pollinique

Toutes les analyses qui vont suivre ont été réalisées sur la période pollinique du chêne s'étendant du 1er avril au 31 mai.

Une ACP a donc été réalisée afin d'approfondir la recherche de corrélation, accompagnée de tests de corrélation pour en définir l'intensité.

type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob
corrélation	0,095791	0,22343	0,14603	0,10023	0,047219	-0,10752	-0,039319	-0,010051	0,088698
p_value	8,75E-04	4,36E-15	3,60E-07	4,96E-04	1,02E-01	1,86E-04	1,73E-01	7,28E-01	2,07E-03

Tableau 16 : Corrélation entre la variable concentration de pollens et les autres variables

Les principaux résultats qui en découlent sont :

- Corrélation menant à une forte concentration en pollen :

Un beau temps, ensoleillé et accompagné des températures plutôt hautes ferait augmenter la concentration en pollen de chêne

- Corrélation menant à une faible concentration en pollen :

Les précipitations feraient diminuer les concentrations.

Cependant toutes ces corrélations restent faibles.

b. Analyse sur la période de dormance

- Début de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison
Début de saison	corrélation	-0,43529	-0,57049	-0,51579	-0,21841	0,55701	0,12943	0,45493	0,47265	-0,21572	0,01599	-0,79688
	p_value	0,02965	0,00290	0,00831	0,29423	0,00382	0,53748	0,02232	0,01704	0,30038	0,93952	0,00000

Tableau 17 : Corrélation entre la variable Début de la saison et les autres variables

Des corrélations sont observées entre température moyenne journalière, écart de température moyenne journalière et temps d'ensoleillement sur la date de début de saison. Si lors de la période de dormance, ces valeurs connaissent des valeurs élevées, la saison pollinique serait donc avancée. Une corrélation négative est mise en évidence entre la durée de la saison et le début de celle-ci. Cela pourrait indiquer que plus la saison démarre tôt, plus la saison devrait être longue.

On remarque que les variables vitesse du vent et concentration de NO₂ ont une corrélation positive avec le début de la saison pollinique.

- Durée de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison	Debut
Durée de la saison	corrélation	0,39561	0,62673	0,56626	0,30008	-0,40717	-0,38251	-0,45609	-0,45262	0,37057	-0,21252		-0,79688
	p.value	0,05029	0,00080	0,00317	0,14500	0,04337	0,05914	0,02194	0,02309	0,06822	0,30776		0,00000

Tableau 18 : Corrélation entre la variable Durée de la saison et les autres variables

L'écart de température journalier et le temps d'ensoleillement ont des corrélations positives sur la durée de la saison pollinique. Au contraire, la vitesse du vent et le NO₂ ont des corrélations négatives.

c. Bilan des corrélations établies pour le chêne

Les différents résultats obtenus par l'ACP pour l'analyse de la période pollinique et les régressions linéaires et tests de corrélation appliqués sur la période de dormance permettent d'établir des liens entre concentrations de pollens de chêne, polluants atmosphériques et paramètres météorologiques. A noter que toutes les corrélations sont indiquées sur le tableau ci-dessous mais que certaines sont plus significatives que d'autres (les commentaires portent uniquement sur les corrélations avec p-value<0,05).

	Température	Rayonnement solaire	Ecart de température journalier	Temps d'ensoleillement	Pluie	Vent	NO ₂	O ₃
Concentration de chêne	/	↗ +			↘ +	/		
Début de pollinisation	← ++	/	← +++		/	→ +++	↗ ++	/
Durée de pollinisation	/		↗ +++		/	↘ ++	↘ ++	/

↗ augmentation ↘ diminution ← avancée → retard
 / pas de corrélation ou très faible + corrélation faible ++ corrélation moyenne +++ corrélation élevée

Tableau 19 : Synthèse de l'intensité des corrélations établies pour le chêne

L'amplitude thermique journalière et le temps d'ensoleillement (en hausse depuis 25 ans) pendant la période de repos de la plante, influent sur la date de début de saison ainsi que sur la durée de la saison pollinique du chêne qui a augmenté de façon effective ces dernières années. Pour la vitesse du vent (en diminution depuis 25 ans), plus elle est élevée plus le début de la pollinisation du chêne est retardé.

