



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



Revue générale

Pollen et changement climatique. Bouleau et graminées en France métropolitaine

Pollen and climate change. Birch and grasses in metropolitan France

J.-P. Besancenot*, C. Sindt, M. Thibaudon

Réseau national de surveillance aérobiologique, 11, chemin de la Creuzille, 69690 Brussieu, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 30 septembre 2019

Accepté le 30 septembre 2019

Disponible sur Internet le xxx

Mots clés :

Aérobiologie

Changement climatique

Réchauffement climatique

Phénologie

Pollen

Tendance

Saison pollinique

France

RÉSUMÉ

C'est devenu une évidence que le climat change et que cela peut affecter la santé humaine. En particulier, on s'attend à ce que le réchauffement climatique se répercute sur la pollinisation et augmente l'occurrence des allergies respiratoires. Cette étude a été réalisée sur 6 ou 7 sites français de surveillance aérobiologique, avec l'objectif de détecter d'éventuelles modifications survenues durant les 24 à 32 dernières années dans la chronologie, la durée et l'intensité des saisons polliniques de deux taxons très allergisants, le bouleau et les graminées. Les résultats les plus probants ont été obtenus pour *Betula*. D'une part, le début de la saison pollinique de cet arbre a connu jusqu'aux alentours de 2002 une avance de 0,02 à 0,69 jour/an, après quoi la tendance s'est inversée, au point que la pollinisation démarre maintenant aussi tard, voire plus tard qu'il y a trente ans ; l'explication la plus plausible est que des hivers plus doux retardent la levée de dormance et annulent l'avance de la phénologie printanière provoquée par des printemps plus chauds. D'autre part, tous les sites étudiés ont présenté une forte hausse de la quantité de pollen émise, positivement corrélée à la température de la période allant de juillet (année N_{-1}) à juin de l'année N . Pour les *Poaceae*, les résultats sont souvent contradictoires d'un endroit à l'autre. Ils ont néanmoins révélé une tendance presque partout décroissante pour les concentrations polliniques. En conclusion, l'accent est mis sur les divergences qui existent entre les effets déjà observés en France sur les saisons polliniques et le discours dominant sur la réponse de la pollinisation au changement climatique.

© 2019 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

Keywords:

Aerobiology

Climate change

Climate warming

Phenology

Pollen

Trend

Pollen season

France

There is now evidence that the climate is changing. This trend has the potential to affect human health. In particular, global warming is expected to alter pollination and increase the incidence of allergic airway diseases. The present study was conducted at 6 or 7 sampling sites in metropolitan France with the aim of detecting possible shifts over the last 24 to 32 years in the timing, duration, and intensity of the pollen seasons of two very allergenic taxa, birch and grasses. The most convincing results were obtained for *Betula*. On the one hand, the beginning of the birch pollen season advanced by 0.02 to 0.69 days/year until about 2002, after which this trend reversed, in such a way that the pollination period now starts as late as it did thirty years ago, if not later; the most likely explanation is that milder winters delay dormancy release and nullify the advance of spring phenology induced by warmer spring weather. On the other hand, all the sites studied showed major increases in the quantity of pollen released, which is positively correlated with the temperature of the twelve months from July (year N_{-1}) to June (year N). Although the results for *Poaceae* are often inconsistent from one monitoring station to another, they nevertheless revealed almost universal downward trends in airborne pollen concentrations, as confirmed by negative correlation coefficients with the annual temperature. In conclusion, the most salient finding concerns the wide discrepancy between the effects on the pollen seasons already observed in France and the mainstream narrative concerning pollen response to climate change.

© 2019 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : jeanpierre.besancenot@orange.fr (J.-P. Besancenot), charlotte.sindt@rnsa.fr (C. Sindt), michel.thibaudon@wanadoo.fr (M. Thibaudon).

1. Introduction

Mis en doute dans son existence même il y a encore quelques années, le changement climatique d'origine anthropique est devenu, au fil du temps, une réalité irrécusable [1,2] qui, avec ses conséquences potentielles sur la vie et les organisations humaines, fascine et angoisse [3]. Parmi toutes les répercussions redoutées sur la santé [4,5], les allergies au pollen ont la double particularité d'être celles qui risquent de toucher le plus grand nombre d'individus à la surface du globe et celles qui sont d'ores et déjà les plus perceptibles [6,7] : les premiers impacts auraient été décelables dès le milieu des années 1990, et ils vont désormais en s'accroissant.

Depuis l'article pionnier mais purement spéculatif de Wilkinson en 1989 [8], la question du lien entre changement climatique et pollen, d'un point de vue général [9–19] ou dans un cadre géographique circonscrit [20–31], a suscité une littérature scientifique extrêmement abondante, quoique parfois quelque peu répétitive. Un certain consensus s'est ainsi dessiné autour de sept points principaux :

- le réchauffement global entraîne une floraison plus précoce [32,33], notamment chez les plantes fleurissant en fin d'hiver ou au début du printemps. Pour chaque degré Celsius d'élévation de la température du trimestre janvier-mars, la date d'apparition des premiers pollens avancerait alors en moyenne de quatre à cinq jours, sur l'ensemble de l'hémisphère boréal [34]. Au Royaume-Uni, le dépouillement de plus 395 000 dates de début de floraison, concernant 405 espèces végétales, a révélé pour le quart de siècle 1984–2008, en comparaison de toutes les périodes antérieures depuis 1760, une avance comprise entre 2,2 et 12,7 jours [35]. Plus précisément, de 1982 à 2011, Fu et al. ont mis en évidence une précocité accrue d'environ deux semaines, en Europe occidentale et en Europe centrale, pour plusieurs arbres dont *Betula pendula*, *Corylus avellana* et *Fraxinus excelsior* [36] ;
- avec des exceptions, notamment les Cupressacées et certaines herbacées, le changement climatique tend à allonger la saison pollinique [32,33]. Ainsi, en moyenne européenne, et toutes espèces confondues, le début de la floraison aurait avancé de 6,0 jours au cours du dernier demi-siècle, la fin de la floraison étant retardée de 4,8 jours, ce qui situe à 10,8 jours l'allongement moyen de la période exposant à des allergies polliniques [37] ;
- même s'il y a là aussi des exceptions comme l'armoise [38], et s'il est difficile de faire la part de ce qui revient au changement climatique et de ce qui doit être attribué aux modifications de l'occupation du sol ou à la pollution environnementale, les quantités de pollen émises par les plantes et, par suite, les concentrations de grains de pollen dans l'air extérieur évoluent le plus souvent à la hausse [39]. L'augmentation est généralement plus forte pour la somme des concentrations journalières (ou intégrale pollinique annuelle [40]) que pour la valeur des principaux pics [41]. En revanche, la question reste débattue de savoir s'il y a accroissement de la productivité pollinique par inflorescence ou augmentation du nombre d'inflorescences par plante [15] ;
- le changement climatique accroît également le contenu allergénique des grains de pollen [42]. À ce jour les études ont concerné presque exclusivement le bouleau [43,44] et l'ambrosie [45], mais leurs conclusions ont souvent été étendues à d'autres taxons, voire à tous les taxons ;
- ces différentes tendances se conjuguent finalement pour renforcer l'occurrence et la sévérité des allergies respiratoires, rhinite ou asthme [46–48], sans que l'on soit encore en mesure d'évaluer la responsabilité du climat dans l'inquiétante augmentation de la prévalence des pollinoses, qui est à l'évidence un phénomène multifactoriel ;

- en outre, et même si le temps de réponse de la végétation est lent, pour les arbres plus encore que pour les herbacées, une hausse des températures peut aussi amener le déplacement en latitude ou en altitude de l'aire de répartition de différentes plantes, dont certaines fortement allergisantes [49], et induire une nouvelle géographie des pollens. Lorsque, dans les plus robustes des modèles simulant la réaction des principaux écosystèmes aux changements climatiques, on remplace les variables climatiques actuelles par celles annoncées pour le milieu ou la fin du XXI^e siècle, on obtient des cartes de l'état de la végétation dans 30 ou 80 ans, selon que la température moyenne aura augmenté de 1, 3 ou 6 °C. Les simulations ainsi réalisées attirent l'attention sur une évolution saisissante de la distribution potentielle de certaines espèces avec, pour la France, une progression d'ensemble vers le nord des composantes méridionales, au détriment des influences océaniques, continentales et montagnardes [13,14,50] ;
- enfin, et malgré l'effet antagoniste de l'ozone (qui abaisse par exemple le contenu en allergène Phl p 5 des grains de pollen de fléole des prés), des teneurs atmosphériques croissantes en CO₂ sont susceptibles d'aggraver la prévalence des pollinoses [51], en déterminant une plus grande précocité du début et du pic principal de la pollinisation, en augmentant de 50 à 200 % la production pollinique de certaines fleurs et en renforçant l'allergénicité des pollens [45,52,53].

Les grandes lignes du tableau ainsi brossé ne sauraient être mises en doute, mais Beggs [21] a opportunément attiré l'attention sur le fait que la plupart des publications disponibles sont, soit de vastes synthèses à caractère plus ou moins planétaire, qui doivent davantage à la réflexion et aux déductions qu'à l'observation, soit des travaux a priori plus pertinents réalisés à échelle fine, mais qui résistent rarement à la tentation de généraliser à un grand nombre d'espèces ce qui a été vérifié uniquement pour l'une d'entre elles ou d'extrapoler tel ou tel résultat obtenu à des centaines ou des milliers de kilomètres de là. C'est pourquoi le présent article s'est fixé pour ambition de procéder à l'analyse la plus objective possible d'un nombre très réduit de séries de données aéropolliniques dûment validées, provenant d'un même pays et limitées aux deux principaux taxons allergisants largement représentés sur la majeure partie du territoire national. L'impact direct du changement climatique sur le pollen a en outre été complété par une estimation du risque allergique correspondant.

