



Disponible en ligne sur
SciVerse ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com



SÉRIE « POLLENS ET POLLINOSES » / coordonnée par Denis Charpin

Changement climatique et pollinisation

Climate change and pollination

J.-P. Besancenot^{*,1}, M. Thibaudon¹

Réseau national de surveillance aérobiologique, Brussieu, France

Reçu le 20 avril 2012 ; accepté le 17 juillet 2012
Disponible sur Internet le 13 novembre 2012

MOTS CLÉS

Aérobiologie ;
Changement
climatique ;
Impacts ;
Pollen ;
Pollinose

Résumé

Introduction. — Le réchauffement de la planète au cours des dernières décennies ne fait plus guère de doute, et il a des répercussions inévitables sur la pollinisation. L'opinion prévaut que la tendance va se poursuivre et même s'amplifier dans l'avenir.

État des connaissances. — Un climat plus chaud a une forte probabilité d'anticiper les dates de floraison, d'allonger la saison pollinique et d'augmenter les concentrations de pollen dans l'air. Il peut également accroître le contenu allergénique des grains de pollen et entraîner un déplacement vers le nord, ou en altitude, de l'aire d'extension de certaines espèces. Des taux croissants de CO₂ atmosphérique sont en outre susceptibles de renforcer ces diverses tendances.

Perspectives. — Les prévisions sont inévitablement entachées d'incertitudes. Une meilleure compréhension de l'ampleur et du sens des changements affectant la pollinisation est indispensable si l'on veut quantifier le fardeau des allergies et modéliser les impacts à venir dans le cadre de différents scénarios d'évolution du climat.

Conclusions. — Le changement climatique influence l'exposition de la population au pollen anémophile, ce qui peut affecter la prévalence et la sévérité des symptômes allergiques. Il y a là une préoccupation majeure de santé publique, qui requiert la mise en œuvre sans délai de stratégies appropriées d'adaptation.

© 2012 SPLF. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

KEYWORDS

Aerobiology;
Climate change;

Summary

Introduction. — There is growing evidence to support an increase in air temperature over recent decades, with significant effects on aeroallergens such as pollen. It is generally accepted that the trend will continue, and become even more pronounced in the future.

* Auteur correspondant. 468, chemin des Fontaines, 83470 Saint-Maximin-La-Sainte-Baume, France.

Adresse e-mail : jean-pierre.besancenot@wanadoo.fr (J.-P. Besancenot).

¹ Groupe de travail aérobiologie de la Société française d'allergologie, France.

Impacts;
Pollen;
Pollinisation

Background. — Global climate change is already affecting, and will continue to affect, with earlier floral initiation, the timing of the production of allergenic pollen. In addition, a warmer climate might lead to a longer pollen season and more days with high pollen counts. It could also increase the allergen content of pollens, and result in extension of plant species towards the poles and higher altitudes. Finally, rising levels of atmospheric CO₂ are likely to reinforce these trends.

Viewpoint. — These predictions are subject to uncertainties that may lead to outcomes that differ materially from what is expected. Understanding the magnitude and direction of the changes affecting pollinisation is critical in order to quantify the future allergic disease burden and model the impacts of different climate change scenarios.

Conclusions. — Climate change influences the production, distribution, dispersion and allergenicity of anemophilous pollen and the growth and distribution of weeds, grasses and trees that produce it. These changes in aeroallergens and subsequent human exposure could affect the prevalence and severity of allergic disorders. There is, therefore, an important public health issue that requires development and implementation of appropriate response strategies without delay.

© 2012 SPLF. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Le climat a toujours présenté une variabilité « naturelle » à caractère aléatoire, à laquelle se surimposait une variabilité tendancielle le plus souvent lente, étalée sur des millénaires, et somme toute modérée, puisqu'il y a moins de 6 °C d'écart entre les périodes glaciaires du Quaternaire et les interglaciaires ou le postglaciaire actuel [1]. Cette variabilité naturelle a toutes les chances de perdurer. Mais il s'y ajoute depuis le début de l'ère industrielle, et il risque de s'y ajouter de plus en plus dans l'avenir, une autre modalité de variation. Celle-ci, largement « liée aux activités humaines » telles que consommation de combustibles fossiles et déforestation, induit deux différences majeures par rapport à ce que la Terre a connu jusque-là : il s'agirait de variations rapides, perceptibles sur quelques décennies, en tout cas sur la durée d'une vie humaine, et leur amplitude serait beaucoup plus forte. En liaison avec le dégagement massif de composants gazeux comme le CO₂, mais aussi le méthane CH₄ et le protoxyde d'azote N₂O, qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, c'est une « intensification de l'effet de serre » qui est invoquée comme principal mécanisme explicatif [2]. Des arguments convergents inclinent à penser que l'évolution est déjà amorcée, avec une élévation moyenne de la température à la surface du globe de l'ordre de 0,74 °C (IC₉₅ = 0,56–0,92 °C) entre 1906 et 2005, la hausse s'étant accélérée depuis 1976 (taux actuel de 0,19 °C par décennie). Les projections réalisées par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais *Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC]) font état d'une accentuation « très vraisemblable » de la tendance au cours du ^{xxi}^e siècle (probabilité supérieure à 90 %), avec un réchauffement de 1,1 à 6,4 °C à l'horizon 2100 en comparaison de la période 1980–1999 [3].

Parmi les possibles impacts sanitaires de ces changements climatiques observés ou annoncés [4], la modulation et l'amplification du rôle des aéroallergènes suscitent de réelles inquiétudes, avec cette particularité que la menace ne se borne pas alors à un avenir plus ou moins lointain, comme c'est le cas pour les risques parasitaires ou infectieux, mais semble d'ores et déjà décelable. C'est

surtout sur les pollens qu'a été jusqu'à présent étudiée l'influence du réchauffement en cours, avec des tentatives de projection de cette dynamique en direction du « futur proche » (2050) ou du « futur lointain » (2100) [5–31]. Cinq points sont abordés dans ces publications : les dates de début de pollinisation, la durée de la saison pollinique, l'abondance du pollen émis par la végétation, le potentiel allergisant de ce pollen et les modifications introduites ou attendues dans la répartition spatiale de diverses espèces végétales. Cela fournira la trame des pages qui suivent, qui mettront l'accent sur les climats tempérés des latitudes moyennes. On y ajoutera l'effet « direct » du plus abondant des gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone. En toute hypothèse, il conviendra de rester prudent, du fait de la brièveté des séries chronologiques analysées, qui rend difficile l'interprétation des résultats. C'est pourquoi, à de rares exceptions près, dûment signalées, sera suivie la recommandation [18] de ne retenir que les publications qui reposent sur au moins deux, et si possible trois décennies de données recueillies au même endroit. Par ailleurs, afin de minimiser les biais liés à l'évolution des méthodes de détection et d'identification des pollens, n'ont été retenus que les sites et les périodes où ces méthodes sont restées quasiment identiques : même démarche d'échantillonnage en continu, même capteur de type Hirst, même protocole d'analyse qualitative et quantitative en microscopie optique [32]. Cette précaution permet de considérer les longues séries étudiées comme étant raisonnablement homogènes.

Les dates de début de pollinisation

Une tendance générale à la précocité

La vitesse de développement des plantes est corrélée positivement et de façon quasi linéaire à la température [33], dans une gamme de dispositions thermiques qui varie selon l'espèce considérée mais qui est le plus souvent étendue, entre le « zéro de végétation » et le « seuil d'échaudage ». Dès lors, face à l'élévation des températures

qu'induit le changement climatique, on peut s'attendre à une « anticipation » des différents stades phénologiques, et en particulier de la floraison [34]. Rien d'étonnant, donc, à ce que l'évolution la plus régulièrement étudiée concerne la date d'apparition des premiers pollens, qui serait de plus en plus précoce dans la plupart des espèces [35,36]. Même si l'on s'accorde à considérer que les plantes entomogames (pollinisées par les insectes) sont les plus concernées [23,34,37], de nombreuses espèces anémogames (pollinisées par le vent) le sont également.

Il est ainsi éloquent qu'à Bruxelles, le début de la pollinisation de *Betula* (bouleau), qui se situait autour du 15 avril au début des années 1970, intervienne aujourd'hui dès le 15 mars, ce qui représente une avance d'un mois en une quarantaine d'années [38]. Selon les sites, la pente de la courbe est plus ou moins prononcée et plus ou moins régulière, mais la tendance à l'anticipation souffre peu d'exceptions [39]. Leyde (Pays-Bas) fournit un exemple très représentatif (Fig. 1), où le millésime rend compte à lui seul de 34 % de la variance de la date initiale de pollinisation.

Une idée largement répandue voudrait que les plantes fleurissant en fin d'hiver ou au début du printemps soient les plus affectées [40], leur avance ayant été évaluée à une moyenne de quatre à cinq jours pour chaque degré Celsius d'élévation de la température du trimestre janvier-mars [41,42]. L'hypothèse a même été avancée que *Betula* pourrait en ce domaine constituer une exception, voire l'unique exception [43], mais la réalité est plutôt que cet arbre a été longtemps le seul ou presque, à être étudié sous cet angle. Ce n'est désormais plus le cas : des recherches portant sur des taxons très précoces vont dans le même sens, même si les séries dépouillées sont trop brèves pour autoriser une conclusion définitive. Pour *Corylus* (noisetier), dont les chatons commencent à libérer leur pollen en janvier ou début février, l'avance approcherait au Royaume-Uni 15 jours en dix ans [44]. Il en va sensiblement de même pour *Alnus* (aulne), dont la pollinisation suit en moyenne de deux à trois semaines celle du noisetier [44]. Un peu plus tard dans la saison, l'analyse des données aérobiologiques suisses a montré que le pollen de *Fraxinus* (frêne) est désormais attendu en moyenne quatre semaines plus tôt qu'il y a 20 ans [45]. Le phénomène se retrouve pour *Platanus* (platane) avec, selon les villes, une avance de 0,66 à 1,21 jour par an en Italie [46]. L'exemple de *Cryptomeria japonica* (cèdre du Japon) est également éloquent [47] : cet arbre, responsable d'allergies fréquentes et relativement sévères, a vu sa pollinisation avancer de plus d'un mois en 21 ans [48]. Un constat voisin a été fait, sur un demi-siècle, pour les principales variétés de *Quercus* (chêne) de la péninsule ibérique, surtout en domaine méditerranéen [49].