6. Platane

a. Analyse sur la période de la saison pollinique

Toutes les analyses qui vont suivre ont été réalisées sur une période s'étendant du 5 avril au 30 avril, correspondant à la période d'émission des pollens de platane.

Une ACP a été réalisée afin d'approfondir la recherche de corrélation et n'a pas mis en évidence une corrélation visible ainsi que des facteurs météorologiques pouvant augmenter les concentrations en platane. Les précipitations ont tendance à diminuer légèrement les concentrations.

type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob
corrélation	0,024014	0,07722	-0,019038	-0,061429	0,082512	0,029907	-0,073961	-0,059705	0,043819
p_value	5,91E-01	8,33E-02	6,70E-01	1,69E-01	6,42E-02	5,03E-01	9,72E-02	1,81E-01	3,26E-01

Tableau 20 : Corrélation entre la variable concentration de pollens et les autres variables

b. Analyse sur la période de dormance

- Début de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree_saison
Début de saison	corrélation	-0,38958	-0,43282	-0,49807	-0,13977	0,54479	-0,09614	0,30579	0,32780	-0,04942	-0,27298	-0,50068
	p_value	0,05423	0,03069	0,01128	0,50519	0,00486	0,64756	0,13713	0,10967	0,81452	0,18676	0,01080

Tableau 21 : Corrélation entre la variable Début de la saison et les autres variables

L'amplitude thermique journalière et le temps d'ensoleillement ont des corrélations négatives sur le début de la saison pollinique. Contrairement à la vitesse du vent qui a une corrélation positive en ce qui concerne le début de la saison. Une corrélation négative élevée a été mise en évidence entre la durée de la saison et le début de la saison. Ceci peut donc indiquer que plus la saison démarre tôt, plus la durée de celle-ci se voit allongée.

Il semble exister une corrélation négative entre le début de la saison pollinique et sa durée.

- Durée de la saison pollinique

	type	Température moyenne quotidienne	Amplitude thermique quotidienne	Durée d'ensoleillement quotidien	Rayonnement global quotidien	Vitesse du vent	Quantité de précipitation quotidienne	NO2_Cle	NO2_Rob	O3_Rob	Total pollen	Duree saison	Debut
Durée de la saison	corrélation	0,04253	0,20221	0,33289	0,15890	0,02552	-0,24783	-0,04794	-0,03093	0,05026	-0,04485		-0,50068
	p_value	0,84003	0,33238	0,10395	0,44804	0,90363	0,23230	0,81998	0,88331	0,81142	0,83143		0,01080

Tableau 22 : Corrélation entre la variable Durée de la saison et les autres variables

Aucune corrélation significative ne ressort au niveau de la durée de la saison.

c. Corrélations établies pour le platane

Les différents résultats obtenus par l'ACP pour l'analyse de la période pollinique et les régressions linéaires et tests de corrélation appliqués sur la période de dormance permettent d'établir des liens entre concentrations de pollens de platane, polluants atmosphériques et paramètres météorologiques.

	Température	Rayonnement solaire	Amplitude thermique	Temps d'ensoleillement	Pluie	Vent	NO2	O3
Concentration de platane	/							
Début de pollinisation	/	← ++			/	→ +++	/	
Durée de pollinisation	/							

↗ augmentation ↘ diminution ← avancée → retard
 / pas de corrélation ou très faible + corrélation faible ++ corrélation moyenne +++ corrélation élevée

Tableau 23 : Synthèse de l'intensité des corrélations établies pour le platane

Les températures journalières, l'amplitude thermique et le temps d'ensoleillement ont une corrélation moyenne avec le début de pollinisation, ce qui semblerait indiquer qu'il n'y a pas une précocité significative du démarrage de la pollinisation.