2. Données et méthodes

2.1. Domaine d'étude et taxons retenus

L'étude porte sur la France métropolitaine, où sept sites du Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) ont été sélectionnés pour leur représentativité spatiale, et plus spécialement climatique, pour l'ancienneté des séries aéropolliniques exploitables (qui débutent entre 1987 et 1989 dans six des sites retenus, et en 1995 à Toulon) et pour leur qualité (avec moins de 5 % de données journalières manquantes, jusqu'en 2018). Il s'agit (Fig. 1 et Tableau 1) d'Amiens, de Montluçon et de Paris (qui représentent différentes nuances du climat océanique dégradé), de Strasbourg (en climat semi-continentale), de Lyon (en climat mi-océanique mi-continentale, fortement marqué par sa position d'abri), de Toulouse (dans un climat océanique de transition, subtilement coupé avec du méditerranéen et du continental) et de Toulon (en climat méditerranéen pur).

Ont été retenus les deux taxons polliniques les plus souvent impliqués en France à l'origine de sensibilisations, chez les patients monosensibilisés comme chez les polysensibilisés [54,55],

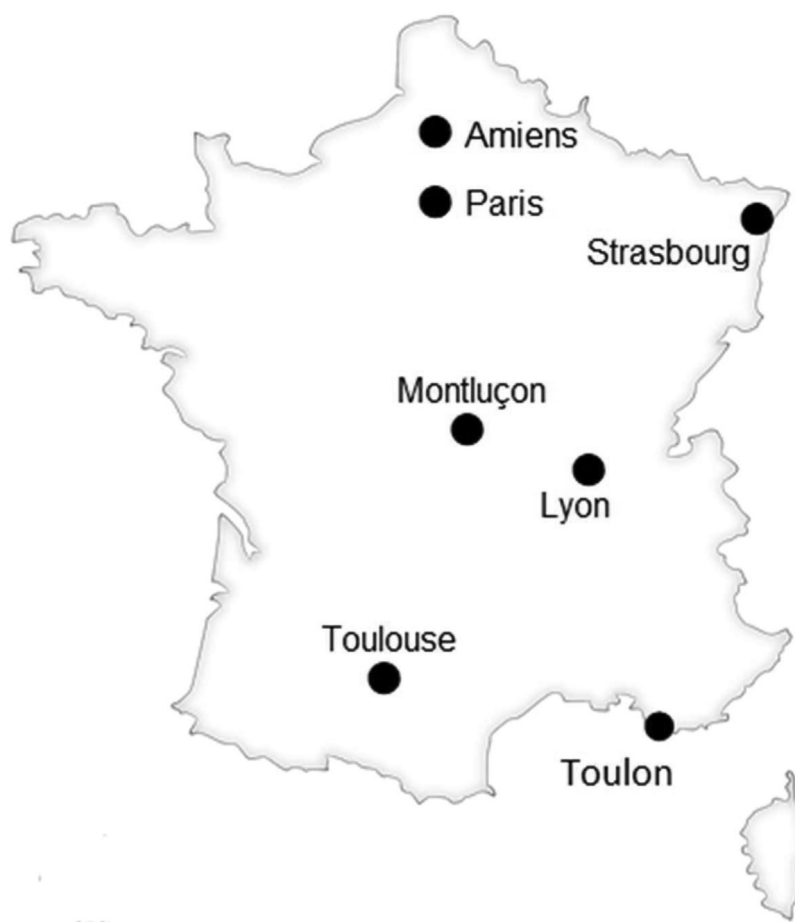


Fig. 1. Localisation des sites étudiés.

Tableau 1
Sites étudiés.

Ville	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Années étudiées	Journées manquantes (%)
Amiens	49° 90' N	02° 30' E	33	1987–2018	0,58
Lyon	45° 73' N	04° 82' E	173	1987–2018	1,45
Montluçon	46° 34' N	02° 61' E	219	1989–2018	0,32
Paris	48° 84' N	02° 31' E	53	1987–2018	2,95
Strasbourg	48° 58' N	07° 75' E	142	1988–2018	4,91*
Toulouse	43° 56' N	01° 45' E	235	1989–2018	2,43
Toulon	43° 07' N	05° 58' E	66	1995–2018	4,11

Source : Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA). *: Le pourcentage de Strasbourg, plus élevé que dans les autres villes, provient essentiellement de l'année 1997 (avec près de 21 % de données manquantes).

en l'occurrence les Poacées (*Poaceae*) dans tous les sites et le bouleau (*Betula*) dans tous les sites sauf Toulon, où cette espèce est très peu présente. Les Cupressacées (*Cupressaceae*) auraient pu être ajoutées, mais elles ne sont que modérément allergisantes hors du Midi méditerranéen ; de surcroît, la microscopie optique ne permet pas de les différencier des Taxacées, et il est souvent délicat de délimiter leur saison pollinique qui s'étale sur une grande partie de l'année.

2.2. Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées proviennent des stations de Météo France les plus proches des capteurs de pollen retenus, en l'occurrence Dury pour Amiens, Domérat-Villars pour Montluçon, Montsouris pour Paris, Entzheim pour Strasbourg, Bron pour Lyon, Blagnac pour Toulouse et La Mitre pour Toulon, les lacunes de La

Mitre étant comblées par les données du Baou. La distance séparant la station météorologique du capteur ne dépasse nulle part 10,5 km.

Le paramètre retenu est la température moyenne sur un intervalle de temps de 12 mois. L'année civile (janvier–décembre) a été utilisée pour les Poacées, qui sont en majorité des plantes annuelles effectuant leur cycle complet entre le début et la fin d'une même année. Au contraire, pour le bouleau qui est pérenne, et dont le développement au cours de l'année x est très influencé par le temps qu'il a fait durant le second semestre de l'année précédente [56], a été préféré l'intervalle allant du 1^{er} juillet de l'année x_{-1} au 30 juin de l'année x .

2.3. Données aérobiologiques

Chacun des sites retenus est équipé d'un capteur volumétrique de type Hirst [57], de marque Burkard ou Lanzoni, positionné en situation de fond sur un toit d'immeuble, en pleine

agglomération. On rappellera simplement [58,59] que, grâce à une buse d'aspiration orientée en permanence face au vent, ces capteurs aspirent en continu 10 L d'air par minute, soit l'équivalent d'une respiration humaine moyenne. Les particules de toute nature contenues dans l'air sont impactées sur une bande adhésive transparente, qui défile devant la buse grâce à un mouvement d'horlogerie. Au centre d'analyse, la bande est découpée en segments correspondant chacun à 24 h d'impaction et, après coloration, les grains de pollen sont dénombrés et identifiés par microscopie optique avec un grossissement $\times 400$. Les résultats sont exprimés en nombre de grains par mètre cube d'air et par jour.

2.4. Analyse et traitement des données

Pour les données aérobiologiques ont été successivement calculées :

- la *date de début de pollinisation* (DDP) déterminée en valeur relative [60], selon le critère de l'European Aeroallergen Network (EAN), comme le jour où l'on atteint 2,5 % du recueil total annuel d'un taxon donné [61] ;
- la *date de fin de pollinisation* (DFP), définie symétriquement à la DDP comme le jour où l'on atteint 97,5 % du recueil total annuel de ce taxon.
- la *durée de la saison pollinique*, en nombre de jours, égale à la différence DFP – DDP ;
- l'*intégrale pollinique annuelle* (Annual Pollen Integral, API_n [40]), équivalent à la somme des concentrations polliniques journalières, exprimée en grains/m³ ;
- le *nombre de jours à risque allergique* (théorique) égal ou supérieur à 3 dans l'échelle de 0 (risque nul) à 5 (risque très élevé) mise au point par le RNSA [62] à partir des concentrations polliniques journalières, avec des seuils propres à chaque taxon et différents de part et d'autre d'une ligne Bordeaux-Grenoble.

L'analyse des séries chronologiques de chacun des paramètres météorologiques ou aérobiologiques retenus a reposé en priorité sur une représentation graphique portant en abscisse le temps et en ordonnée le paramètre considéré. L'observation des courbes a alors permis de préciser si la série était stationnaire ou organisée. Dans ce dernier cas la composante tendancielle ou *trend*, a été ajustée par une fonction, linéaire ou non. La fonction linéaire a toujours été privilégiée, mais une fonction polynomiale d'ordre 2 lui a été préférée quand elle améliorait significativement ($p < 0,05$) le coefficient de détermination R^2 . Le *trend* a alors été caractérisé par le taux de croissance ou de décroissance moyen annuel, calculé sur l'ensemble de la série en cas de tendance monotone, ou sur des fragments de celle-ci lorsque la tendance épousait une forme non linéaire ou que la période étudiée comportait une succession de tendances ; un intérêt particulier a dans ce cas été porté à la détermination du point de discontinuité entre deux tendances [63].

Enfin, deux démarches ont été entreprises simultanément pour atténuer les variations résiduelles aléatoires et d'éventuelles variations périodiques (comme celle liée à un rythme bisannuel de la pollinisation, évoqué dans le cas du bouleau), tout en conservant les grandes tendances :

- d'une part, les courbes individuelles de chaque site ont été complétées par la construction de courbes moyennes pour les 6 ou 7 sites étudiés ;
- d'autre part, ont été calculées des moyennes mobiles sur quatre ans, non centrées, en acceptant la perte de trois années au début de la courbe.

Les séries ainsi lissées ont ensuite été traitées comme les séries brutes. Toutefois, afin d'éviter une artificialisation excessive, cette démarche n'a été réalisée que dans le cas où la majorité des sites présentaient des tendances de même signe et d'intensité pas trop différente.

Seuls ont été reproduits ici quelques exemples des courbes les plus explicites, les autres résultats étant synthétisés sur des tableaux.

3. Résultats

3.1. Température

Les moyennes mobiles de la température moyenne annuelle montrent une tendance nette à la hausse, proche de 0,05 °C/an sur l'année civile (Fig. 2A) et de 0,03 °C/an sur la période juillet–juin (Fig. 2B). À lui seul, le millésime rend compte de 63 à 76 % de la variabilité thermique.

3.2. Bouleau

La représentation graphique des principales caractéristiques de la pollinisation de *Betula* fait ressortir des différences non négligeables d'un site à l'autre, mais n'en permet pas moins d'identifier presque toujours une tendance dominante.