Une évolution de même nature, quoique moins systématique et souvent de moindre ampleur, est attestée pour les herbacées, qu'il s'agisse des *Poaceae* (graminées) entre le début mai et la mi-juillet [50,51], de *Plantago* (plantain), de *Parietaria judaica* (pariétaire), bien étudiée notamment autour du golfe de Salonique [52] ou, en seconde moitié d'été, d'*Artemisia* (armoise) [53] et d'*Ambrosia* (ambrosie), sauf peut-être sur la marge sud de leur aire d'extension [54–56].

La synthèse de toutes les données validées [57] a permis d'évaluer à 2,5 jours par décennie l'avance moyenne des différents stades phénologiques, et notamment du début

de la pollinisation, sur l'ensemble des latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère nord, la tendance à une plus grande précocité ayant débuté suivant les endroits il y a 30, 40 ou 50 ans. 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 de 25 ans depuis 1753, une avance comprise entre 2,2 jours ($IC_{95} = 1,0–3,4$ versus 1910–1934) et 12,7 jours ($IC_{95} = 9,8–15,6$ versus 1835–1859) [58]. La même étude a mis en évidence une corrélation négative hautement significative ($r = -4,96$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,58$) avec la température moyenne du trimestre février-avril sur le centre de l'Angleterre, chaque hausse de 1 °C de cette température se traduisant par une avancée moyenne de 5,0 jours du début de la floraison [58]. En Estonie, l'analyse de la série 1951–1999 indique que la tendance à une plus grande précocité de la floraison se vérifie pour 85 à 86 % de toutes les espèces végétales, l'avance dépassant 20 jours en quarante-six ans dans 5 % des cas [59].

De trop rares études se sont attachées à l'allure du démarrage de la saison pollinique. Il en ressort qu'avec la hausse des températures, le passage de l'hiver au printemps se fait aujourd'hui un peu moins brutalement que naguère et que le démarrage de la pollinisation s'opère désormais de façon plus progressive. Cela a été notamment vérifié pour *Betula* dans l'ouest de la Pologne [60] et pour *Platanus*, en Italie comme en Espagne [46].

Il n'en demeure pas moins que des nuances régionales doivent être signalées. Ce qui précède s'applique prioritairement aux pays baltes et à l'Europe occidentale, France incluse, alors que la tendance s'inverse assez souvent lorsque le caractère continental du climat s'accroît, par exemple en Europe centrale et orientale [61]. Mais même à échelle plus fine, il convient d'éviter tout excès de généralisation, car les tendances identifiées dans une région ne valent pas nécessairement pour la région voisine, ainsi que cela a été bien décrit en Suisse [62,63]. Par ailleurs, les exceptions à la tendance générale ne sont pas rares. Ainsi, alors que *Platanus* pollinise de plus en plus tôt en Italie, comme on l'a déjà noté, son pollen apparaît de plus en plus tardivement dans le nord-ouest de la péninsule ibérique, avec un retard moyen de 0,2 à 0,8 j/an depuis 1994, en lien avec un refroidissement moyen de 0,27 °C/an ($p < 0,001$) [46]. De même, au nord de la Finlande, les pollens arrivent de plus en plus tard, probablement sous l'effet de printemps qui, en Laponie, se refroidissent [39]. Sans doute faut-il également songer à des nuances locales : pour bon nombre d'espèces, la tendance à une plus grande précocité de la pollinisation serait surtout marquée au cœur des îlots de chaleur urbains, alors qu'elle s'atténuerait en périphérie des villes et s'annulerait, si elle ne s'inverse pas, en rase campagne [64,65].

La question se pose, de surcroît, de savoir si la tendance actuelle est appelée à se prolonger, voire à s'amplifier.

Des modélisations prospectives à prendre avec discernement

Des modélisations prospectives ont été tentées pour tout ou partie du ^{xxi}e siècle. Elles annoncent par exemple, pour la

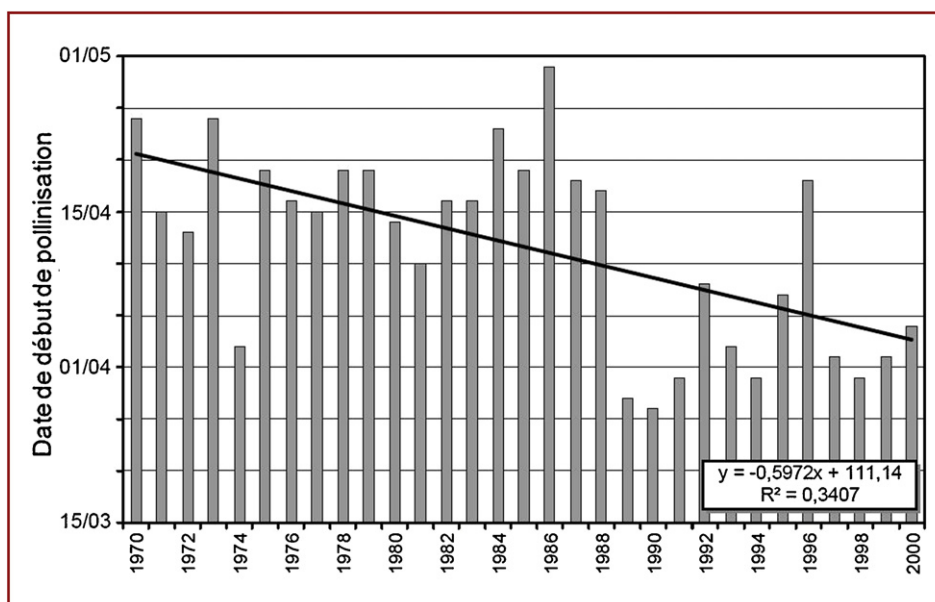


Figure 1. Dates de début de pollinisation de *Betula* (bouleau) à Leyde (Leiden, Pays-Bas), entre 1970 et 2000. Valeurs annuelles et courbe linéaire de tendance ($p < 0,001$). Données du Leiden University Medical Centre (LUMC).

décennie 2091–2100, un début moyen de pollinisation du cèdre du Japon, dans la ville de Yamagata et à ses abords, autour du 8 février, au lieu du 20 actuellement [66]. Une date aussi précoce n’a jamais été observée dans le passé. De surcroît, la démonstration a été faite récemment [67] que les simulations en milieu confiné sous-estimaient presque systématiquement la réponse des plantes à la hausse des températures, la floraison s’avérant toujours plus précoce que les prédictions des expériences. Cette différence tient, pour une part, aux dispositifs et protocoles expérimentaux eux-mêmes. Mais elle résulte aussi du fait que, même si elles s’étalent sur quelques années, ces expériences n’offrent jamais un recul suffisant pour saisir des changements en profondeur, comme des variations génétiques des plantes ou des modifications de la composition des écosystèmes.

Il est vrai que d’autres arguments militent dans un sens quelque peu différent, ainsi que le confirme (Tableau 1) l’exemple de l’ouest des Pays-Bas [68]. Si la tendance à une plus grande précocité est appelée à se prolonger avec l’élévation graduelle des températures, elle devrait aller en se ralentissant au fil des décennies, surtout pour les espèces précoces ou relativement précoces. Soit le cas d’*Ulmus* (orme) : après avoir vu son début de pollinisation avancer de 19 jours en trente ans (1970–1999), il n’enregistrerait plus qu’une avance de 17 jours sur les cent ans suivants (2000–2099). Le schéma est identique pour *Quercus*, avec des chiffres respectifs de 18 et 14 jours, et pour la majorité des autres taxons, à l’exception des plus tardifs. *Olea* (olivier) à Málaga conduit à des observations voisines : au début des années 1990, cet arbre pollinisait en moyenne le 17 mars, dix ans plus tard la date avait avancé au 11 mars (six jours en dix ans) ; mais pour 2099, la modélisation annonce une date autour du 7 mars (soit une avance qui ne serait plus que de quatre jours en un siècle) [69]. L’explication est sans doute que, pour nombre d’arbres et d’herbacées vivaces, le passage de l’état végétatif à l’état reproductif, en

l’occurrence florale, exige un séjour suffisamment prolongé à des températures basses. La « vernalisation » correspond aux besoins quantitatifs en froid, nécessaires aux apex végétatifs pour leur passage au développement reproducteur. Les besoins sont comptés en nombre de jours ayant des températures moyennes inférieures à un seuil donné, qui varie d’une espèce à l’autre. Faute de satisfaction de ces « besoins en froid », le changement climatique est susceptible de réduire le nombre de jours de la vernalisation. Un excès de douceur en fin d’automne ou en hiver peut ainsi, paradoxalement, se traduire par un allongement de la

Tableau 1 Début de la saison de pollinisation dans l’ouest des Pays-Bas : avance observée sur la période 1970–1999 et avance prévue pour la période 2000–2099.

	Avance 1970–1999 (jours)	Avance 2000–2099 (jours)
<i>Cupressaceae</i> (Cupressacées)	11	19
<i>Ulmus</i> (orme)	19	17
<i>Populus</i> (peuplier)	18	20
<i>Salix</i> (saule)	12	12
<i>Fraxinus</i> (frêne)	3	19
<i>Betula</i> (bouleau)	10	13
<i>Quercus</i> (chêne)	18	14
<i>Poaceae</i> (Graminées)	6	11
<i>Rumex</i> (oseille)	5	13
<i>Urticaceae</i> (Urticacées)	11	16
<i>Sambucus</i> (sureau)	15	23
<i>Chenopodiaceae</i> (Chénopodiacées)	9	16
<i>Artemisia</i> (armoise)	9	15

D’après Van Vliet et al. [68], modifié et simplifié.

phase végétative du cycle [34], par une prolongation de la dormance [70], et par un retard au redémarrage de la végétation, entraînant par ricochet un retard (ou une moindre avance) de la pollinisation [71]. Il ne s'agit pas là d'une simple vue de l'esprit : des essais en chambre climatique sur les fleurs mâles de cèdre du Japon ont confirmé qu'une douceur excessive entre la fin octobre et la fin janvier retardait la levée de dormance et, ensuite, le début de la pollinisation [72]. En conséquence, il ne faudrait pas imaginer que des températures plus élevées entraîneront toujours et sans limite une plus grande précocité de l'apparition du pollen.