7. Bilan sur l'évolution des concentrations de pollens, liens établis et projections futures :

Espèces étudiées	Principaux constats issus des historiques de données	Principaux facteurs issus des recherches de corrélation pouvant expliquer les constats
Bouleau	Concentrations plus importantes Augmentation du nombre de pics	Corrélation faible : Température journalière élevée Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important Rayonnement important Concentrations en ozone
	Saison plus précoce	Corrélation élevée : Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important Rayonnement important
	Allongement de la saison (+6 jours)	Corrélation moyenne : Temps d'ensoleillement important
Graminées	Concentrations plus importantes Augmentation du nombre de pics	Corrélation moyenne : Rayonnement important Corrélation faible : Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important Concentrations en NO ₂ et O ₃ élevées
	Démarrage légèrement en retard de la saison	Non étudié (trop grand nombre d'espèces de graminées)
	Raccourcissement de la saison (-10 jours)	
Aulne	Forte augmentation des concentrations Augmentation du nombre de pics	Corrélation faible : Température Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important Rayonnement important Fortes concentrations d'ozone
	Démarrage normal de la saison	/
	Durée plus courte (-2 jours)	Corrélation moyenne : Temps d'ensoleillement élevé
Chêne	Forte augmentation des concentrations Augmentation du nombre de pics	Corrélation faible : Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important Rayonnement important
	Saison plus précoce (-10 jours)	Corrélation élevée : Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important Corrélation moyenne : Température journalière élevée
	Allongement de la saison (+21 jours)	Corrélation faible : Amplitude thermique importante Temps d'ensoleillement important
Platane	Forte augmentation des concentrations Augmentation du nombre de pics	Pas de conclusion possible sur la présence ou non de facteurs issus des recherches de corrélation
	Allongement de la durée (+7 jours)	
	Démarrage tardif de la saison	Corrélation moyenne : Vent fort

Tableau 24 : Synthèse des principaux constats relevés et des facteurs influençant l'évolution des concentrations des pollens étudiés

De par la mise en évidence de corrélations élevées, **une amplitude thermique journalière élevée et un temps d'ensoleillement important pendant la période de dormance, influent sur le démarrage plus précoce de la saison pour le chêne et le bouleau.** Pour le bouleau, **un rayonnement solaire élevé pendant cette période** joue également de façon importante sur la précocité de la saison.

En ce qui concerne **l'allongement de la durée de la saison** qui augmente **pour le chêne** une **corrélation élevée avec l'amplitude thermique et le temps d'ensoleillement quotidien** (période de dormance) a été

observée. Ce dernier aurait également un impact sur la durée de la saison du bouleau mais dans une moindre mesure (corrélation moyenne).

L'étude préalable des paramètres météorologiques tendait à démontrer un possible lien fort de la température moyenne journalière, de l'ensoleillement quotidien et du rayonnement global quotidien sur les concentrations en pollens des arbres printaniers et des graminées. Ce lien apparaît moins marqué dans le cadre de cette étude. En effet, il s'est avéré **que les corrélations entre les concentrations de pollens et les paramètres météorologiques étudiés se révèlent faibles à moyennes.**

Il semblerait ainsi que le changement climatique impacte les émissions polliniques, mais que d'autres facteurs influent également sur la hausse des niveaux.

Impact du patrimoine arborés et de l'âge des arbres

Par rapport aux constats réalisés précédemment sur l'augmentation globale des niveaux de pollens d'arbre au niveau de l'EMS, **on pourrait penser que les concentrations de pollen sont causées par une augmentation du nombre d'individu de chaque espèce présente sur l'EMS.** Cependant nous n'avons pas pu avoir accès à l'évolution du patrimoine arboré de la ville depuis 1998 pour confirmer cette hypothèse. Seules les données à l'instant T sont disponibles. En revanche, nous avons comparé les individus de chaque espèce présente sur l'EMS, avec les concentrations en pollen de 2023 pour voir si la répartition par catégorie d'arbre correspond à la même répartition que pour la concentration globale de pollen entre chaque espèce.