C'est pour la DDP que l'homogénéité est la plus grande (Tableau 2A). En dehors de Montluçon, où le démarrage de la pollinisation présente un retard moyen de 0,2 jour/an sur les trente années étudiées, les courbes se décomposent partout en deux sous-périodes : une phase d'avance progressive jusqu'en 2002 (ou 1997 à Toulouse), puis une phase de retard graduel qui se poursuit à ce jour. La résultante de ces deux tendances opposées est que la DDP est sensiblement revenue aujourd'hui à sa date de la fin des années 1980 (Amiens), ou qu'elle se produit même de 3,5 à 9 jours plus tard (Strasbourg, Lyon, Paris, Toulouse). Dans la capitale, par exemple (Fig. 3), le retard de 16 jours observé entre 2003 et 2018 a plus qu'annulé l'avancée de 11 jours qui avait caractérisé la période 1987–2002.

Pour la DFP (Tableau 2B), les dates actuelles sont partout de 2 à 7,5 jours plus précoces qu'elles ne l'étaient au début de la période d'étude, soit que l'on ait affaire à une tendance linéaire tout au long de la trentaine d'années prises en compte (à Strasbourg, comme le montre la Fig. 4, et à Toulouse), soit qu'à une phase de faible retard ait succédé une phase de plus forte avancée.

La saison pollinique démarrant plus tard et se terminant plus tôt, sa durée (Tableau 2C) tend logiquement à diminuer à peu près partout, de 5,5 jours (Amiens) à 17 jours (Toulouse) –sauf à Lyon où elle s'est allongée de 2 jours. Mais selon les cas, la tendance a été uniforme comme à Montluçon (Fig. 5A), avec une réduction de 11 jours ou scindée en deux phases opposées comme à Paris (Fig. 5B), avec un allongement de 15 jours entre 1987 et 2002, suivi d'un raccourcissement de près de 25 jours entre 2003 et 2018.

Les API_n ont partout évolué à la hausse, avec une tendance quasi linéaire et un taux moyen annuel de progression compris entre 21 et 126 grains/m³ (Tableau 2D). La seule exception relative vient de Toulouse, aux limites de l'aire du bouleau, où l'intégrale pollinique annuelle s'est accrue de 39 grains/m³/an jusqu'en 2002, avant de redescendre de 34 grains/m³/an pour revenir sensiblement aux valeurs initiales. Ce haut degré d'homologie a permis, avec l'utilisation de moyennes mobiles sur quatre ans, de construire une courbe unique pour les six sites retenus (Fig. 6). On y constate une augmentation moyenne d'environ 32 grains/m³/an. Inspirée des travaux de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) [64], la comparaison avec la moyenne

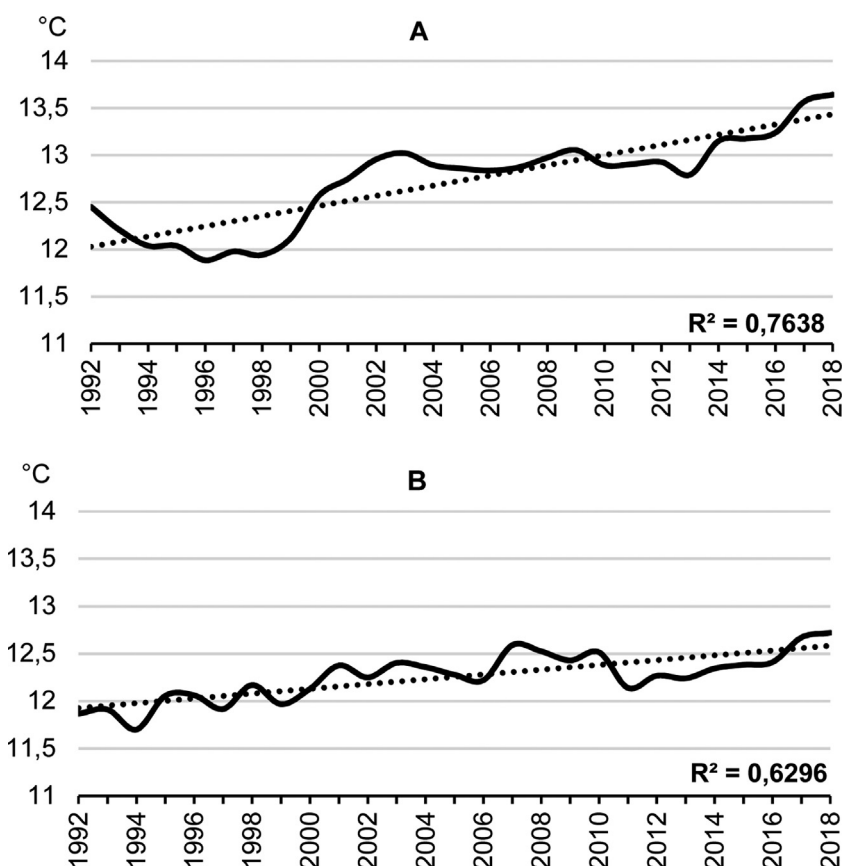


Fig. 2. Moyennes mobiles sur quatre ans des températures moyennes annuelles (A : de janvier à décembre ; B : de juillet à juin) pour l'ensemble des sites retenus.

Tableau 2

Dates de début (DDP) et de fin (DFP) de pollinisation, durée de pollinisation et intégrale pollinique annuelle (API_n) du bouleau, sur la période disponible.

Ville	A) DDP		B) DFP	
	R ²	Taux d'évolution (jours/an) *	R ²	Taux d'évolution (jours/an) *
Amiens	0,02	1987–2002 : –0,19 2003–2018 : +0,19	0,08	1987–2002 : +0,19 2003–2018 : –0,31
Lyon	0,06	1987–2002 : –0,25 2003–2018 : +0,47	0,09	1987–2002 : +0,25 2003–2018 : –0,49
Montluçon	0,08	1989–2018 : +0,23	0,09	1989–2002 : +0,31 2003–2018 : –0,50
Paris	0,19	1987–2002 : –0,69 2003–2018 : +1,00	0,05	1987–1999 : +0,92 2000–2018 : –0,94
Strasbourg	0,03	1988–2002 : –0,07 2003–2018 : +0,28	0,08	1988–2018 : –0,24
Toulouse	0,12	1989–1997 : –0,02 1998–2018 : +0,45	0,04	1989–2018 : –0,20

Ville	C) Durée de pollinisation		D) API _n	
	R ²	Taux d'évolution (jours/an) **	R ²	Taux d'évolution (grains/m3/an) **
Amiens	0,09	1987–1999 : +0,24 2000–2018 : –0,45	0,16	1987–2018 : +126,34
Lyon	0,18	1987–2002 : +0,96 2003–2018 : –0,81	0,06	1987–2018 : +20,94
Montluçon	0,15	1989–2018 : –0,37	0,20	1989–2018 : +85,30
Paris	0,19	1987–2002 : +0,94 2003–2018 : –1,56	0,03	1987–2018 : +31,25
Strasbourg	0,12	1988–1999 : +0,17 2000–2018 : –0,92	0,06	1988–2018 : +57,39
Toulouse	0,12	1989–2018 : –0,57	0,19	1989–2002 : +39,29 2003–2018 : –33,70

* Les résultats négatifs correspondent à une avance, les résultats positifs à un retard.

** Les résultats négatifs correspondent à une diminution, les résultats positifs à une augmentation.

mobile sur quatre ans de la température de la période juillet–juin révèle une grande similitude d'évolution, attestée par un coefficient de corrélation linéaire de 0,57 ($p < 0,01$).

Enfin, hormis Toulouse où il est resté stationnaire, et de surcroît quasi nul, le nombre de jours à $RA \geq 3$ a partout progressé de façon linéaire (Tableau 3), de 3 à près de 11 jours, respectivement à Strasbourg et Montluçon. Lyon (Fig. 7) illustre bien cette évolution avec, entre 1987 et 2018, une dizaine de jours supplémentaires à risque moyen ou fort.

3.3. Poacées

Les Poacées réservent, d'un site à l'autre, des schémas souvent beaucoup plus contrastés, qui rendent illusoire toute tentative de généralisation.

Tel est déjà le cas (Tableau 4A) pour la DDP, retardée en moyenne de 6 jours à Amiens, stationnaire à Toulouse et avancée partout ailleurs, de 6,5 jours (Montluçon) à 13 jours (Paris et Lyon). La juxtaposition des courbes de Lyon (Fig. 8A) et d'Amiens (Fig. 8B), établies

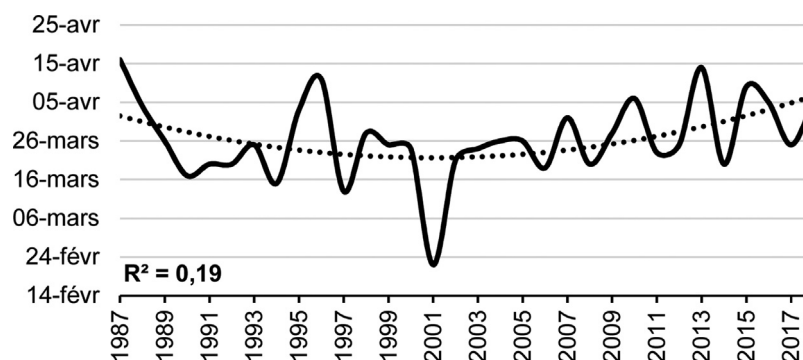


Fig. 3. Évolution de la date de début de pollinisation (DDP) du bouleau. Exemple de Paris.

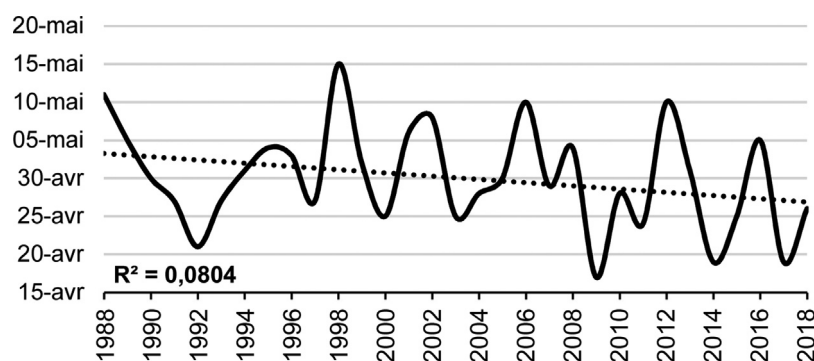


Fig. 4. Évolution de la date de fin de pollinisation (DFP) du bouleau. Exemple de Strasbourg.