L'hypothèse a également été avancée qu'un redémarrage précoce exposerait les arbres à des gelées plus fréquentes, avec réduction ultérieure de la floraison et de la production pollinique ; vérifié sur le bouleau [73] et sur la vigne [74], le phénomène reste à confirmer sur d'autres espèces. De même, des agro-botanistes estiment que la tendance à l'anticipation de la pollinisation du cèdre du Japon ira inévitablement en se ralentissant, du fait des chutes de neige dont l'éventualité en février n'est nullement incompatible, même à la fin du ^{xxi}e siècle, avec un réchauffement d'ensemble du climat [66].

Il n'est d'ailleurs pas exclu que l'inversion de tendance soit déjà amorcée : en France, alors que les dates précoces étaient largement majoritaires sur les années 1987–2003, les dates tardives l'emportent sur les années plus récentes pour le bouleau, le chêne, le frêne et le platane [27,75]. Mais il faudrait davantage de recul pour se prononcer définitivement.

De toute manière, si le changement résidait uniquement dans la date initiale de pollinisation, il ne prêterait guère à conséquences : la saison des allergies se trouverait simplement décalée de quelques semaines. C'est ce que l'on observe parfois, par exemple à Bâle où les courbes d'évolution du début et de la fin de la saison de *Betula* sont rigoureusement parallèles [76]. Mais cette situation reste relativement rare. Le plus souvent, d'autres paramètres évoluent simultanément, qui concourent à renforcer l'impact sanitaire.

- La date d'apparition des premiers pollens serait de plus en plus précoce dans la plupart des espèces.
- Toute hausse de température se solde par une avancée de la date de floraison, phénomène constaté pour la plupart des espèces.
- On estime à 2,5 jours par décennie l'avance moyenne des différents stades phénologiques, et notamment du début de la pollinisation, sur l'ensemble des latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère nord.
- Il existe toutefois des disparités régionales, les données ci-dessus prévalant surtout pour les pays baltes et l'Europe occidentale, alors que la tendance tend à s'inverser en climat continental.
- Il existe également des disparités à une échelle plus fine, les tendances identifiées dans une région ne valant pas nécessairement pour la région voisine.

- Les plantes ont également besoin de froid et, paradoxalement, un excès de douceur en fin d'automne ou en hiver peut se traduire par un allongement de la phase végétative du cycle, une prolongation de la dormance et un retard au redémarrage de la végétation, donc de la pollinisation.

La durée de la saison pollinique

Une tendance générale à l'allongement

En règle générale, alors que le début de la pollinisation avance au fil des années, la fin reste sensiblement à la même date et a parfois même tendance à accuser un léger retard. Il s'ensuit, même si la physiologie végétale peine à fournir une explication [19], que pour les principales espèces allergisantes, la présence des pollens dans l'air et sans doute, par suite, le risque de pollinose s'étendent désormais sur une plus longue durée [77]. Ainsi, sur la presque totalité du continent européen, le réseau international des jardins botaniques a calculé qu'au cours du dernier demi-siècle, le début de la floraison, toutes espèces confondues, avait en moyenne avancé de six jours, la fin de la floraison étant quant à elle retardée de 4,8 jours, ce qui fait que la période exposant à des allergies polliniques s'est trouvée allongée de 10,8 jours [68,78]. La tendance, à peine perceptible jusque-là, se serait fortement accentuée au milieu des années 1990. Le coefficient de corrélation avec la température des trois mois précédents s'établit en moyenne à $r = -0,69$ ($p < 0,001$). Le cas de trois variétés d'armoise dans l'ouest de la Pologne a également été bien étudié, avec une franche avance du début de la pollinisation et une très faible avance de la fin [53], le lien avec l'évolution interannuelle des températures s'avérant là encore hautement significatif. Les arbres n'échappent pas à cette tendance, même si elle est assez faible pour *Betula* (Fig. 2a). Un autre exemple saisissant est celui de *Ginkgo biloba* (arbre aux quarante écus) au Japon : sa période de pollinisation s'est allongée de 12 jours depuis 1953, et l'on s'attend dans l'avenir à un nouvel allongement de dix jours pour chaque degré Celsius d'élévation de la température moyenne annuelle [79].

Il n'empêche que les exceptions sont nettement plus nombreuses que pour l'avancée du début de la pollinisation.

Des exceptions assez nombreuses

La plus récurrente concerne les *Cupressaceae* (Cupressacées) : si leur pollinisation débute effectivement de plus en plus tôt, avec une avance moyenne de huit jours tous les dix ans en Italie centrale, elle se termine également à une date plus précoce, l'avance s'établissant cette fois à neuf jours par décennie—ce qui fait que la saison à risque (il est vrai, difficile à délimiter car les Cupressacées émettent des grains, fût-ce en petite quantité, presque tout au long de l'année) raccourcit à peu près d'un jour tous les dix ans [80]. Un constat voisin a été fait à Málaga [81]. Des durées stables, voire légèrement abrégées, sont également notées çà et là pour les herbacées de fin de printemps, surtout

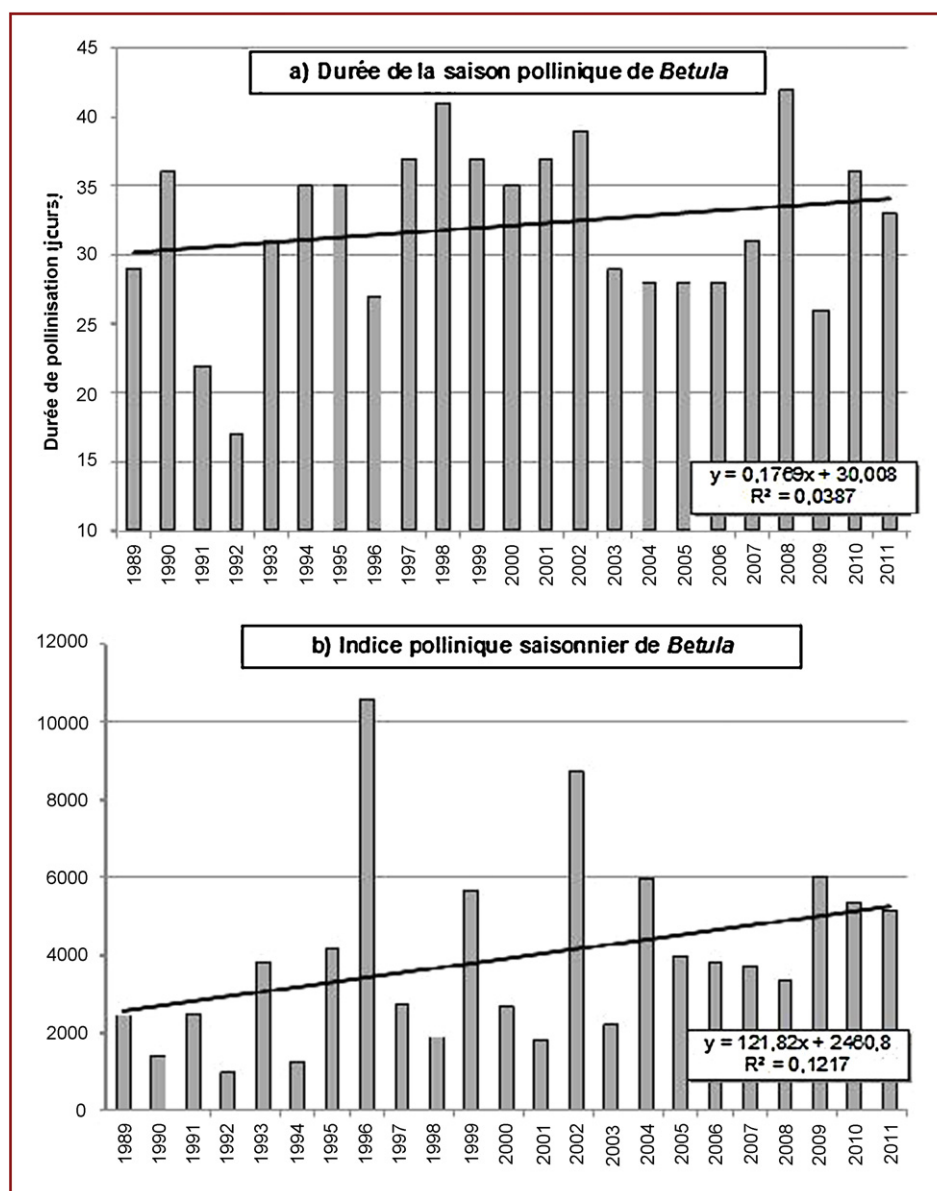


Figure 2. Durées de pollinisation (a) et indices polliniques saisonniers (b) de *Betula* (bouleau) à Amiens (France), entre 1989 et 2010. Valeurs annuelles et courbes linéaires de tendance (non significative pour les durées de pollinisation, faiblement significative [$p < 0,10$] pour les indices polliniques saisonniers). La durée de pollinisation est définie comme l'intervalle compris entre le premier et le dernier jour où le recueil (total des 12 comptes bihoraires) atteint 20 grains/m³. L'indice pollinique saisonnier est la somme des concentrations journalières. Données du Réseau national de surveillance aérobiologique.

en climat méditerranéen [81] et pour *Ambrosia* en Amérique du nord [54], encore qu'un résultat inverse ait dans ce dernier cas été obtenu à Montréal [82] et en Europe centrale.

Finalement, sur 64 publications dépouillées qui abordaient ce point, la saison pollinique apparaît allongée dans 66 % des cas pour les arbres à pollinisation hivernale ou printanière, alors qu'elle serait restée stable dans 19 % et aurait légèrement diminué dans 15 %, les Cupressacées intervenant pour les trois quarts dans ce dernier chiffre. Pour les arbres plus tardifs, c'est la stabilité qui l'emporte (64 % des publications), un allongement significatif étant noté dans 20 % des cas et un raccourcissement dans 16 %. Enfin, pour les herbacées, l'absence de tendance est légèrement majoritaire

(52 %), allongement et raccourcissement s'inscrivant à égalité avec chacun 24 % des publications.

Il reste donc peu contestable que, dans la majorité des cas, les risques allergiques ont tendance à sévir plus longtemps que ce n'était le cas dans un passé récent, et que cette tendance est appelée à se prolonger, voire à s'amplifier, tout spécialement pour les *Urticaceae* (*Urtica*-cées) [17]. Il faut craindre également que les malades ne souffrent davantage, les quantités de pollen émises par les plantes évoluant généralement à la hausse, même si ce point reste délicat à cerner ; d'une part, les variations interannuelles masquent souvent les tendances [38] ; d'autre part, la relation entre avance phénologique et augmentation de la production pollinique demeure difficile à modéliser [18].