Sur le territoire de l'EMS, on constate que le platane est l'arbre le plus représenté avec 52% des arbres plantés, suivit par le chêne (19%), l'aulne (16%) et le bouleau (13%). Côté pollen, l'aulne représentait 41% des taxons analysés, suivi du platane (30%), du bouleau (19%) et pour finir du chêne (9%). Cette différence entre la proportion des individus et la proportion de la concentration globale peut-être causée pour partie par une maturité des arbres plus avancée pour certaines espèces, ou par les vents touchant la ville avec une importation de pollen venant des régions adjacentes.

En effet, l'âge des arbres influe sur les quantités de pollens émis. Les jeunes arbres ne commencent à émettre des pollens que dès qu'ils ont atteint leur âge adulte. Ils atteignent ensuite un pic de fécondité qui diminuera avec les années. Autre phénomène, certains arbres sur le déclin peuvent produire plus de pollens au cours d'une année pour assurer la reproduction de leurs espèces. Des cycles sont régulièrement observés, avec production de pollens tous les 3 à 5 ans pour certaines essences.

Il est possible que certaines années, il y ait une combinaison de facteurs météorologiques favorables à la pollinisation massive et des cycles de pollinisation qui intensifient annuellement également la production de pollen.

L'influence du CO₂

Le changement climatique s'accompagne en effet d'une élévation des niveaux de dioxyde de carbone dont les impacts ont été décrits et détaillés dans de nombreuses publications. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 30 % en un siècle, et cette augmentation joue sur la végétation terrestre qui utilise ce gaz comme source pour sa croissance. Une étude franco-australienne conduite par des chercheurs de l'Inra, de l'Université de James Cook et de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) a démontré que l'augmentation de l'activité photosynthétique des plantes augmentait dans les mêmes proportions que celle du CO₂ atmosphérique. L'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère entraîne ainsi :

- Une simulation de la croissance de la plante.
- Une augmentation de la quantité de pollens émis par la plante.
- Une aggravation des risques allergiques chez l'Homme.

De ce fait, le CO₂ peut donc avoir un rôle au niveau des augmentations des quantités de pollens.

Les projections futures

Le Giec a publié son premier rapport d'évaluation (AR - Assessment Report) en 1990. Le premier volume de son sixième rapport (AR6) est paru en 2021. Dans ces publications, le Giec présente l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique et communique des projections climatiques fondées notamment sur des hypothèses de concentration de GES.

Un ensemble de cinq scénarios socioéconomiques (SSP - Shared Socioeconomic Pathways) est utilisé dans l'AR6. Ces scénarios correspondent à des évolutions possibles vers différents modèles de société, qui se déclinent en plusieurs trajectoires d'émissions de GES. Il en ressort que les scénarios dits intermédiaires conduiraient à une hausse des températures mondiales de 2,7 °C d'ici 2100. Les scénarios les plus pessimistes conduiraient respectivement à une hausse des températures de 3,6 °C et 4,4 °C d'ici 2100. Cette augmentation ira de pair avec l'augmentation des concentrations en dioxyde de carbone.

On peut ainsi s'attendre à ce que les concentrations de pollens continuent de croître, entraînant une augmentation du nombre de personnes allergiques. Les changements observés dans le cadre de cette étude au niveau de la pollinisation depuis près plus de 20 ans en lien avec l'augmentation des différents paramètres (température, ensoleillement, amplitude thermique...) pourraient donc perdurer.

Par ailleurs, le réchauffement climatique pourra induire la disparition d'essences végétales non adaptées au climat et envahissement/occupation du terrain par d'autres espèces (ambrosie par exemple).

CONCLUSION

Au terme de cette étude approfondie menée sur 26 années de données, il apparaît que le changement climatique exerce une influence significative sur les concentrations de pollens allergisants dans l'air de l'Eurométropole de Strasbourg. L'augmentation des températures, de l'ensoleillement, du rayonnement solaire et de l'amplitude thermique, combinée à une baisse de la pluviométrie, semblent créer des conditions propices à une intensification de la pollinisation, tant en termes de concentration que de durée des périodes de pollinisation.