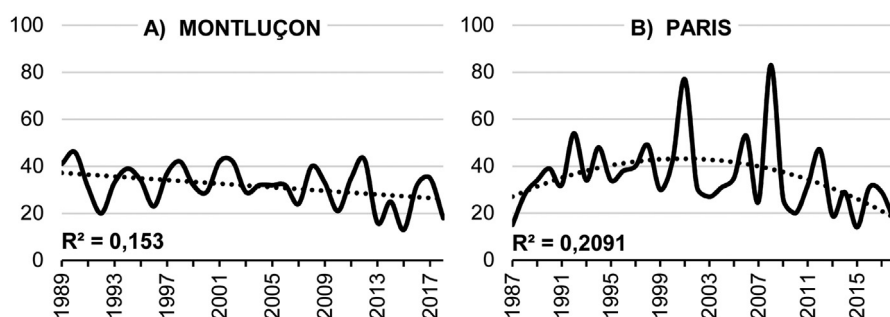


Fig. 5. Évolution de la durée de pollinisation du bouleau (nombres de jours). Exemples de Montluçon et de Paris.

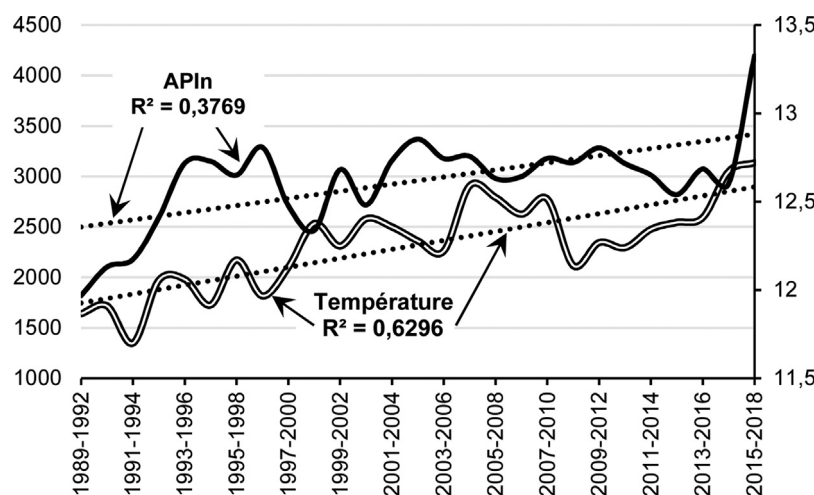


Fig. 6. Évolution de l'intégrale pollinique annuelle (APIn) du bouleau. Moyenne mobile sur quatre ans des six sites retenus (échelle de gauche, en nombre de grains par mètre cube d'air), et comparaison avec la moyenne mobile sur quatre ans de la température moyenne de la période juillet-juin (échelle de droite, en °C).

Tableau 3Nombre de jours à risque allergique RA ≥ 3 pour le bouleau, sur la période disponible.

Ville	R ²	Jours à RA ≥ 3
		Taux d'évolution (jours/an) *
Amiens	0,14	1987–2018 : +0,15
Lyon	0,44	1987–2018 : +0,32
Montluçon	0,43	1989–2018 : +0,36
Paris	0,20	1987–2018 : +0,19
Strasbourg	0,02	1988–2018 : +0,10
Toulouse	0	1989–2018 : 0

* Les résultats négatifs correspondent à une diminution, les résultats positifs à une augmentation.

à la même échelle, témoigne de l'impossibilité de dégager une tendance unique. De plus, si les autres sites suivent une évolution linéaire, Toulon a d'abord connu un début de pollinisation de plus en plus tardif (de 0,63 jours/an), avant d'enregistrer une avancée record de près d'un jour par an, à partir de 2003.

La DFP présente une physiologie assez voisine (Tableau 4B). La saison des Poacées a pris fin de plus en plus tôt à Amiens (avance de 7 à 8 jours en 32 ans) (Fig. 9), n'a quasiment pas varié à Paris ou Montluçon, et a été retardée de 2,7 jours à Toulouse, de 9 à Lyon et de 13 à Strasbourg. De plus, comme pour la DDP, Toulon s'oppose à tous les autres sites caractérisés par des tendances linéaires : la DFP y a enregistré une précocité accrue de 0,31 jour/an jusqu'en 2002, puis un retard moyen de 0,44 jour/an sur les 16 années suivantes.

La durée de la saison pollinique (Tableau 4 C) ne permet pas davantage de déceler de tendance commune. Si elle est demeurée stable à Toulouse, elle a été réduite sur la période d'étude, de 4 jours à Strasbourg à plus de 13 à Amiens (Fig. 10A), mais a été allongée ailleurs, d'une quinzaine de jours à Toulon depuis 1995 (Fig. 10B) et surtout de 28 jours à Lyon depuis 1987.

Quant à l'APIn (Tableau 4D), globalement en baisse sauf à Lyon, elle a suivi une tendance linéaire sur toute la série à Toulon (9 jours/an) et à Strasbourg (15 jours/an), mais a été marquée dans les autres sites par une phase initiale d'augmentation, jusqu'en 2002 le plus souvent mais seulement jusqu'en 1999 à Paris. Le schéma de Toulouse (Fig. 11) peut être considéré comme assez représentatif. La confrontation des moyennes mobiles sur quatre ans des APIn et des températures de l'année civile, avec une courbe unique pour les sept sites retenus (Fig. 12), indique clairement que, plus la température s'élève, plus la concentration atmosphérique en pollen de Poacées diminue, ce que confirme un coefficient de corrélation linéaire de $-0,47$ ($p < 0,02$). La diminution moyenne de l'intégrale pollinique annuelle s'établit aux environs de 45 grains/m³/an, soit 860 grains/m³ par degré Celsius de réchauffement.

En dernier lieu, le nombre de jours à RA ≥ 3 (Tableau 5) montre là encore des situations très contrastées, entre des sites présentant des tendances linéaires à la baisse (Paris, Toulon, Strasbourg) et

d'autres faisant se succéder une phase de hausse jusqu'en 2002 et une phase de baisse ensuite. Au final, sur toute la période, le nombre de jours concernés augmente à Amiens et à Lyon, mais diminue partout ailleurs, les plus fortes baisses (9 à 10 jours) étant enregistrées à Strasbourg (Fig. 13A) et à Toulouse (Fig. 13B).

4. Discussion

4.1. Température

La hausse des températures mise en évidence depuis le début de la période d'étude est en bon accord avec ce que l'on sait par ailleurs du réchauffement climatique contemporain. Entre beaucoup d'autres, Blanchet fait état pour les trente dernières années d'une élévation de 0,2 à 0,3 °C par décennie [65], ce qui est très proche du chiffre « proche de 0,3 °C » donné ci-dessus pour les périodes juillet-juin successives—ce qui conforte la représentativité des six sites retenus.

Le chiffre plus élevé obtenu pour l'année civile provient, pour l'essentiel, de l'intégration d'une station méditerranéenne (Toulon) dans les calculs.

4.2. Bouleau

Telles qu'elles ont été décrites dans nos six sites, les différentes caractéristiques de la pollinisation du bouleau apparaissent, selon les cas, exactement conformes ou strictement opposées à ce que prétend le discours dominant.

C'est pour la DDP que la distorsion s'avère la plus flagrante avec la thèse défendue par quantité d'auteurs [26,32,33,41,66–72], y compris en France [73], d'un démarrage de plus en plus précoce de la pollinisation. Mais ces publications, presque toutes antérieures à 2010, ne pouvaient guère détecter l'inversion de tendance que l'on a décrite ici à partir de 2003 ; même certaines études récentes n'analysent d'ailleurs que des séries s'arrêtant en 2004 [74] ou, au contraire, débutant en 2003–2004 [75,76]. En tout cas, l'avance progressive dont font état les plus anciens de ces travaux (14 jours en moyenne entre 1977 et 2000 selon Rasmussen [69]) correspond bien à ce que l'on a observé jusqu'en 2002 dans cinq des six sites étudiés. Le réchauffement graduel des fins d'hiver et des débuts de printemps accélérera alors la croissance végétative jusqu'à l'éclosion des bourgeons floraux et suffira à rendre compte de l'arrivée des premiers pollens de plus en plus tôt.

La physiologie végétale permet de comprendre pourquoi les choses ont ensuite changé. On connaît en effet les différentes phases phénologiques des espèces ligneuses pérennes, et notamment des arbres à chatons, avec successivement le débourrement, la feuillaison, la floraison (l'ordre de ces deux derniers stades pouvant être inversé), la fructification, la coloration des feuilles et leur chute, puis la dormance qui est une période de « repos », une forme de

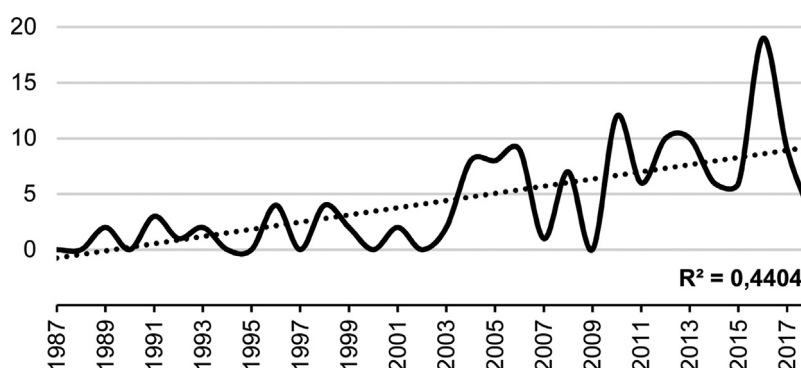


Fig. 7. Évolution du nombre de jours à risque allergique (RA) d'exposition au pollen de bouleau ≥ 3 sur une échelle de 0 à 5. Exemple de Lyon.