- La présence des pollens dans l'air et donc le risque de pollinose s'étendent désormais sur une plus longue durée car le début de la pollinisation avance au fil des années, mais la fin reste sensiblement à la même date et est parfois même retardée.
- Toute élévation de température moyenne annuelle allonge la durée de la saison pollinique, mais il existe de nombreuses exceptions, avec des durées qui restent stables, voire diminuent.
- Quoi qu'il en soit, les risques allergiques ont tendance à se prolonger, voire à s'amplifier pour certaines espèces.

Les quantités de pollen aéroporté

Le lien entre température et quantité de pollen libérée par les plantes est un fait acquis : les analyses effectuées à partir de sédiments holocènes ont mis en évidence, au cours des derniers millénaires, une hausse de productivité pollinique à chaque fois que régnaient des conditions climatiques plus chaudes.

Une tendance générale à l'augmentation des concentrations de pollen dans l'air

La réalité du phénomène a été démontrée statistiquement, sur les trois exemples de *Corylus*, de *Betula* et des *Poaceae*, pour les dernières décennies du ^{xx}e siècle, à l'échelle de l'Europe [83]. La variabilité en années successives et la tendance sont en général plus marquées pour les pollens d'arbres (Fig. 2b) que pour les pollens d'herbacées [84]. La hausse est généralement plus forte pour la somme des concentrations journalières (ou *indice pollinique* saisonnier) que pour la valeur des principaux pics [85]. Salonique fournit un exemple très démonstratif. De 1987 à 2005, toutes espèces confondues, la concentration de pollen dans l'air y a augmenté en moyenne d'un peu plus de 0,5% par an. La progression se vérifie pour 13 des 16 taxons les plus abondants. À l'exception de *Populus* (peuplier), l'augmentation se révèle directement proportionnelle à la température des deux ou trois mois précédant le début de la floraison [86]. De même, à Neuchâtel, sur une série de 21 ans, les quantités de pollen aéroporté ont augmenté de façon significative ($p < 0,05$) pour *Alnus*, pour les *Cupressaceae*, pour *Artemisia* et pour *Ambrosia*, la seule diminution significative concernant *Ulmus*, pour des raisons extra-climatiques puisque cet arbre a été décimé par la graphiose [87].

Des exceptions assez nombreuses et un rôle non exclusif de l'évolution du climat

Les cas de diminution des concentrations sont relativement fréquents et, apparemment, distribués de façon aléatoire. Ils concernent assez souvent des herbacées, notamment les *Poaceae* [88,89], mais d'autres taxons sont aussi concernés. Il serait néanmoins abusif de tout rapporter au changement climatique. D'autres paramètres rendent compte d'une

partie de l'évolution décrite, en particulier la modification de l'utilisation du sol [50]. Ainsi, depuis 1961, les concentrations en pollen de *Poaceae* ont régulièrement diminué à Londres et, malgré une forte variabilité interannuelle, à Derby, alors qu'elles ont augmenté à Cardiff. Les particularités des climats locaux ont été jugées incapables de rendre compte de telles différences, même si la fréquence accrue des vents de sud-ouest a pu augmenter sur Cardiff le transport à longue distance des pollens en provenance du Cornwall, du Somerset et du Devon. Les explications les plus plausibles tiennent à l'extension des villes (qui éloigne de plus en plus les principales sources de pollen des capteurs) et à l'évolution des pratiques agricoles, avec une franche régression des prairies de fauche autour de Londres et de Derby. Inversement, la surface en prairies a augmenté de 19% autour de Cardiff entre 1970 et 1991, même si les plantations de céréales ont vu pendant le même temps leur superficie diminuer d'environ 10% [90].

La pollution environnementale [91] peut également jouer, et dans les deux sens car, à l'intérieur de certaines limites, une plante qui souffre réagit en produisant davantage de pollen alors qu'une fois ces limites franchies, elle en produit moins.

Quoi qu'il en soit, l'idée prévaut très largement que le réchauffement du ^{xxi}e siècle devrait accentuer la tendance dominante à l'augmentation des concentrations de pollen aéroporté. On se bornera à rappeler ici les simulations réalisées à l'École de Santé Publique de Harvard. D'ici aux années 2070–2100, et du seul fait de l'élévation des températures, on s'attend à ce que la production de pollen d'*Ambrosia* au Massachusetts augmente de 32 à 55% [92]. D'autres expérimentations [93] ont précisé que la chaleur n'augmentait quasiment pas la production pollinique par pied d'ambrosie, mais qu'elle agissait sur la production totale de pollen, qui pourrait être en certains endroits majorée de l'ordre de 84% ($p < 0,05$) d'ici à 2060 – simplement parce que le nombre de pieds d'ambrosie s'accroîtrait avec le réchauffement. Parallèlement, il a été constaté avec la chaleur une augmentation du diamètre des grains, qui pourrait passer d'une moyenne de 21,2 µm dans les conditions actuelles à 23,9 µm entre 2060 et 2099, soit un accroissement de 13% [93], dont on ignore s'il peut avoir une signification allergologique (moindre risque de pénétration dans les voies respiratoires basses ? Contenu majoré en allergènes majeurs ?).

Le fait est que ce ne sont pas seulement les concentrations de grains de pollen dans l'air qui risquent d'évoluer, c'est aussi la teneur de ces pollens en allergènes. Malheureusement, les recherches en relation avec les conditions climatiques débutent à peine sur ce sujet.

- Le lien entre température et quantité de pollen libérée par les plantes est un fait acquis, avec hausse de la productivité pollinique dès que les conditions climatiques sont plus chaudes.
- On note une tendance générale à l'augmentation des concentrations de pollen dans l'air, mais avec de nombreuses exceptions qui se distribuent géographiquement de façon aléatoire.

- Des facteurs autres que climatiques peuvent également être en cause, jouant dans les deux sens, comme les modes d'utilisation des sols (extension des villes et évolution des pratiques agricoles) et la pollution environnementale.

L'allergénicité des pollens

On ne dispose actuellement d'études rigoureuses que pour deux espèces : d'une part, *Betula*, dont le pollen serait d'autant plus riche en Bet v1 que la température est plus élevée [94–97], d'autre part, *Ambrosia*, dont la teneur en Amb a1 augmenterait de 30 à 50 % avec un réchauffement de 3,5 °C [54,98]. Il faut souhaiter la multiplication rapide des investigations de ce type [13] et leur extension à d'autres allergènes, majeurs ou mineurs.

Mais de telles recherches se heurteront inévitablement à la nécessité de contrôler ce facteur de confusion qu'est la pollution physicochimique de l'air [10,20,91]. Même s'il existe des contre-exemples [99], nombre d'études font état d'un renforcement de l'allergénicité de certains pollens lorsqu'ils sont soumis à une pollution gazeuse ou particulaire. Ainsi, le pollen d'ambrosie collecté le long de routes à fort trafic montre une allergénicité supérieure à celui qui provient d'aires naturelles [100]. De même, l'exposition expérimentale du pollen de *Lolium perenne* (ivraie vivace) à des teneurs « réalistes » en ozone, de l'ordre de 130 µg/m³, se traduit par une nette augmentation du contenu des grains en Lol p5 [101]. Or, le changement climatique a des impacts multiples sur la pollution atmosphérique (émissions biogéniques de composés organiques volatils sous l'effet de la température, vagues de chaleur et pollution par l'ozone, émissions polluantes liées aux sécheresses et aux incendies de forêts, impacts des changements de la circulation atmosphérique sur la dispersion des polluants, effets des modifications du régime des précipitations sur le dépôt des polluants...) [102]. Faire la part de ce qui revient à la pollution et de ce qui doit être attribué au réchauffement climatique reste, en l'état actuel, passablement hasardeux.

Une autre évolution attendue, et déjà partiellement observée, est une modification de l'aire de répartition de certaines plantes, provoquant l'apparition en un lieu donné de taxons polliniques qui y étaient jusque-là presque inconnus et, à l'inverse, la raréfaction ou la quasi-disparition de certains autres qui y étaient abondants.

- L'allergénicité augmenterait avec la température, mais on ne dispose actuellement d'études rigoureuses que pour deux espèces, *Betula* et *Ambrosia*, et on ne peut que souhaiter la multiplication rapide des recherches de ce type.

Vers une nouvelle géographie des pollens

La modification de l'aire de répartition potentielle de certaines plantes

Un relèvement de 1 °C de la température moyenne annuelle « équivaut », du point de vue thermique mais pas

nécessairement pour tous les aspects du climat, à une translation d'environ 200 km vers le nord et/ou à une remontée d'environ 150 m en altitude [103]. Il s'ensuit qu'un réchauffement de 3,5 °C, hypothèse jugée plausible pour la France au ^{xxi} siècle, vaudrait au Luxembourg, d'ici à une centaine d'années, les températures actuelles de Marseille. Faut-il dès lors imaginer une migration des espèces [104,105], qui ferait par exemple remonter l'olivier aux portes de la Belgique ?

Des modèles ont été mis au point pour simuler la réaction des principaux écosystèmes aux changements climatiques. Lorsque, dans les plus robustes de ces simulateurs [106], on remplace les variables climatiques actuelles par celles estimées pour le milieu ou la fin du ^{xxi} siècle, on obtient des cartes de l'état de la végétation dans 50 ou 100 ans, selon que la température moyenne aura augmenté de 1, 3 ou 6 °C. Les simulations ainsi réalisées, qui n'ont malheureusement pas toujours concerné les espèces au plus fort potentiel allergisant, attirent l'attention sur une évolution saisissante de la distribution potentielle de certains arbres, ou de certaines herbacées, avec une progression d'ensemble vers le nord des composantes climatiques méridionales, au détriment des influences océaniques, continentales et montagneuses [107,108].

Les écosystèmes méditerranéens et aquitains pourraient alors quitter leur bassin d'origine pour se développer dans les actuelles régions « tempérées fraîches », comme le nord de la France [109,110]. On observerait ainsi une extension de l'aire de *Quercus ilex* (chêne vert) dont la niche climatique, strictement inféodée aujourd'hui au domaine méditerranéen, pourrait dès 2050 dépasser une ligne Bordeaux-Saint-Étienne et franchir la Loire avant 2100 (Fig. 3a). Inversement, l'aire de répartition potentielle de *Fagus sylvatica* (hêtre commun) pourrait régresser fortement (Fig. 3b), la diminution des précipitations venant ajouter ses effets à ceux de la hausse des températures estivales [109–111].