Les analyses ont mis en évidence une hausse marquée et préoccupante des concentrations de pollens allergisants dans l'air pour plusieurs espèces, notamment l'aulne, le platane et le chêne, accompagnée d'un allongement ou d'un décalage des saisons polliniques. Ces évolutions présentent des corrélations parfois élevées pour certains pollens avec des paramètres météorologiques spécifiques, tels que l'amplitude thermique journalière et le temps d'ensoleillement. D'autres facteurs comme la qualité de l'air, les émissions de CO₂, et l'âge des arbres peuvent également jouer un rôle. Si certaines corrélations se révèlent cependant absentes ou faibles pour certaines espèces, comme le platane, l'ensemble des résultats souligne une **tendance globale à l'aggravation du phénomène pollinique, avec des implications directes sur la santé publique.** En effet, l'augmentation des concentrations de pollens, couplée à la présence de polluants atmosphériques, accentue les risques allergiques pour une part croissante de la population.

Dans un contexte de réchauffement climatique annoncé par les projections du GIEC, **on peut s'attendre à ce que les changements observés sur les concentrations polliniques perdurent et s'aggravent dans les années à venir.** Il est essentiel d'anticiper ces évolutions attendues. Cela implique de renforcer les dispositifs de surveillance, d'adapter les politiques d'aménagement de l'espace public notamment en matière de choix végétaux, et de sensibiliser les acteurs locaux aux enjeux sanitaires liés aux pollens.

Enfin, cette étude constitue une base solide pour des recherches futures à l'échelle régionale, en intégrant davantage de capteurs et en explorant les cycles de pollinisation et l'évolution du patrimoine arboré.

Points clefs de l'étude

Changements climatiques observés (1998-2023) :

- Température moyenne annuelle : +1,1 °C
- Durée d'ensoleillement : +17 % (+11 jours)
- Amplitude thermique journalière : +1,4 °C
- Rayonnement solaire global : +6 %
- Pluviométrie : -6 %, avec printemps et automne plus secs

Évolution des concentrations de pollens :

- Hausse globale de +161 % des concentrations de pollen entre 1998-2000 et 2021-2023 :
 - Bouleau : +55 %
 - Graminées : +47 %
 - Aulne : +388 %
 - Chêne : +115 %
 - Platane : +248 %
- Tendances observées :
 - Allongement des saisons polliniques (sauf aulne et graminées)
 - Avancement du début de saison pour certaines espèces (bouleau, chêne)
 - Multiplication des pics polliniques

Corrélations identifiées :

- Facteurs météorologiques influents :
 - Amplitude thermique journalière
 - Temps d'ensoleillement
 - Rayonnement solaire
- Effets variables selon les espèces :
 - Corrélations fortes pour le bouleau et le chêne
 - Peu ou absence de corrélation pour le platane
- Polluants atmosphériques :
 - L'ozone semble renforcer l'allergénicité des pollens
 - Peu de lien direct avec NO₂ ou PM₁₀

Autres facteurs aggravants :

- Âge et maturité des arbres : influence la production de pollen
- Cycles de pollinisation : non étudiés mais potentiellement déterminants
- CO₂ atmosphérique : favorise la croissance végétale et la production de pollen

Projections futures :

- Selon les scénarios du GIEC, la hausse des températures et du CO₂ pourrait accentuer :
 - La production de pollen
 - La durée des saisons polliniques
 - L'impact sur la santé publique (allergies respiratoires)

ANNEXE 1

Les effets des polluants atmosphériques sur la santé et l'environnement

NO₂ (dioxyde d'azote)

Les oxydes d'azote (NO_x) proviennent surtout des véhicules et des installations de combustion. Ces émissions ont lieu principalement sous la forme de NO et dans une moindre mesure sous la forme de NO₂.

Le monoxyde d'azote présent dans l'air inspiré passe à travers les alvéoles pulmonaires, il se dissout dans le sang où il limite la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine. Les organes sont alors moins bien oxygénés.

Le dioxyde d'azote pénètre dans les voies respiratoires profondes où il fragilise la muqueuse pulmonaire face aux agressions infectieuses, notamment chez les enfants. Aux concentrations observées habituellement, le dioxyde d'azote provoque une hyperactivité bronchique chez les personnes souffrant d'asthme.