Tableau 4

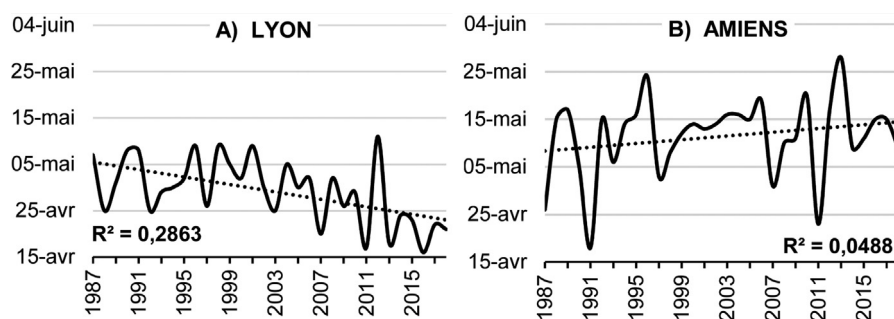
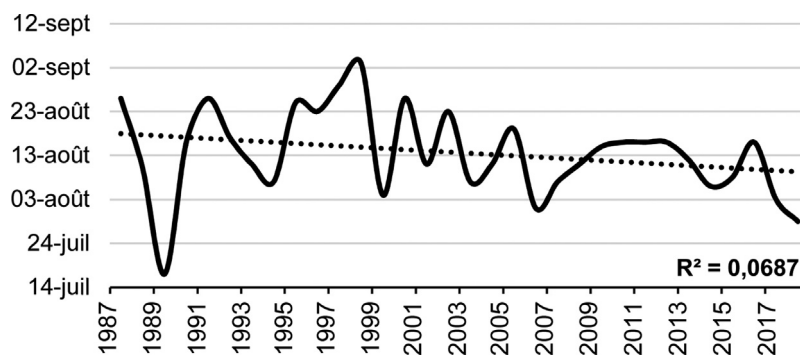
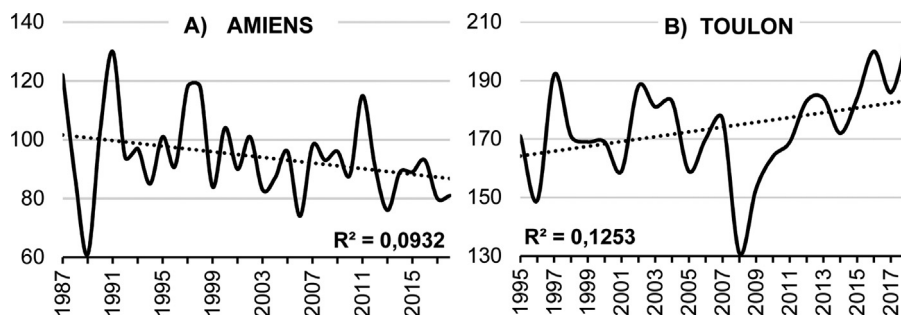
Dates de début (DDP) et de fin (DFP) de pollinisation, durée de pollinisation et intégrale pollinique annuelle (APIn) des Poacées, sur la période disponible.

Ville	A) DDP		B) DFP	
	R ²	Taux d'évolution (jours/an)*	R ²	Taux d'évolution (jours/an)*
Amiens	0,05	1987–2018 : +0,19	0,07	1987–2018 : –0,24
Lyon	0,29	1987–2018 : –0,41	0,14	1987–2018 : +0,28
Montluçon	0,08	1989–2018 : –0,22	0	1989–2018 : 0
Paris	0,21	1987–2018 : –0,41	0	1987–2018 : 0
Strasbourg	0,11	1988–2018 : –0,29	0,13	1988–2018 : –0,42
Toulouse	0,001	1989–2018 : 0	0,002	1989–2018 : –0,09
Toulon	0,21	1995–2002 : +0,63 2003–2018 : –0,97	0,14	1995–2002 : –0,31 2003–2018 : +0,44

Ville	C) Durée de pollinisation		D) APIn	
	R ²	Taux d'évolution (jours/an) *	R ²	Taux d'évolution (grains/m ³ /an) **
Amiens	0,09	1987–2018 : –0,42	0,17	1987–2002 : +85,63 2003–2018 : –90,62
Lyon	0,28	1987–2018 : +0,88	0,32	1987–2002 : +220,38 2003–2018 : –171,94
Montluçon	0,04	1989–2018 : +0,19	0,32	1989–2002 : +335,71 2003–2018 : –402,15
Paris	0,11	1987–2018 : +0,37	0,18	1987–1999 : +30,15 2000–2018 : –85,26
Strasbourg	0,08	1988–2002 : +0,57 2003–2018 : –0,81	0,03	1988–2018 : –15,16
Toulouse	0,01	1989–2018 : 0	0,33	1989–2002 : +133,93 2003–2018 : –196,56
Toulon	0,13	1995–2018 : +0,62	0,02	1995–2018 : –9,17

* Les résultats négatifs correspondent à une avance, les résultats positifs à un retard.

** Les résultats négatifs correspondent à une diminution, les résultats positifs à une augmentation.

**Fig. 8.** Évolution de la date de début de pollinisation (DDP) des Poacées. Exemples de Lyon et d'Amiens.**Fig. 9.** Évolution de la date de fin de pollinisation (DFP) des Poacées. Exemple d'Amiens.**Fig. 10.** Évolution de la durée de pollinisation des Poacées. Exemples opposés d'Amiens et de Toulon.

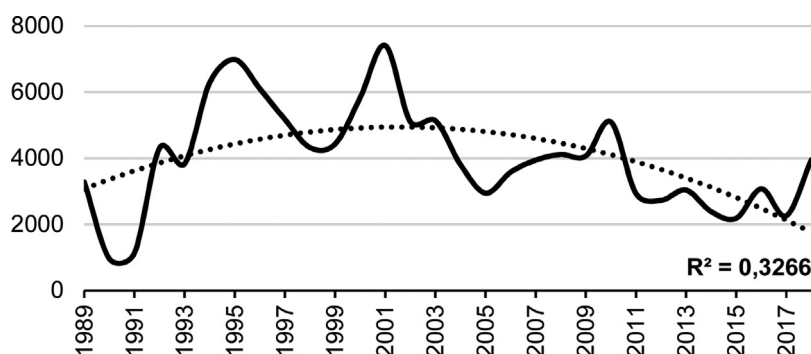


Fig. 11. Évolution de l'intégrale pollinique annuelle (APIn) des Poacées. Exemple de Toulouse.

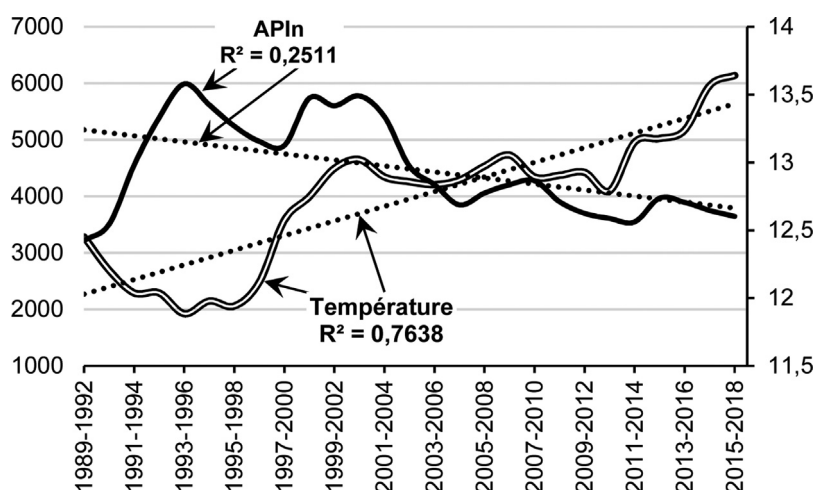


Fig. 12. Évolution de l'intégrale pollinique annuelle (APIn) des Poacées. Moyenne mobile sur quatre ans des sept sites retenus (échelle de gauche, en nombre de grains par mètre cube d'air), et comparaison avec la moyenne mobile sur quatre ans de la température moyenne de l'année civile (échelle de droite, en °C).

vie extrêmement ralentie déclenchée par la baisse de la température et par la diminution de la longueur du jour [77] ; après quoi le cycle recommence. La dormance constitue une étape cruciale dans le passage de la période hivernale, indispensable au bon déroulement ultérieur de tout le cycle végétatif. Pour lever leur dormance et enclencher leur floraison, les arbres comme le bouleau doivent avoir accumulé suffisamment de températures basses pour satisfaire leurs besoins en froid (c'est la phase de *chilling*), puis avoir accumulé suffisamment de températures élevées pour satisfaire leurs besoins en chaleur et permettre la croissance des bourgeons (c'est la phase de *forcing*) (Fig. 14). Jusqu'en 2002, le changement climatique a certes allongé quelque peu la période de *chilling* (il fallait davantage de temps pour accumuler assez de froid), mais la période de *forcing* était réduite, car l'accumulation de chaleur se faisait très rapidement—ce qui a induit une précocité de la floraison et de la pollinisation. Mais depuis 2003, avec des hivers encore plus cléments, la période de *chilling* continue à s'allonger, au point de retarder notablement la levée de dormance des bourgeons et le début de la phase de *forcing* [77–82], donc la floraison et la libération du pollen. Le phénomène est encore renforcé en présence de fins d'hiver froides, ce qui s'est produit plusieurs fois ces dernières années—phénomène conjoncturel par opposition au phénomène structurel qu'est le réchauffement climatique. Certains auteurs [77,83] ajoutent que, de toute façon, les exigences de la photopériode empêchent l'avance printanière de s'accroître beaucoup plus que cela n'a été le cas au début des années 2000. À notre connaissance, Van Vliet et al. [28] sur l'exemple des Pays-Bas ont été les premiers aérobiologistes à évoquer, dès 2002, l'éventualité d'un renversement de tendance de la DDP du bouleau, mais il a

Tableau 5

Évaluation du nombre de jours à risque allergique $RA \geq 3$ pour les Poacées, sur la période disponible.

Ville	R ²	Jours à $RA \geq 3$
		Taux d'évolution (jours/an) *
Amiens	0,12	1987–2002 : +0,912003–2018 : –0,81
Lyon	0,34	1987–2002 : +1,532003–2018 : –1,16
Montluçon	0,35	1989–2002 : +1,542003–2018 : –1,75
Paris	0,01	1987–2018 : –0,12
Strasbourg	0,07	1988–2018 : –0,32
Toulouse	0,22	1989–2002 : +1,572003–2018 : –1,94
Toulon	0,01	1995–2018 : –0,17

* Les résultats négatifs correspondent à une diminution, les résultats positifs à une augmentation.

fallu attendre Newnham et al. [84] en 2013 pour confirmer, à propos de trois sites anglais, qu'il ne s'agissait pas d'une vue de l'esprit. Dès lors, il conviendrait de corriger sans tarder certains modèles de simulation, comme celui de Zhang et al. [85] qui prévoyait qu'entre 2000 et 2020 la DDP du bouleau avancerait en moyenne de 19 jours.