En moyenne, 32 % des plantes présentes en 1990 dans une région d'Europe seraient ainsi susceptibles de disparaître d'ici à 2050 [112] et environ 44 % du territoire européen pourraient enregistrer de telles pertes de biodiversité. On hésitera cependant à s'engager trop avant dans ces spéculations, du triple fait de l'inertie de la végétation, des incertitudes qui subsistent sur l'évolution du climat et de l'absence de prise en compte des aptitudes des sols.

Les plantes suivront-elles « leur » climat ?

En s'appuyant sur ce qui s'est passé à la fin de la dernière période glaciaire, le Muséum d'Histoire Naturelle de New York a pu estimer qu'entre 2050 et 2100, même dans l'hypothèse du réchauffement le plus fort évoqué par l'IPCC, soit un peu plus de 6 °C, 38 à 52 % des végétaux conserveraient exactement la distribution spatiale qu'ils ont aujourd'hui. Pour des espèces à long cycle de vie comme les arbres, la migration « naturelle » (et il faut insister sur ce qualificatif) dépasserait rarement quelques dizaines de kilomètres vers le nord ou une centaine de mètres en altitude. Au mieux, la translation pourrait atteindre la centaine de kilomètres pour un petit nombre d'herbacées à cycle court [113–115]. Le « potentiel écologique » ne doit pas être confondu avec l'évolution prévisible de la végétation.

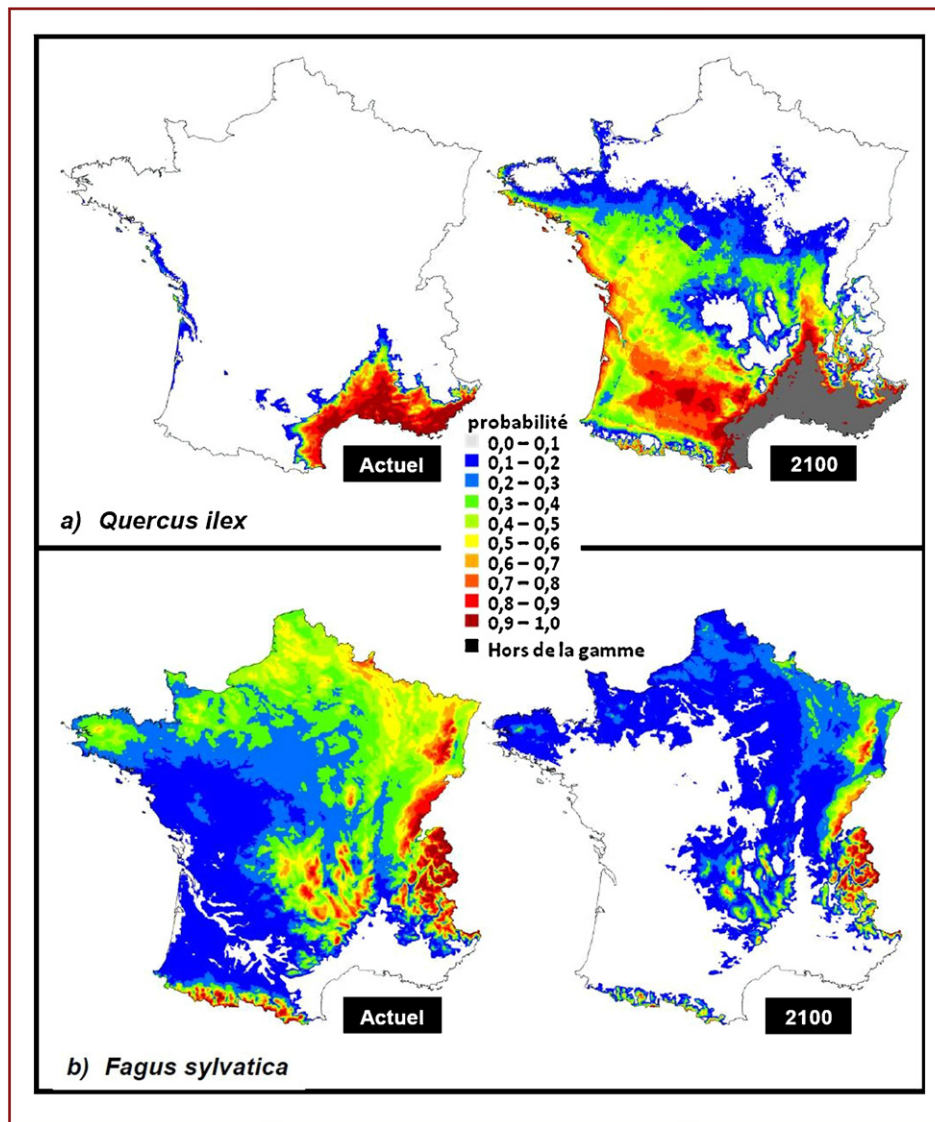


Figure 3. Contours des aires potentielles de distribution de *Quercus ilex* (chêne vert, a) et de *Fagus sylvatica* (hêtre commun, b) en France, entre la période actuelle et la fin du ^{xxi}e siècle. Les probabilités d'occurrence sont exprimées dans une échelle de 0 (présence totalement exclue) à 1 (présence certaine). La modélisation a retenu le scénario A1B du GIEC, le plus souvent jugé réaliste pour le futur proche et légèrement optimiste pour le futur lointain (concentration du CO₂ atmosphérique de l'ordre de 700 ppm en 2100, hausse moyenne de température limitée à 2,8 °C en un siècle). Les aptitudes des sols ne sont pas prises en compte. Cartes établies dans le cadre du projet CARBOFOR, reproduites avec l'aimable autorisation de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra).

Cela étant, il ne faut pas dissimuler que, par ses plantations (agricoles ou d'ornement), l'homme est capable de modifier la répartition des espèces [116] et d'anticiper largement l'évolution naturelle, en facilitant ce que d'aucuns appellent des « migrations assistées ».

Mais ce serait une simplification bien abusive que de limiter le changement climatique à ses aspects thermiques. La variabilité du temps qu'il fait et la fréquence des événements extrêmes [117] seraient également essentielles pour appréhender le problème de l'adaptation des espèces et de leur temps de réponse. Toutefois, ce point n'est pratiquement pas abordé dans les publications qui ont été dépouillées. Les modèles actuels ne sont pas capables de prédire l'effet des événements climatiques extrêmes, très

vraisemblablement appelés à se multiplier sous l'impact du réchauffement : sécheresses (comme en 1976), tempêtes (comme en 1999), canicules (comme en 2003)... Pourtant, l'expérience montre que, lorsque la « météo » s'emballe, les effets sur les écosystèmes sont importants dans l'immédiat, et souvent durables. Une autre inconnue réside dans l'activité des agents pathogènes. Le réchauffement climatique va probablement favoriser le développement de certains parasites ou d'insectes ravageurs. Comment les arbres, en particulier, réagiront-ils ? La réponse, là encore, n'est pas à la portée des simulateurs actuels. Enfin, répétons-le, si le comportement des végétaux et des microorganismes est difficile à prévoir, que dire de celui des hommes !

- Un relèvement de 1 °C de la température moyenne annuelle «équivalent», du point de vue thermique, à une translation d'environ 200 km vers le nord et/ou à une remontée d'environ 150 m en altitude.
- Il ne faut pas limiter le changement climatique à ses aspects thermiques mais tenir également compte de la variabilité du temps qu'il fait et de la fréquence des événements extrêmes.
- Le réchauffement climatique va probablement favoriser le développement de certains parasites ou d'insectes ravageurs, avec des conséquences encore inconnues, notamment sur les arbres.

Des tendances renforcées par l'effet extra-climatique du CO₂

Certains gaz à effet de serre agissent directement sur la biologie reproductive et la croissance des plantes [118,119]. C'est notamment le cas du CO₂, dont le rôle fertilisant n'est plus à démontrer [120] puisque, sous l'effet du rayonnement solaire, la photosynthèse, qui est une réaction d'oxydoréduction, produit du glucose à partir du mélange du gaz carbonique et de l'eau. Les horticulteurs le savent bien, qui depuis longtemps améliorent leurs rendements en enrichissant en CO₂ l'air de leurs serres [121]. On parle de «fertilisation carbonée». Ce sont essentiellement les plantes dites «en C3»² qui voient leur photosynthèse stimulée par l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Sans qu'il y ait proportionnalité parfaite, l'accroissement de la production de pollen suit en gros celui de la photosynthèse. S'il y a des exceptions, absolues comme *Phaseolus vulgaris* (haricot commun) [122] ou relatives comme *Arabidopsis thaliana* (arabette des dames, une Brassicacée) [123], il a été montré en milieu confiné [124] que, par rapport à une concentration ambiante en CO₂ de type préindustriel (280 ppm), la production de pollen d'ambroisie augmentait de 131 % en présence d'une concentration «actuelle» (370 ppm), et de 320 % en présence d'une concentration projetée dans le XXI^e siècle (600 ppm). Les expériences en conditions naturelles avec des systèmes d'enrichissement en CO₂ à l'air libre sont plus rares. Néanmoins, pour *Pinus taeda* (pin à l'encens, non allergisant), il est établi que, même si le dioxyde de carbone tend à accroître la variabilité interannuelle de la production pollinique, les arbres exposés à une concentration de CO₂ dépassant de 200 ppm la concentration «ambiante normale» commencent à produire de grandes quantités de pollen à un âge et à une taille

où cette espèce est encore normalement stérile, et continuaient à en produire jusqu'à un âge très avancé [125]. On regrette de ne pas disposer de données aussi précises sur les autres espèces végétales, mais l'accroissement continu des teneurs atmosphériques en CO₂ pourrait bien influencer la production pollinique de nombreuses plantes allergisantes et contribuer ainsi à expliquer la multiplication des allergies depuis deux siècles – encore que certains travaux laissent à penser que les effets de l'accroissement du CO₂ et ceux de l'élévation de la température ne s'additionnent pas et se neutralisent parfois, comme dans le cas de *Glycine max* L. (soja) [126]. En outre, les observations faites sur de jeunes plants posent le problème de leur extrapolation à des plantes adultes.