Des études épidémiologiques ont montré qu'une hausse des concentrations en dioxyde d'azote s'accompagnait notamment d'une augmentation du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire.

Particules (PM₁₀ et PM_{2.5})

Ces particules de petites tailles résultent soit de processus de combustion (industrie, transport, chauffage, etc.), soit de mécanismes chimiques à partir de molécules primaires présentes dans l'atmosphère, en l'occurrence des interactions entre ammoniac et oxydes d'azotes. Les poussières sont alors des particules dites secondaires.

L'effet de ces particules sur la santé dépend du diamètre des particules et de leur composition. En effet, les particules dont le diamètre est supérieur à 10 µm sont arrêtées et éliminées au niveau du nez et des voies respiratoires supérieures. En revanche, elles deviennent plus toxiques pour l'organisme lorsqu'elles ont un diamètre inférieur à 10 µm, puisqu'elles peuvent pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire.

Le rôle des particules en suspension a été montré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les personnes les plus sensibles.

Les particules en suspension sont classées comme agent cancérigène pour l'homme (groupe 1) par le Centre International de Recherche sur le Cancer depuis 2013.

Ozone troposphérique (O₃)

L'ozone n'est pas directement émis par une source anthropique mais résulte de la transformation photochimique de certains polluants de l'atmosphère, issus principalement du transport routier, (NO_x et COV) en présence des rayonnements solaires. Ainsi, les concentrations élevées d'ozone s'observent principalement l'été, durant les heures chaudes et ensoleillées de la journée.

L'ozone est un gaz capable de pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire. Il provoque, à de fortes concentrations, une inflammation et une hyperactivité bronchique. Des irritations du nez et de la gorge surviennent généralement, accompagnées d'une gêne respiratoire. Des irritations oculaires sont aussi observées.

Les personnes sensibles telles que les jeunes enfants dont l'appareil respiratoire est en plein développement, les asthmatiques, les insuffisants respiratoires chroniques et les personnes âgées sont souvent plus sensibles à la pollution à l'ozone. Les effets de l'ozone sont aggravés avec les efforts physiques intenses, qui augmentent le niveau d'air inhalé et donc l'ozone.

ANNEXE 2

A noter qu'une corrélation n'implique pas forcément une causalité.

- La corrélation est une mesure qui démontre à quel point deux variables sont liées. Cela permet d'exprimer des relations sans pour autant déclarer la cause et l'effet
- La causalité quant à elle, mesure la relation entre deux variables où une variable est affectée par l'autre. Cela se produit lorsque la valeur d'une variable augmente ou diminue à la suite d'un changement dans l'autre variable.

La corrélation et la causalité sont donc deux concepts différents pouvant exister en même temps, bien que l'un n'implique pas forcément l'autre. Bien que la causalité indique une relation entre deux variables, nous ne pouvons pas toujours supposer la causalité parce qu'une association peut avoir lieu pour différente raison :

- Influence d'une troisième variable: Il existe une corrélation entre la variable A et B, cependant cela peut ne pas être une causalité car cette corrélation peut être causé par une troisième variable.
- Causalité opposée: Lorsque l'on trouve une corrélation entre deux variables, A et B, on peut facilement supposer que A cause B. Cependant, dans certain cas, c'est B qui a pu causer A.
- Réaction en chaîne: Il peut y avoir beaucoup plus de variables dans l'équation qui peuvent être visible ou non. Cela peut donc causer une réaction, la variable A est la cause de E qui est la cause de B. La causalité ne peut donc pas être supposer

La recherche de causalité, implique l'étude de la relation de cause à effet entre deux variables. Cette recherche ne peut s'effectuer qu'en menant des expériences contrôlées.

Les Analyses en Composantes Principales :

Un exemple de réalisation d'une ACP réalisée porte sur bouleau. Ce choix a été fait car celui-ci est le taxon le plus étudié et est un bon indicateur du réchauffement climatique. Deux ACP ont été menées, une première pour analyser les variables météorologiques et le bouleau, et la seconde pour analyser les polluants et le bouleau.