Nos constatations sur la fin de la période pollinique, qui font état d'une tendance générale à une plus grande précocité de la DFP, vont à l'encontre des thèses habituellement défendues dans les publications de synthèse [32,33] et dans certaines études stationnelles, souvent réalisées aux limites de l'aire de répartition du bouleau [20]. Mais elles sont en accord avec la majorité des observations faites localement. Puc et al. [75] ont ainsi noté, sur une période de 15 ans, une avancée significative de 7 à 10 jours, sur la plus grande

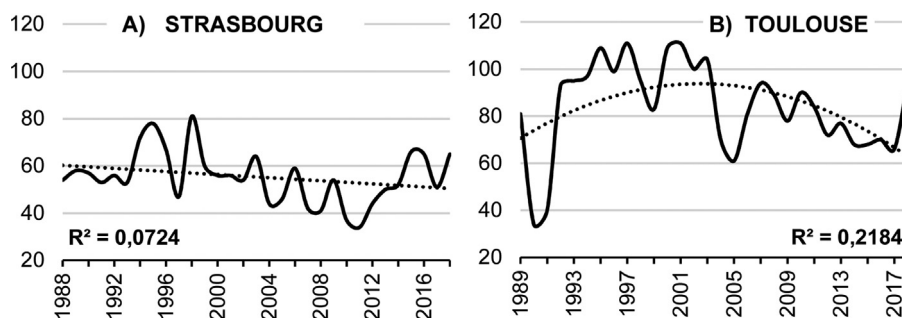


Fig. 13. Évolution du nombre de jours à risque allergique (RA) d'exposition au pollen de Poacées ≥ 3 sur une échelle de 0 à 5. Exemples de Strasbourg et Toulouse.

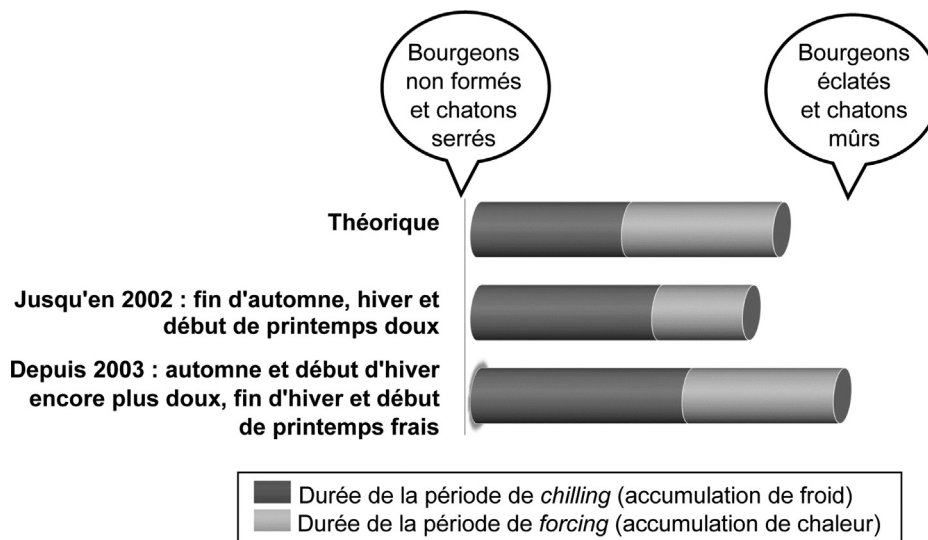


Fig. 14. Évolution au fil des années du nombre de jours nécessaires à la maturation des bourgeons et des chatons de bouleau. Source : RNSA.

partie du territoire polonais, de la date où les capteurs ne recueillent plus que quelques grains isolés de *Betula*.

Le raccourcissement progressif de la saison pollinique du bouleau s'inscrit également à contre-courant de ce qui est couramment admis [72]. Il n'empêche que nombre de publications parmi les plus récentes reconnaissent qu'à la différence de beaucoup d'autres taxons, la saison du bouleau reste stable [74] ou tend même à se rétracter – dans 62 % des sites de surveillance, par exemple, aux États-Unis [29].

Les APIn ont partout évolué à la hausse, avec une tendance quasi linéaire – ce qui, cette fois, conforte et prolonge les observations de très nombreux auteurs [30,72,73], et plus spécialement celles de Caillier et Thibaudon [86] sur les séries 1987–2000 de neuf sites français. Au point que l'ONERC a fait de « l'évolution de la quantité annuelle de pollen de bouleau » l'un des indicateurs les plus pertinents du changement climatique [64]. Il est vrai que la production pollinique de *B. pendula* et de *B. pubescens* dépend avant tout du nombre d'inflorescences mâles susceptibles de polliniser et, en second lieu, des conditions météorologiques régnant lors de la pollinisation [87]. Or, le nombre de chatons semble bien déterminé par la croissance et la vigueur de l'arbre pendant au moins l'année précédant la floraison [87] – ce qui explique le coefficient de corrélation relativement élevé et très significatif mis en évidence, comme dans l'étude de Stach et al. [56], avec la température de la période juillet–juin. De plus, et même si les seules mesures disponibles portent sur une variété de bouleau peu présente en France (*B. papyrifera*), il a été démontré expérimentalement qu'avec une augmentation de 200 ppm du CO_2 atmosphérique, alors que l'on est actuellement sur une tendance de +3 ppm/an, le diamètre des

chatons s'élevait de 14 % et leur masse de 12,5 % [88], ce qui permet d'estimer entre 10 et 15 % l'accroissement de la production pollinique [89]. Certes, ces chiffres sont très en deçà de ce qui a été démontré pour le chêne, chez qui une hausse de 40 % du CO_2 majorerait la production pollinique de 353 % [90]. Mais à cela s'ajoute le fait que les arbres exposés à une forte concentration de CO_2 commencent à produire du pollen à un âge et à une taille où ils sont normalement encore stériles, et continuent à en produire jusqu'à un âge très avancé [13,89].

Enfin, et même si les deux paramètres ne sont pas toujours strictement proportionnels, la forte augmentation des quantités de pollen suffit à expliquer l'accroissement linéaire du nombre de jours à risque allergique moyen ou élevé.

4.3. Poacées

La plus grosse différence entre les situations décrites pour le bouleau et pour les Poacées tient au fait que ces dernières réservent, d'un endroit à l'autre, des schémas extrêmement contrastés qui interdisent, sur presque tous les points, de dégager une tendance commune aux sept sites retenus. Ceci vaut notamment pour les dates de début et de fin de pollinisation où sont réalisés, sans aucune structuration spatiale, les trois cas de figure possibles : retard, stabilité ou avancée. Cela vaut aussi pour la durée de la saison pollinique, allongée, restée stationnaire ou réduite. La principale explication vient probablement de ce que la famille des Poacées comprend plus de 700 genres et autour de 10 000 espèces, sauvages ou cultivées, vivaces ou annuelles, dont il est quasi impossible en routine de discriminer les pollens. Dès lors, l'évolution

interannuelle des différents paramètres de la pollinisation reflète la floraison de toutes les Poacées coexistant en un lieu donné, sans que puisse être distinguée la contribution de chaque espèce, alors que toutes n'ont manifestement pas la même sensibilité au changement climatique et peuvent présenter des tendances différentes ou même opposées [91]. On sait, par exemple, qu'il existe dans le processus de photosynthèse deux types de fixation du CO₂, identifiés par les termes C3 et C4 qui reflètent le nombre d'atomes de carbone de la molécule à l'origine des réactions de fixation du carbone. Ces mécanismes sont associés à des comportements écophysologiques différents [92]. Les plantes dites « en C3 », comme le blé, le dactyle, l'ivraie ou la fléole, de loin les plus nombreuses aux latitudes moyennes, sont pratiquement les seules à voir leur photosynthèse stimulée par l'augmentation du CO₂ atmosphérique – et donc, sans qu'il y ait proportionnalité parfaite, les seules à voir leur production de pollen s'accroître. Les plantes dites « en C4 », comme le maïs, ne réagissent quasiment pas à la teneur ambiante en CO₂. On comprend, dans ces conditions, que l'effet du changement climatique sur la pollinisation des Poacées soit affecté par la proportion, variable d'une région à l'autre, des plantes « en C3 » et « en C4 » [93].

La grande diversité des taxons réunis sous le terme générique de Poacées explique également l'importance de la variabilité interannuelle, qui masque souvent les tendances ou fait que l'adjonction ou le retrait d'une ou deux années en inverse le signe.

Les choses sont plus claires, et davantage conformes aux données de la littérature, pour le cumul annuel des concentrations polliniques. L'absence de hausse notée partout, sauf à Lyon, a été retrouvée par de nombreux auteurs, qui ont soit noté l'impossibilité de dégager la moindre tendance générale pour les graminées [23,94,95], soit le plus souvent souligné la prédominance des tendances décroissantes [20,30,74,96]. On se gardera néanmoins de tout attribuer ici au changement climatique : entre beaucoup d'autres facteurs, l'accroissement des surfaces urbanisées (qui éloigne progressivement les principales sources de pollen des capteurs) et l'évolution des pratiques agricoles, avec un net recul des prairies de fauche, peuvent également intervenir.

Cette tendance quasi générale à la baisse des API n'empêche pas le nombre de jours à risque moyen ou élevé de présenter dans certains sites un *trend* positif, ce qui prouve une fois de plus qu'il n'y a pas de stricte proportionnalité entre l'abondance du pollen sur l'ensemble d'une saison et la fréquence de dépassement de tel ou tel seuil [97].