Par ailleurs, le gaz carbonique tend à renforcer l'allergénicité des pollens. Même si elles sont parfois contestées du fait que la répétitivité des résultats n'a pas été suffisamment prouvée, des expériences suggèrent qu'en doublant pendant 84 jours la teneur de l'air ambiant en CO₂ (de 350 à 700 ppm) sans modifier la température, on majorait de 61 % ($p < 0,01$) la concentration en Amb a1 du pollen d'*Ambrosia artemisiifolia* [54,97,127,128].

Les répercussions sur la saisonnalité de la pollinisation sont moins constantes, tous les cas de figure (avance, stabilité et retard) pouvant être rencontrés. Il n'en reste pas moins que, dans 80 % des cas environ et toutes choses égales par ailleurs, y compris le contexte thermique, une atmosphère plus riche en CO₂ détermine une plus grande précocité du début et du pic principal de la pollinisation [129].

- Une atmosphère plus riche en CO₂ détermine une plus grande précocité du début et du pic principal de la pollinisation.
- L'augmentation des teneurs atmosphériques en CO₂ pourrait influencer la production pollinique de nombreuses plantes allergisantes.
- Il semble de plus que le gaz carbonique tend à renforcer l'allergénicité des pollens.

Conclusion

Des saisons polliniques plus longues accroissent la «durée d'exposition» de la population aux allergènes aéroportés, et facilitent ainsi la «sensibilisation allergique». Elles peuvent également augmenter la «durée de prévalence des symptômes» chez les allergiques, tandis que de plus fortes concentrations de pollen dans l'air et le potentiel allergisant majoré de ce pollen sont susceptibles de renforcer la «sévérité des symptômes» [21,130], au moins jusqu'au franchissement d'un «seuil de saturation». Le changement climatique commençant à avoir des répercussions notables sur nombre de plantes allergisantes, ses effets sur les allergies au pollen [7,130,131], y compris sur les allergies cutanées trop souvent négligées dans ce genre d'études [132], ne peuvent guère être mis en doute. On commence à bien comprendre les mécanismes en jeu (Fig. 4). Et il faut

² Il existe, dans le processus de photosynthèse, deux types de fixation du CO₂ (autrement dit, deux voies de synthèse des sucres), identifiés par les termes C3 et C4, qui reflètent le nombre d'atomes de carbone de la première molécule organique formée. Ces mécanismes sont associés à des comportements écophysiologiques différents. L'activité photosynthétique des végétaux dits «en C3», de loin les plus nombreux en zone tempérée, réagit plus nettement à l'augmentation du CO₂, alors que la photosynthèse des plantes dites «en C4», déjà optimisée, est moins réactive. En revanche les C4, pour la plupart d'origine tropicale (maïs, sorgho, canne à sucre...), valorisent mieux l'utilisation de l'eau.

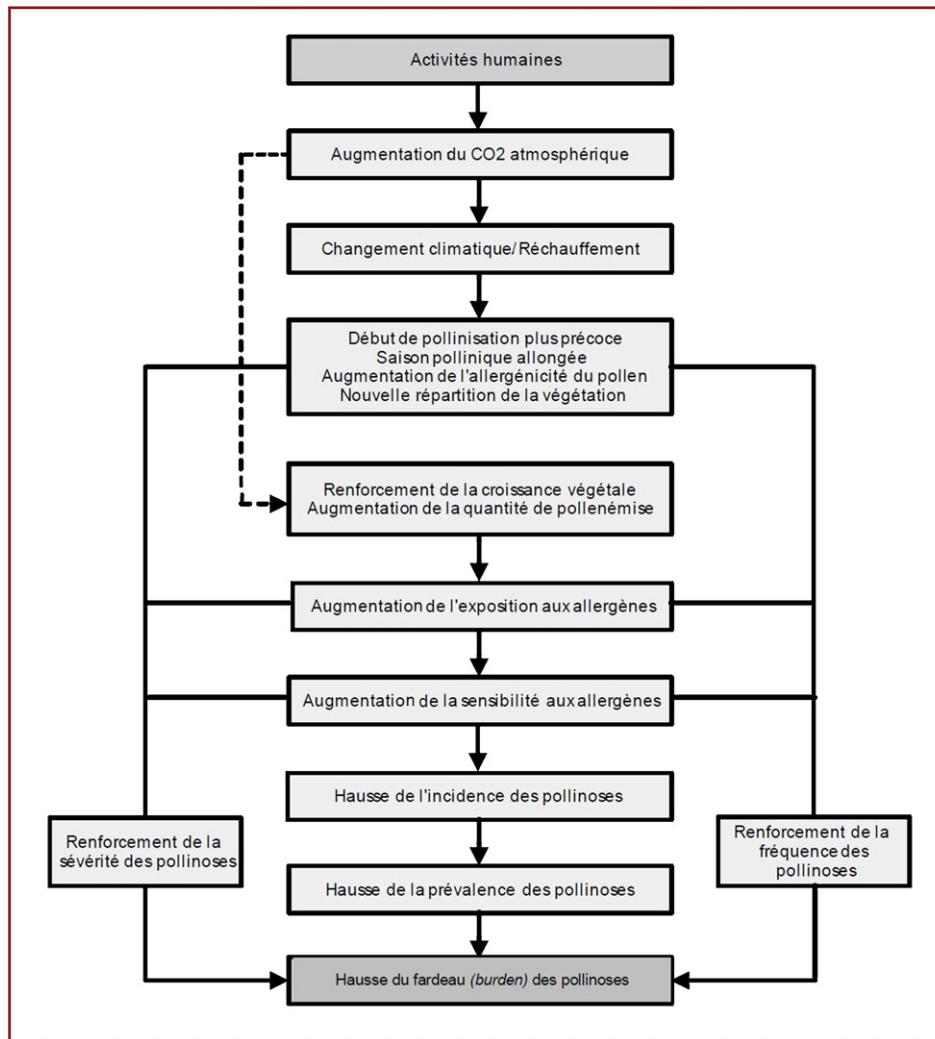


Figure 4. Relations entre le changement climatique et l'augmentation de la fréquence, ainsi que de la sévérité des pollinoses, via les impacts sur la végétation et le pollen. Inspiré de Beggs et Bambrick [130], traduit et modifié.

s'attendre à ce que ces effets se renforcent dans l'avenir [81].

Mais il convient de se méfier de tout excès de généralisation, et la nécessité s'impose de toujours raisonner à une échelle assez fine, tenant compte des « particularités régionales et locales ». On n'oubliera pas, par exemple, que l'une des modélisations à ce jour les plus convaincantes [133] suggère que, d'ici à 2099 et par rapport aux années 1992–2004, le début de la pollinisation de *Quercus* avancerait en moyenne de 34 jours sur la péninsule ibérique, mais avec des minima de trois à cinq jours (Santiago, Barcelone) et des maxima de 56 à 74 jours (Madrid, León), tandis que les quantités de pollen émises par les chênes progresseraient en moyenne de 133 %, avec des extrêmes de 10 % (Vigo) et de 206 % (Córdoba), voire de 620 % (Orense) ! Quel crédit peut-on, dans ces conditions, accorder à des modélisations réalisées à l'échelle d'un pays ou d'un continent ?

Il convient en outre de ne pas négliger le « risque d'erreurs ». Si l'évolution actuelle paraît peu contestable, son explication est probablement moins simple qu'on ne l'imagine souvent, et on n'a jamais l'assurance de faire

intervenir tous les paramètres influents lorsque l'on tente une extrapolation en direction du futur. Si la littérature spécialisée se focalise sur le rôle direct des températures, des investigations supplémentaires seraient indispensables sur le rôle potentiel des modifications à attendre dans la circulation atmosphérique générale, susceptible de modifier le transport à longue distance du pollen anémophile [134]. Le réchauffement peut aussi perturber la stabilité verticale de l'atmosphère et, par là, altérer les flux turbulents qui commandent la dynamique du pollen après sa libération [135]. Enfin, le changement climatique risque d'affecter les allergies via la multiplication des événements extrêmes, comme les violents orages pendant la saison des Poacées [9, 136, 137]. Les tableaux apocalyptiques qui ont pu être brossés en certains endroits, comme aux Pays-Bas où l'on annonce avec beaucoup d'assurance une prolifération des rhinites et de l'asthme, en raison notamment d'une énorme « invasion » de pollen d'ambrosie et d'olivier [138], ne sont que l'une des éventualités possibles, et pas forcément la plus plausible. On préférera donc la prudence revendiquée, toujours pour le territoire néerlandais, par

Gupta et al. [139] qui, mettant l'accent sur les incertitudes³, sur la compréhension insuffisante de certains mécanismes fondamentaux et sur la rareté des données quantitatives, concluent que, si l'on peut raisonnablement discerner le sens de l'évolution à venir, il serait prématuré d'en prédire l'ampleur.

Cela n'empêche pas de réfléchir dès à présent aux mesures à mettre en œuvre. Aux côtés des stratégies de «mitigation», destinées à limiter la vitesse d'augmentation des taux de gaz à effet de serre dans l'air et, donc, à lutter contre l'amplification du changement climatique, l'«adaptation» paraît indispensable pour réduire les impacts d'un changement jugé désormais inéluctable [140]. Beggs [8] a dressé une liste très complète des efforts à entreprendre, articulés autour d'une dizaine de grands axes: renforcement de la surveillance aérobiologique [9,32,141]; prévision aéropollinique [25]; lutte contre les plantes allergisantes (campagnes d'arrachage de l'ambrosie, par exemple) [142]; contrôle des plantations d'ornement, privilégiant les plantes à pollen entomophile et/ou non allergisant [7,9,143]; planification urbaine [144]; préconisations architecturales visant à réduire l'entrée des pollens dans les locaux [145]; facilitation de l'accès aux soins de santé et aux médicaments; éducation, notamment sur l'éviction allergénique; diffusion d'informations sur le risque sanitaire et tout spécialement sur les «nouveaux» risques [55,146]; recherche [9] sur des sujets aussi variés que l'écophysiologie végétale [147,148] et l'épidémiologie [149].

POINTS ESSENTIELS

- Des saisons polliniques plus longues accroissent la durée d'exposition aux allergènes aéroportés, facilitent la sensibilisation allergique, augmentent la durée de prévalence des symptômes et leur sévérité chez les allergiques.
- Globalement, les concentrations de pollen dans l'air augmentent.