Recherche de liens entre la météo et la concentration en bouleau

Choix du nombre d'axe

Pour choisir le nombre d'axe optimal, trois méthodes ont été utilisées. La méthode Kaiser, où l'on doit considérer tous les axes ayant une inertie supérieure à 100 divisé par le nombre de variable. La deuxième méthode consiste à ne garder que les axes ayant une p-value supérieur à 1. Et la dernière méthode est la méthode du coude qui consiste à repérer l'endroit où le pourcentage d'inertie diminue beaucoup plus lentement.

Dans ce cas, les deux premières méthodes nous indiquent trois composantes/axes à garder et la dernière les deux premiers axes. Nous allons donc garder les trois premières composantes. Ceux-ci expliqueront 66% de la variance.

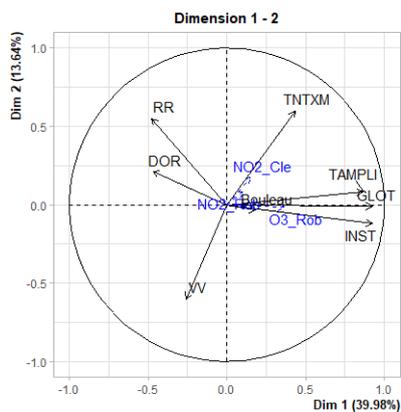
Caractérisation des axes

La seconde étape est la caractérisation des axes en utilisant les variables qui décrit l'axe, et donc des individus décrit par cet axe. Avec les cercles de corrélation se trouvant ci-dessous, un nom a été attribué à chaque axe :

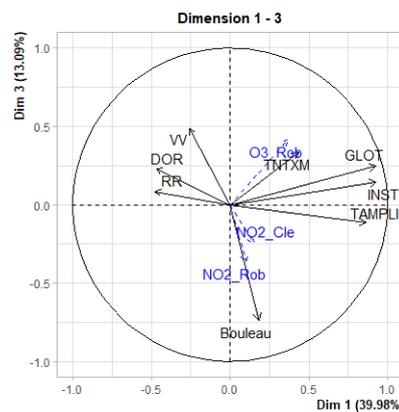
L'axe 1 est caractérisé par les variables TAMPLI (écart de température journalière), GLOT (rayonnement journalier) et INT (temps d'ensoleillement). Cet axe peut donc **décrire la couverture nuageuse** et donc le **temps en général**. En effet, il semble cohérent que l'ensoleillement, le rayonnement et l'écart de température soient corrélés entre eux pour décrire un temps découvert et donc du beau temps avec une opposition à RR qui est le niveau de précipitation.

L'axe 2 est caractérisé par TNTXM (température), RR (niveau de précipitation) représentant tous les deux l'axe en positif et VV (vitesse du vent) représentant l'axe en négatif. Il peut sembler contradictoire que TNTXM et RR soient présents tous deux dans le même sens, cependant après plusieurs recherches et examens des données, cet axe pourrait **décrire les jours avec un temps de mois de mai**. En effet lors de ce mois on constate une hausse des températures avec avril mais c'est aussi le quatrième mois le plus pluvieux de l'année derrière novembre, octobre et décembre. Cette situation étant causée par la remontée des premières masses d'aires chaudes subtropical et des dernières descentes d'air froides.

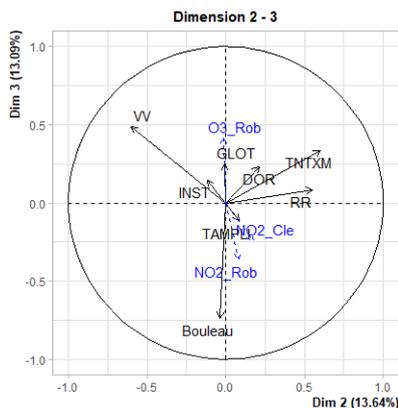
Pour finir, **l'axe 3** est caractérisé par le Bouleau et VV (vitesse du vent) dans deux sens opposés. Cet axe peut donc **caractériser la concentration en pollen** des individus.