5. Conclusion

Les pages qui précèdent ont montré, sur l'exemple de quelques sites français disposant de séries longues et fiables, que les impacts du changement climatique sur différentes espèces végétales connues pour l'allergénicité de leur pollen sont infiniment plus complexes que ne le prétend le discours dominant, dont les grandes lignes ont été rappelées au début de cet article. Si les quantités de pollen libérées, et donc présentes dans l'air, augmentent bien pour le bouleau à mesure que la température s'élève, l'évolution est diamétralement opposée pour les Poacées. La précoïté du début de la pollinisation, vérifiée sur *Betula* jusqu'au début du XXI^e siècle, s'est ensuite durablement arrêtée pour faire place à un retard graduel, et aucune tendance à caractère général n'a pu être mise en évidence pour les Poacées. Quant au cumul des concentrations polliniques, si elles ont pour les deux taxons considérés montré des tendances fortes, étroitement corrélées aux températures, il s'est agi de tendances et de corrélations positives dans un cas, mais négatives dans l'autre. Enfin, il a été montré que le risque d'allergie dû à l'exposition au pollen avait certes évolué souvent en phase avec les comptes polliniques, mais que la règle comportait un nombre non négligeable d'exceptions.

Ce qui est dit dans les publications à prétention universelle pêche à la fois par la place excessive faite à la déduction au détriment de l'observation et par une généralisation abusive – qu'il s'agisse de la transposition d'observations ponctuelles à d'autres sites, voire à tous les sites ou de l'extrapolation à d'autres espèces, sinon à toutes les espèces, de constats faits sur l'une d'entre elles.

C'est seulement le jour où auront été réalisées de très nombreuses monographies locales, considérant séparément les différentes espèces et tenant compte de l'environnement aux échelles les plus fines, qu'avec toute la prudence requise pourra être entreprise une véritable synthèse qui, elle, ne souffrira aucune contestation.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Remerciements

Les auteurs remercient Eliot Zachary, Gilles Oliver et Samuel Monnier (RNSA) pour les données fournies et leurs premiers traitements, ainsi que tous les analystes partenaires du RNSA.

Références

- [1] Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, et al. *Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs*. Cambridge-New York: Cambridge University Press; 2013.
- [2] Pachauri RK, Meyer LA. *Changements climatiques 2014. Rapport de synthèse*. GIEC: Genève; 2015.
- [3] De La Soudière M. Le changement climatique, une « grande peur » collective. *Communications* 2017;101:173–85.
- [4] Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum DD, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, editors. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Cambridge-New York: Cambridge University Press; 2014.
- [5] Besancenot J-P. Changement climatique et santé. *Environ Risques Sante* 2015;14:394–414.
- [6] Besancenot J-P. Changement climatique et impacts sanitaires : une évolution déjà observable ? *Air Pur* 2007;72:13–20.
- [7] Pascal M. Les impacts sanitaires du changement climatique sont déjà observables. *Actual Doss Sante Publique* 2015;93:20–2.
- [8] Wilkinson MJ. Pollen and climatic change. *Aerobiologia* 1989;5:3–8.
- [9] Barnes CS. Impact of climate change on pollen and respiratory disease. *Curr Allergy Asthma Rep* 2018;18:59.
- [10] Beggs PJ. Impacts of climate change on aeroallergens: past and future. *Clin Exp Allergy* 2004;34:1507–13.
- [11] Beggs PJ. Impacts of climate change on allergens and allergic diseases: knowledge and highlights from two decades of research. In: Butler CD, editor. *Climate change and global health*. Wallingford: CAB; 2014. p. 105–13.
- [12] Beggs PJ, editor. *Impacts of climate change on allergens and allergic diseases*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016.
- [13] Besancenot J-P, Thibaudon M. Changement climatique et pollinisation. *Rev Mal Respir* 2012;29:1238–53.
- [14] Besancenot J-P, Thibaudon M. Évolution récente de la répartition géographique des plantes émettrices de pollen allergisant et perspectives en liaison avec le changement climatique. *Pollut Atmos* 2013;150–7.
- [15] Damialis A, Traidl-Hoffmann C, Treudler R. Climate change and pollen allergies. In: Marselle MR, Stadler J, Korn H, Irvine K, Bonn A, editors. *Biodiversity and health in the face of climate change*. Cham: Springer; 2019. p. 47–66.
- [16] Gamble JL, Reid CE, Post E, Sacks J. A review of the impacts of climate variability and change on aeroallergens and their associated effects. Washington, DC: Global Change Research Program; 2008.
- [17] Katelaris CH, Beggs PJ. Climate change: allergens and allergic diseases. *Int Med F J* 2018;48:129–34.
- [18] Thibaudon M. Pollens, allergies et changements climatiques. *Presse Therm Clim* 2007;144:117–20.
- [19] Ziska LH, Makra L, Harry SK, Bruffaerts N, Hendrickx M, Coates F, et al. Temperature-related changes in airborne allergenic pollen abundance and seasonality across the northern hemisphere: a retrospective data analysis. *Lancet Planet Health* 2019;3:124–31.
- [20] Ariano R, Canonica GW, Passalacqua G. Possible role of climate changes in variations in pollen seasons and allergic sensitizations during 27 years. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2010;104:215–22.
- [21] Beggs PJ. Climate change and allergy in Australia: an innovative, high-income country, at potential risk. *Public Health Res Pract* 2018;28:e2841828.