³ De nombreuses incertitudes émaillent la problématique de l'évolution future du climat. On prétend souvent, sans preuve vérifiable, qu'elles tiennent pour moitié à une connaissance imparfaite du système planétaire (rôle des nuages, de la biosphère, du CO₂ de l'océan...) et pour moitié aux hypothèses qui sont au fondement des scénarios mis au point par le GIEC, en particulier les hypothèses sur l'évolution technique et sur les capacités des économies à continuer de croître tout en réduisant leurs émissions. Or, ces incertitudes se répercutent, souvent en s'amplifiant, sur les impacts du changement climatique—ici sur le comportement de la végétation. Le GIEC a délibérément exclu les scénarios de type catastrophe ou «surprise» climatique, considérés comme marginaux et non représentatifs. Nous n'avons donc pas pris en compte les rares publications qui renaient de tels scénarios, de façon à privilégier les scénarios A1B (réchauffement de 1,7 à 4,4 °C au XXI^e siècle) et A2 (réchauffement de 2,0 à 5,4 °C) [3]. L'étendue des intervalles de variation doit néanmoins inciter à la prudence dans la comparaison d'études utilisant des modèles différents ou ne précisant pas exactement quel modèle a été utilisé.

- Le réchauffement climatique va vraisemblablement anticiper les dates de floraison, allonger la saison pollinique et augmenter les concentrations de pollen dans l'air, avec déplacement vers le nord ou en altitude de l'aire d'extension de certaines espèces.
- Il existe depuis toujours une variabilité climatique naturelle, mais est venue s'y ajouter une variation liée aux activités humaines, beaucoup plus rapide et plus intense.
- Les changements climatiques accentuent le rôle des aéroallergènes, avec un risque qui semble d'ores et déjà décelable.
- Les durées de pollinisation augmentent généralement, ainsi que les concentrations de pollen dans l'air, mais les exceptions sont nombreuses.
- L'élévation des températures augmente l'allergénicité.
- Le CO₂, gaz à effet de serre, majore la production pollinique et tend à renforcer l'allergénicité des pollens.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Références

- [1] Salinger MJ. Climate variability and change: past, present and future—an overview. *Clim Change* 2005;70:9–29.
- [2] Schneider SH. The greenhouse effect: science and policy. *Science* 1989;243:771–81.
- [3] Pachauri RK, Reisinger A. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC; 2007, 104 pp.
- [4] Confalonieri U, Menne B, Akhtar R, et al. Human health. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, Van der Linden PJ, Hanson CE, editors. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press; 2007. p. 391–431.
- [5] Ariano R. Climate change and increase of allergic diseases. *Eur Ann Allergy Clin Immunol* 2009;41:136–8.
- [6] 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.
- [7] Beggs PJ. Impacts of climate change on aeroallergens: past and future. *Clin Exp Allergy* 2004;34:1507–13.
- [8] Beggs PJ. Adaptation to impacts of climate change on aeroallergens and allergic respiratory diseases. *Int J Environ Res Public Health* 2010;7:3006–21.
- [9] Beggs PJ. Impacts of climate change on aeroallergens and allergic respiratory diseases in children in rural areas. *Int Public Health J* 2010;2:377–83.
- [10] Behrendt H, Ring J. Climate change, environment and allergy. *Chem Immunol Allergy* 2012;96:7–14.
- [11] Besancenot JP. Pollens et pollinoses à l'épreuve du changement climatique. *Allergol Prat* 2009;89:5–10.
- [12] Blando J, Bielory L, Nguyen V, et al. Anthropogenic climate change and allergic diseases. *Atmosphere* 2012;3:200–12.

- [13] Cecchi L, D'Amato G, Ayres JG, et al. Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology. *Allergy* 2010;65:1073–81.
- [14] Clot B. Pollen de l'air et risque d'allergie: l'évolution récente. *Environ Risques Sante* 2008;7:431–4.
- [15] D'Amato G, Cecchi L, D'Amato M, et al. Urban air pollution and climate change as environmental risk factors of respiratory allergy: an update. *J Investig Allergol Clin Immunol* 2010;20:95–102.
- [16] D'Amato G, Cecchi L. Effects of climate change on environmental factors in respiratory allergic diseases. *Clin Exp Allergy* 2008;38:1264–74.
- [17] Frenguelli G. Interactions between climatic changes and allergic plants. *Monaldi Arch Chest Dis* 2002;57:141–3.
- [18] 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: Global Change Research Program; 2008, 91 pp.
- [19] Huynen M, Menne B. Phenology and human health: allergic disorders. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2003, 64 pp.
- [20] Laaidi M, Chinnet T, Aegerter P. Allergies au pollen, pollution et climat: revue de la littérature. *Rev Fr Allergol* 2011;51:622–8.
- [21] Reid CE, Gamble JL. Aeroallergens, allergic disease, and climate change: impacts and adaptation. *Ecohealth* 2009;6:458–70.
- [22] Schmier JK, Ebi KL. The impact of climate change and aeroallergens on children's health. *Allergy Asthma Proc* 2009;30:229–37.
- [23] Shea KM, Truckner RT, Weber RW, et al. Climate change and allergic disease. *J Allergy Clin Immunol* 2008;122:443–53.
- [24] Sheffield PE, Weinberger KR, Kinney PL. Climate change, aeroallergens and pediatric allergic disease. *Mt Sinai J Med* 2011;78:78–84.
- [25] Sofiev M, Bousquet J, Linkosalo T, et al. Pollen, allergies and adaptation. In: Ebi KL, Burton I, McGregor GR, editors. *Biometeorology for adaptation to climate variability and change*. Dordrecht: Springer; 2009. p. 75–106.
- [26] Staudt A, Glick P, Mizejewski D, et al. Extreme allergies and global warming. Reston: National Wildlife Federation; 2010, 12 pp.
- [27] Thibaudon M. Pollens, allergies et changements climatiques. *Presse Therm Clim* 2007;144:117–20.
- [28] Wilkinson MJ. Pollen and climatic change. *Aerobiologia* 1989;5:3–8.
- [29] Ziska LH, Epstein PR, Rogers CA. Climate change, aerobiology, and public health in the Northeast United States. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 2008;13:607–13.
- [30] Ziska LH, Beggs PJ. Anthropogenic climate change and allergen exposure: the role of plant biology. *J Allergy Clin Immunol* 2012;129:27–32.
- [31] Ziello C, Sparks TH, Estrella N, et al. Changes to airborne pollen counts across Europe. *PLoS One* 2012;7:e34076.
- [32] Thibaudon M, Caillaud D, Besancenot JP. Méthodes d'études des pollens atmosphériques et calendriers pollinique. *Rev Mal Respir (à paraître)*.
- [33] Durand R. Action de la température et du rayonnement sur la croissance. *Ann Physiol Veg* 1967;9:5–27.
- [34] Gate P, Brisson N. Anticipation des stades phénologiques et raccourcissement des phases. In: Brisson N, Levraut F, editors. *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. Paris: ADEME; 2010. p. 65–78.
- [35] Fitter AH, Fitter RSR. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science* 2002;296:1689–91.
- [36] Tooke F, Battey NH. Temperate flowering phenology. *J Exp Bot* 2010;61:2853–62.
- [37] Miller-Rushing AJ, Primack RB, Primack D, et al. Photographs and herbarium specimens as tools to document phenological changes in response to global warming. *Am J Bot* 2006;93:1667–74.
- [38] Emberlin J, Detandt M, Gehrig R, et al. Responses in the start of *Betula* (birch) pollen seasons to recent changes in spring temperatures across Europe. *Int J Biometeorol* 2002;46:159–70.
- [39] Emberlin J, Laaidi M, Detandt M, 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.
- [40] Schwartz MD, Ahas R, Aasa A. Onset of spring starting earlier across the northern hemisphere. *Glob Change Biol* 2006;12:343–51.
- [41] Chmielewski FM, Roetzer T. Responses of tree phenology to climate change across Europe. *Agric For Meteorol* 2001;108:101–12.
- [42] Bertin RI. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. *J Torrey Bot Soc* 2008;135:126–46.
- [43] Emberlin J, Mullins J, Corden J, 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.
- [44] Emberlin J, Smith M, Close R, et al. Changes in the pollen seasons of the early flowering trees *Alnus* spp. and *Corylus* spp. in Worcester, United Kingdom, 1996–2005. *Int J Biometeorol* 2007;51:181–91.
- [45] Schreiner D, Bernard B, Defila C, et al. Influence du changement climatique sur la phénologie des plantes et la présence de pollens dans l'air en Suisse. *Allergie Immunol* 2002;34:113–6.
- [46] Tedeschini E, Rodríguez-Rajo J, Caramiello R, et al. The influence of climate changes in *Platanus* spp. pollination in Spain and Italy. *Grana* 2006;45:222–9.
- [47] Teranishi H, Kenda Y, Katoh T, et al. Possible role of climate change in the pollen scatter of Japanese cedar *Cryptomeria japonica* in Japan. *Clim Res* 2000;14:65–70.
- [48] Teranishi H, Katoh T, Kenda K, et al. Global warming and the earlier start of the Japanese-cedar (*Cryptomeria japonica*) pollen season in Toyama. *Japan Aerobiologia* 2006;22:91–5.
- [49] García-Mozo H, Galán C, Jato V, et al. *Quercus* pollen season dynamics in the Iberian Peninsula: response to meteorological parameters and possible consequences of climate change. *Ann Agric Environ Med* 2006;13:209–24.
- [50] Burr ML. Grass pollen: trends and projections. *Clin Exp Allergy* 1999;29:735–8.
- [51] Emberlin J, Jäger S, Dominguez-Vilches E, et al. Temporal and geographical variations in grass pollen seasons in areas of western Europe: an analysis of season dates at sites of the European pollen information system. *Aerobiologia* 2000;16:373–9.
- [52] Fotiou C, Damialis A, Krigas N, et al. *Parietaria judaica* flowering phenology, pollen production, viability and atmospheric circulation, and expansive ability in the urban environment: impacts of environmental factors. *Int J Biometeorol* 2011;55:35–50.
- [53] Stach A, García-Mozo H, Prieto-Baena JC, et al. Prevalence of *Artemisia* species pollinosis in western Poland: impact of climate change on aerobiological trends, 1995–2004. *J Investig Allergol Clin Immunol* 2007;17:39–47.
- [54] Ziska LH, Gebhard DE, Frenz DA, et al. Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and public health. *J Allergy Clin Immunol* 2003;111:290–5.
- [55] Oswalt ML, Marshall GD. Ragweed as an example of worldwide allergen expansion. *Allergy Asthma Clin Immunol* 2008;4:130–5.