Cercle de corrélation météo, dimension 1 - 2



Cercle de corrélation météo, dimension 1 - 3



Cercle de corrélation météo, dimension 2 - 3

Interprétation des résultats

On observe plusieurs corrélations négatives, c'est-à-dire des liens qui diminueraient les concentrations en bouleau. Ces variables étant :

- Le vent. Celui-ci bien que décrochant le pollen des arbres, emporterait loin de ville, est donc réduirait la concentration en bouleau. Cette corrélation est la plus visible de toute celle observées.

- La température. Cela pourrait être expliqué par le fait qu'au mois de mai, la température augmente, et aussi que ce mois indique la fin de la saison pollinique du bouleau.
- Les précipitations. En effet la pluie empêche le pollen de se libérer de la fleur, et alourdit le pollen déjà libéré dans l'air en le plaquant au sol. Cependant on constate que cette corrélation est très minime.

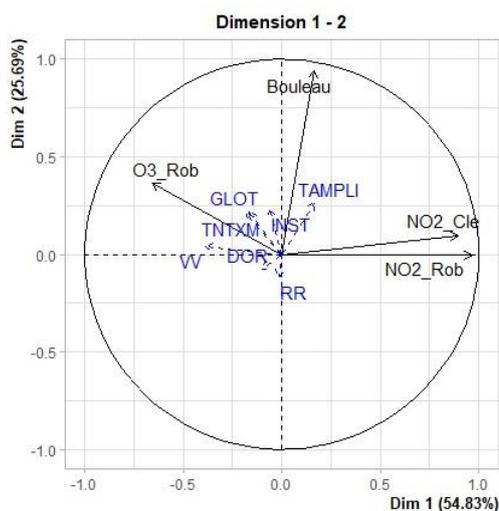
En observant les individus, cela a pu conforter les corrélations décrite ci-dessus.

En conclusion, sur les variables météo, on observe que le vent, la température et la pluie joue un rôle dans la diminution des concentrations en pollen. Cependant les résultats obtenus ne sont pas en adéquation avec les attentes et études scientifiques déjà existantes. En effet, il a été démontré que la pluie jouait un rôle important dans la diminution des concentrations polliniques, ce que je n'ai pas pu affirmer dans cette recherche. Après des recherches sur internet, depuis plusieurs années, on continue de constater une diminution des grains de pollen dans l'air lors d'épisodes de pluies, mais on constate un accroissement des fragments de pollen causé par les fortes précipitations. Cela pourrait donc expliquer cette corrélation assez faible.

Recherche de liens entre les polluants et la concentration en bouleau

Caractérisation des axes

Dans cet ACP, **l'axe 1** est **représenté par les polluants**, avec les polluants NO₂ se définissant tous deux dans le même sens et l'O₃, lui se voyant opposé aux deux premiers. Quant à **l'axe 2**, celui-ci **caractérise les concentrations en bouleau**.



Interprétation des résultats

On n'observe aucun lien entre les concentrations en bouleau et les concentrations des polluants NO₂ et O₃.

Conclusion de l'ACP :

On a pu mettre en évidence des liens possibles entre les concentrations en bouleau observé, et certains facteurs météorologique. En effet, on a pu observer que le vent avait tendance à diminuer les concentrations en pollen. De même pour les températures qui peuvent indiquer la fin de la saison pollinique, ainsi qu'une très légère corrélation négative pour la pluie. Cependant, nous n'avons pas pu mettre en évidence des liens possibles entre concentration en pollen et concentration en polluant.



AIR • CLIMAT • ÉNERGIE • SANTÉ

NOTRE SIÈGE

5 rue de Madrid
67300 Schiltigheim
03 69 24 73 73
contact@atmo-grandest.eu

NOS AGENCES

à Metz
20 rue Pierre-Simon de Laplace
57070 Metz

à Nancy
20 allée de Longchamp
54600 Villers-lès-Nancy

à Reims
9 rue Marie-Marvingt
51100 Reims