- [22] Bortenschlager S, Bortenschlager I. Altering airborne pollen concentrations due to the Global Warming. A comparative analysis of airborne pollen records from Innsbruck and Oberurg (Austria) for the period 1980–2001. *Grana* 2005;44:172–80.
- [23] Clot B. Trends in airborne pollen: an overview of 21 years of data in Neuchâtel (Switzerland). *Aerobiologia* 2003;19:227–34.
- [24] Damialis A, Halley JM, Gioulekas D, Vokou D. Long-term trends in atmospheric pollen levels in the city of Thessaloniki, Greece. *Atmos Environ* 2007;41:7011–21.
- [25] Fernández-Llamazares Á, Belmonte J, Delgado R, De Linares C. A statistical approach to bioclimatic trend detection in the airborne pollen records of Catalonia (NE Spain). *Int J Biometeorol* 2014;58:371–82.
- [26] Frenguelli G. Interactions between climatic changes and allergenic plants. *Monaldi Arch Chest Dis* 2002;57:141–3.
- [27] Lake IR, Jones NR, Agnew M, Goodess CM, Giorgi F, Hamaoui-Laguel L, et al. Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environ Health Perspect* 2017;125:385–91.
- [28] Van Vliet AJH, Overeem A, De Groot RS, Jacobs AFG, Spijksma FTM. The influence of temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands. *Int J Climatol* 2002;22:1757–67.
- [29] Zhang Y, Bielory L, Mi Z, Cai T, Robock A, Georgopoulos P. Allergenic pollen season variations in the past two decades under changing climate in the United States. *Glob Chang Biol* 2015;21:1581–9.
- [30] Ziello C, Sparks TH, Estrella N, Belmonte J, Bergmann K-C, Bucher E, et al. Changes to airborne pollen counts across Europe. *PLoS One* 2012;7:e34076.
- [31] Ziska LH, Epstein PR, Rogers AC. Climate change, aerobiology, and public health in the Northeast United States. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 2008;13:607–13.
- [32] Dahl Å, Galán C, Hajkova L, Pauling A, Šikoparija B, Smith M, et al. The onset, course and intensity of the pollen season. In: Sofiev M, Bergmann K-C, editors. *Allergenic pollen. A review of the production, release, distribution and health impacts*. Dordrecht: Springer; 2013. p. 29–70.
- [33] Ziska LH. Impacts of climate change on allergen seasonality. In: Beggs PJ, editor. *Impacts of climate change on allergens and allergic diseases*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. p. 92–112.
- [34] Cleland EE, Chuine I, Menzel A, Mooney HA, Schwartz MD. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol Evol* 2007;22:357–65.
- [35] Amano T, Smithers RJ, Sparks TH, Sutherland WJ. A 250-year index of first flowering dates and its response to temperature changes. *Proc R Soc B* 2010;277:2451–7.
- [36] Fu YH, Piao S, Op de Beeck M, Cong N, Zhao H, Zhang Y, et al. Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations. *Glob Ecol Biogeogr* 2014;23:1255–63.
- [37] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature* 1999;397:659.
- [38] Bogawski P, Grewling L, Nowak M, Smith M, Jackowiak B. Trends in atmospheric concentrations of weed pollen in the context of recent climate warming in Poznań (Western Poland). *Int J Biometeorol* 2014;58:1759–68.
- [39] Menzel A, Jochner S. Impacts of climate change on aeroallergen production and atmospheric concentration. In: Beggs PJ, editor. *Impacts of climate change on allergens and allergic diseases*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. p. 10–28.
- [40] Galán C, Ariatti A, Bonini M, Clot B, Crouzy B, Dahl Å, et al. Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia* 2017;33:293–5.
- [41] Frei T, Gassner E. Climate change and its impact on birch pollen quantities and the start of the pollen season: an example from Switzerland for the period 1969–2006. *Int J Biometeorol* 2008;52:667–74.
- [42] Buters JTM. Impacts of climate change on allergenicity. In: Beggs PJ, editor. *Impacts of climate change on allergens and allergic diseases*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. p. 74–91.
- [43] Ahlholm JU, Helander ML, Savolainen J. Genetic and environmental factors affecting the allergenicity of birch (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* [Orl.] Hamet-Ahti) pollen. *Clin Exp Allergy* 1998;28:1384–8.
- [44] Albertini R, Ugolotti M, Buters J, Weber B, Thibaudon M, Smith M, et al. The European project HIALINE (Health Impacts of Airborne Allergen Information Network): results of pollen and allergen of *Betula* monitoring in Parma. *Rev Allergy Clin Immunol* 2013;23:14–20.
- [45] Ziska LH, Epstein PR, Schlesinger WH. Rising CO₂, climate change, and public health: exploring the links to plant biology. *Environ Health Perspect* 2009;117:155–8.
- [46] Shea KM, Truckner RT, Weber RW, Peden DB. Climate change and allergic disease. *J Allergy Clin Immunol* 2008;122:443–53.
- [47] Takaro TK, Knowlton K, Balmes JR. Climate change and respiratory health: current evidence and knowledge gaps. *Expert Rev Respir Med* 2013;7:349–61.
- [48] Katelaris CH. Impacts of climate change on allergic diseases. In: Beggs PJ, editor. *Impacts of climate change on allergens and allergic diseases*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. p. 157–78.
- [49] Beaumont LJ, Duursma DE. Impacts of climate change on the distributions of allergenic species. In: Beggs PJ, editor. *Impacts of climate change on allergens and allergic diseases*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. p. 29–49.
- [50] Badeau V, Dupouey JL, Cluzeau C, Drapier J, Le Bas C. Climate change and the biogeography of French tree species: first result and perspectives. In: Lousteau D, editor. *Forests, carbon cycle and climate change*. Versailles: Quae; 2010. p. 231–52.
- [51] Albertine JM, Manning WJ, DaCosta M, Stinson KA, Muilenberg ML, Rogers CA. Projected carbon dioxide to increase grass pollen and allergen exposure despite higher ozone levels. *PLoS One* 2014;9:e11712.
- [52] Wayne P, Foster S, Connolly J, Bazzaz F, Epstein P. Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂-enriched atmospheres. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2002;88:279–82.
- [53] Kim KR, Oh JW, Woo SY, Am Seo Y, Choi YJ, Kim HS, et al. Does the increase in ambient CO₂ concentration elevate allergy risks posed by oak pollen? *Int J Biometeorol* 2018;62:1587–94.
- [54] D'Amato G, Cecchi L, Bonini S, Nunes C, Annesi-Maesano I, Behrendt H, et al. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 2007;62:976–90.
- [55] Miguères M, Fontaine JF, Haddad T, Grosclaude M, Saint-Martin F, David DB, et al. Characteristics of patients with respiratory allergy in France and factors influencing immunotherapy prescription: a prospective observational study (Realis). *Int J Immunopathol Pharmacol* 2011;24:387–400.
- [56] Stach A, Emberlin J, Smith M, Adams-Groom B, Myszkowska D. Factors that determine the severity of *Betula* spp. pollen seasons in Poland (Poznań and Kraków) and the United Kingdom (Worcester and London). *Int J Biometeorol* 2008;52:311–21.
- [57] Hirst JM. An automatic volumetric spore trap. *Ann Appl Biol* 1952;39:257–65.
- [58] Thibaudon M, Caillaud D, Besancenot J-P. Méthodes d'étude des pollens atmosphériques et calendriers polliniques. *Rev Mal Respir* 2013;30:463–79.
- [59] Thibaudon M, Oliver G, Besancenot J-P. Des capteurs pas comme les autres ! Trente-cinq ans de recueil du pollen en France. *Rev Fr Allergol* 2019;59 [à paraître].
- [60] Cassagne E. Revue bibliographique des principaux seuils de détermination et méthodes de prévision de la date de début de pollinisation (DDP). *Rev Fr Allergol* 2009;49:571–6.
- [61] Comtois P. Statistical analysis of aerobiological data. In: Mandrioli P, Comtois P, Levizzani V, editors. *Methods in aerobiology*. Bologna: Pitagora Editrice Bologna; 1998. p. 217–59.
- [62] Ickovic MR, Sutra JP, Thibaudon M. From April 1st to July 30th in the Paris area, pollinosis symptoms compared to atmospheric pollen counts. *Ann Sci Nat Bot* 1988;9:89–94.
- [63] Chatfield C. The analysis of time series: an introduction. 4th Edition Boca Raton, FL: CRC Press; 2016.
- [64] <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-sante-et-societe> et <http://jlbam.free.fr/botanic/Indicateur%20du%20changement%20climatique.pdf>.
- [65] Blanchet G. 2018, quatrième année la plus chaude dans le monde, première en France. *Meteorologie* 2019;105:2–4.
- [66] Spijksma FTM, Emberlin JC, Hjelmroos M, Jäger S, Leuschner RM. Atmospheric birch (*Betula*) pollen in Europe: Trends and fluctuations in annual quantities and the starting dates of the seasons. *Grana* 1995;34:51–7.
- [67] Emberlin J, Mullins J, Corden J, Millington W, Brooke M, Savage M, et al. The trend to earlier birch pollen seasons in the UK: a biotic response to changes in weather conditions. *Grana* 1997;36:29–33.
- [68] Clot B. Airborne birch pollen in Neuchâtel (Switzerland): onset, peak and daily patterns. *Aerobiologia* 2001;17:25–9.
- [69] Emberlin J, Detandt M, Gehrig R, Jaeger S, Noland N, Rantio-Lehtimäki A. Responses in the start of *Betula* (birch) pollen seasons to recent changes in spring temperatures across Europe. *Int J Biometeorol* 2002;46:159–70.
- [70] Rasmussen A. The effects of climate change on the birch pollen season in Denmark. *Aerobiologia* 2002;18:253–65.
- [71] Veriankaite L, Šauliute I, Bukantis A. Analysis of changes in flowering phases and airborne pollen dispersion of the genus *Betula* (birch). *J Environ Eng Landsc Manag* 2010;18:137–44.
- [72] Biedermann T, Winther L, Till SJ, Panzner P, Knulst A, Valovirta E. Birch pollen allergy in Europe. *Allergy* 2019;74:1237–48.
- [73] Emberlin J, Laaidi M, Detandt M, Gehrig R, Jaeger S, Myszkowska D, et al. Changement climatique et évolution du contenu pollinique de l'air dans sept pays européens: exemple du bouleau. *Rev Fr Allergol Immunol Clin* 2007;47:57–63.
- [74] Mercuri A, Torri P, Fornaciari R, Florenzano A. Plant responses to climate change: the case study of *Betulaceae* and *Poaceae* pollen seasons. *Plants* 2016;5:42.
- [75] Puc M, Wolski T, Camacho IC, Myszkowska D, Kasprzyk I, Grewling L, et al. Fluctuation of birch (*Betula* L.) pollen seasons in Poland. *Acta Agrobot* 2015;68:303–13.
- [76] Ritenberga O, Sofiev M, Kirillova V, Kalina L, Genikhovich E. Statistical modelling of non-stationary processes of atmospheric pollution from natural sources: example of birch pollen. *Agric For Meteorol* 2016;226:96–107.
- [77] Caffarra A, Donnelly A, Chuine I, Jones MB. Modelling the timing of *Betula pubescens* budburst. I. Temperature and photoperiod: a conceptual model. *Clim Res* 2011;46:147–57.
- [78] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int J Biometeorol* 2000;44:76–81.
- [79] Chmielewski F-M, Rötter T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agric For Meteorol* 2001;108:101–12.
- [80] Yu H, Luedeling E, Xu J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA* 2010;107:22151–6.
- [81] Chuine I, Morin X, Bugmann H. Warming, photoperiods, and tree phenology. *Science* 2010;329:277–8.
- [82] Asse D, Chuine I, Vitasse Y, Yoccoz NG, Delpierre N, Badeau V, et al. Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agr For Meteorol* 2018;252:220–30.
- [83] Güzere J, Delzon S, Davi H, Bonhomme M, Garcia de Cortazar-Atauri I, Chuine I. Integrating interactive effects of chilling and photoperiod in phenological process-based models. *Agric For Meteorol* 2017;244–245:9–20.

- [84] Newnham RM, Sparks TH, Skjøth CA, Head K, Adams-Groom B, Smith M. Pollen season and climate: is the timing of birch pollen release in the UK approaching its limit? *Int J Biometeorol* 2013;57:391–400.
- [85] Zhang Y, Isukapalli SS, Bielory L, Georgopoulos PG. Bayesian analysis of climate change effects on observed and projected airborne levels of birch pollen. *Atmos Environ* 2013;68:64–73.
- [86] Caillier J, Thibaudon M. Évolution temporelle et géographique des principaux pollens allergisants (France, 1987 à 2000). *Eur Ann Allergy Clin Immunol* 2001;32:32–6.
- [87] Ranta H, Hokkanen T, Linkosalo T, Laukkanen L, Bondestam K, Oksanen A. Male flowering of birch: spatial synchronization, year-to-year variation and relation of catkin numbers and airborne pollen counts. *For Ecol Manag* 2008;255:643–50.
- [88] Darbah JN, Kubiske ME, Nelson N, Oksanen E, Vaapavuori E, Karnosky DF. Impacts of elevated atmospheric CO₂ and O₃ on paper birch (*Betula papyrifera*): reproductive fitness. *Sci World J* 2007;7:240–6.
- [89] Ladeau SL, Clark JS. Elevated CO₂ and tree fecundity: the role of tree size, interannual variability, and population heterogeneity. *Global Change Biol* 2006;12:822–33.
- [90] Kim KR, Oh J-W, Woo S-Y, Seo YA, Choi Y-J, Kim HS, et al. Does the increase in ambient CO₂ concentration elevate allergy risks posed by oak pollen? *Int J Biometeorol* 2018;62:1587–94.
- [91] Brennan GL, Potter C, De Vere N, Griffith GW, Skjøth CA, Osborne NJ, et al. Temperate airborne grass pollen defined by spatio-temporal shifts in community composition. *Nature Ecol Evol* 2019;3:750–4.
- [92] Ehleringer JR, Cerling TE. C3 and C4 photosynthesis. In: Mooney HA, Mooney HA, Canadell JG, editors. *Encyclopedia of global environmental change*, Vol. 2. Chichester: Wiley; 2002. p. 186–90.
- [93] Ziska LH. Rising atmospheric carbon dioxide and plant biology: the overlooked paradigm. In: Kleinman DL, Cloud-Hansen KA, Matta C, Handelsman J, editors. *Controversies in science and technology. From climate to chromosomes*, Vol. 2. New Rochelle, NY: Mary Ann Liebert; 2008. p. 379–97.
- [94] Spieksma FTM, Nikkels AH. Airborne grass pollen in Leiden, The Netherlands: annual variations and trends in quantities and season starts over 26 years. *Aerobiologia* 1998;14:347–58.
- [95] Spieksma FTM, Corden JM, Detandt M, Millington WM, Nikkels H, Nolard N, et al. Quantitative trends in annual totals of five common airborne pollen types (*Betula*, *Quercus*, *Poaceae*, *Urtica*, and *Artemisia*), at five pollen-monitoring stations in western Europe. *Aerobiologia* 2003;19:171–84.
- [96] Ghitarrini S, Tedeschini E, Timorato V, Frenguelli G. Climate change: consequences on the pollination of grasses in Perugia (Central Italy). A 33-year-long study. *Int J Biometeorol* 2017;61:149–58.
- [97] Thibaudon M, Lachasse C, Laaidi M. Évolution de la pollinisation en France (2002). *Eur Ann Allergy Clin Immunol* 2003;35:77–81.