- [56] Ziskaa L, Knowlton K, Rogers C, et al. Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. *Proc Natl Acad Sci* 2011;108:4248–51.
- [57] Menzel A, Sparks TH, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Change Biol* 2006;12:1969–76.
- [58] Amano T, Smithers RJ, Sparks TH, et al. A 250-year index of first flowering dates and its response to temperature changes. *Proc R Soc B* 2010;277:2451–7.
- [59] Ahas R, Aasa A. The effects of climate change on the phenology of selected Estonian plant, bird and fish populations. *Int J Biometeorol* 2006;51:17–26.
- [60] Sparks TH, Górska-Zajęczkowska M, Wójtowicz W, et al. Phenological changes and reduced seasonal synchrony in western Poland. *Int J Biometeorol* 2011;55:411–21.
- [61] Ahas R, Aasa A, Menzel A, et al. Changes in European spring phenology. *Int J Climatol* 2002;22:1727–38.
- [62] Defila C, Clot B. Phytophenological trends in Switzerland. *Int J Biometeorol* 2001;45:203–7.
- [63] Defila C, Clot B. Phytophenological trends in different seasons, regions and altitudes in Switzerland. In: Walther GR, Burga CA, Edwards PJ, editors. *Fingerprints of climate change. Adapted behaviour and shifting species ranges*. New York/London: Kluwer/Plenum; 2001. p. 113–21.
- [64] Yoshino M, Ono HSP. Variations in the plant phenology affected by global warming. In: Omasa K, Kai K, Taoda H, Uchizima Z, Yoshino M, editors. *Climate change and plants in East Asia*. Tokyo: Springer; 1996. p. 93–107.
- [65] Quénot H, Dubreuil V, Mimet A, et al. Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière. *Meteorologie* 2010;68:50–7.
- [66] Inoue S, Kawashima S, Takahashi Y. Estimating the beginning day of Japanese cedar pollen release under global climate change. *Glob Change Biol* 2002;8:1165–8.
- [67] Wolkovich EM, Cook BI, Allen JM, et al. Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature* 2012;485:494–7.
- [68] Van Vliet AJH, Overeem A, De Groot RS, et al. The influence of temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands. *Int J Climatol* 2002;22:1757–67.
- [69] Galán C, García-Mozo H, Vázquez L, et al. Heat requirement for the onset of the *Olea europea* L. pollen season in several sites in Andalusia and the effect of the expected future climate change. *Int J Biometeorol* 2005;49:184–8.
- [70] Häkkinen R, Linkosalo T, Hari P. Effects of dormancy and environmental factors on timing of bud burst in *Betula pendula*. *Tree Physiol* 1998;18:707–12.
- [71] Rodríguez-Rajo FJ, Dopazo A, Jato V. Environmental factors affecting the start of pollen season and concentrations of airborne *Alnus* pollen in two localities of Galicia (NW Spain). *Ann Agric Environ Med* 2004;11:35–44.
- [72] Taira H. Dormancy breaking effects of chilling and altitude on male flowers of *Cryptomeria japonica*. *Grana* 2002;41:227–31.
- [73] Linkosalo T, Carter TR, Häkkinen R, et al. Predicting spring phenology and frost damage risk of *Betula* spp. under climatic warming: a comparison of two models. *Tree Physiol* 2000;20:1175–82.
- [74] Briche E, Madelin M, Beltrando G, et al. Analyse comparative des températures extrêmes de 1950 à 2100 issues des modèles Arpège-Climat et LMD : intérêt pour l'activité viticole champenoise. *Climatologie* 2010;7:9–19.
- [75] Thibaudon M, Outterlyck R, Lachasse C. Bioclimatologie et allergie. *Rev Fr Allergol Immunol Clin* 2005;45:447–55.
- [76] Dürr C, Heimgartner S, Gehrig R, et al. Allergie aux pollens : aspects cliniques. *Forum Med Suisse* 2008;8:253–7.
- [77] Smith M, Emberlin J. Constructing a 7-day ahead forecast model for grass pollen at north London, United Kingdom. *Clin Exp Allergy* 2005;35:1400–6.
- [78] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature* 1999;397:659.
- [79] Matsumoto K, Ohta T, Irasawa M, et al. Climate change and extension of the *Ginkgo biloba* L. growing season in Japan. *Glob Change Biol* 2003;9:1634–42.
- [80] Tedeschini E, Frenguelli G. Climatic changes and airborne *Cupressaceae* pollen in 1984–2005 period. *Eur Ann Allergy Clin Immunol* 2006;38:264–5.
- [81] Trigo MM, Recio M, Docampo S, et al. The use of aerobiological data as indicator of climate change. *Eur Ann Allergy Clin Immunol* 2006;38:265–6.
- [82] Breton MC, Garneau M, Fortier I, et al. Relationship between climate, pollen concentrations of *Ambrosia* and medical consultations for allergic rhinitis in Montreal, 1994–2002. *Sc Total Environ* 2006;370:39–50.
- [83] Frei T. The effects of climate change in Switzerland 1969–1996 on airborne pollen quantities from hazel, birch and grass. *Grana* 1998;37:172–9.
- [84] Detandt M, Nolard N. The fluctuations of the allergenic pollen content of the air in Brussels (1982 to 1997). *Aerobiologia* 2000;16:55–61.
- [85] 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.
- [86] Damialis A, Halley JM, Gioulekas D, et al. Long-term trends in atmospheric pollen levels in the city of Thessaloniki, Greece. *Atm Environ* 2007;41:7011–21.
- [87] Clot B. Trends in airborne pollen: an overview of 21 years of data in Neuchâtel (Switzerland). *Aerobiologia* 2003;19:227–34.
- [88] Spielsma 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.
- [89] Spielsma FTM, Corden JM, Detandt M, 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.
- [90] Emberlin J, Mullins J, Corden J, et al. Regional variations in grass pollen seasons in the UK, long-term trends and forecast models. *Clin Exp Allergy* 1999;29:347–56.
- [91] Pénard-Morand C, Annesi-Maesano I. Maladies allergiques respiratoires et pollution atmosphérique extérieure. *Rev Mal Respir* 2008;25:1013–26.
- [92] Rogers CA, Wayne PM, Macklin EA, et al. Interaction of the onset of spring and elevated atmospheric CO₂ on ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen production. *Environ Health Perspect* 2006;114:865–9.
- [93] Wan S, Yuan T, Bowdish S, et al. Response of an allergenic species *Ambrosia psilostachya*, to experimental warming and clipping: implications for public health. *Am J Bot* 2002;89:1843–6.
- [94] Ahlholm JU, Helander ML, Savolainen J. Genetic and environmental factors affecting the allergenicity of birch (*Betula pubescens* sp.) pollen. *Clin Exp Allergy* 1998;28:1384–8.
- [95] Hjelmroos M, Schumacher MJ, Van Hage-Hamsten M. Heterogeneity of pollen proteins within individual *Betula pendula* trees. *Int Arch Allergy Immunol* 1995;108:368–76.
- [96] Tashpulatov AS, Clement P, Akimcheva SA, et al. A model system to study the environment-dependent expression of the Bet v 1a gene encoding the major birch pollen allergen. *Int Arch Allergy Immunol* 2004;134:1–9.

- [97] Levetin E, Van de Water P. Changing pollen types/concentrations/distribution in the United States: fact or fiction? *Curr Allergy Asthma Rep* 2008;8:418–24.
- [98] Singer BD, Ziska LH, Frenz DA, et al. Increasing Amb a1 content in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen as a function of rising atmospheric CO₂ concentration. *Funct Plant Biol* 2005;32:667–70.
- [99] Rogerieux F, Godfrin D, Sénéchal H, et al. Modifications of *Phleum pratense* grass pollen allergens following artificial exposure to gaseous air pollutants (O₃, NO₂, SO₂). *Int Arch Allergy Immunol* 2007;143:127–34.
- [100] Ghiani A, Aina R, Asero R, et al. Ragweed pollen collected along high-traffic roads shows a higher allergenicity than pollen sampled in vegetated areas. *Allergy* 2012;67:887–94.
- [101] Armentia A, Lombardero M, Callejo A, et al. Is *Lolium* pollen from an urban environment more allergenic than rural pollen? *Allergol Immunopathol* 2002;30:218–24.
- [102] Jacob DJ, Winner DA. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environ* 2009;43:51–63.
- [103] Fouquart Y. Le climat de la Terre. Villeneuve d'Ascq: Septentrion; 2002, 168 pp.
- [104] Cleland EE, Chuine I, Menzel A, et al. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol Evol* 2007;22:357–65.
- [105] Chuine I Thuiller. Impact du changement climatique sur la biodiversité. *Courr Nat* 2005;223:20–6.
- [106] Warnant P, François L, Strivay D, et al. CARAIB: a global model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochem Cycles* 1994;8:255–70.
- [107] Hoff C, Rambal S. Les écosystèmes forestiers méditerranéens face aux changements climatiques. *CR Acad Agric Fr* 1999;85:53–7.
- [108] Kienast F, Zimmermann NE, Wildi O. Évolutions possibles des aires de répartition des principales essences forestières en fonction des scénarios de changement climatique. *Rev For Fr* 2000;52:119–26.
- [109] Breda N, Bosc A, Badeau V. Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine. In: Brisson N, Levraut F, editors. *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. Paris: ADEME; 2010. p. 225–36.
- [110] Badeau V, Dupouey JL, Cluzeau C, et al. 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.
- [111] Jump AS, Hunt JM, Peñuelas J. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Glob Chang Biol* 2006;12:2163–74.
- [112] Bakkenes M, Alkemade JRM, Ihle F, et al. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Glob Chang Biol* 2002;8:390–407.
- [113] Peteet D. Sensitivity and rapidity of vegetational response to abrupt climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 2000;97:1359–61.
- [114] Pearson RG. Climate change and the migration capacity of species. *Trends Ecol Evol* 2006;21:111–3.
- [115] Jump AS, Penuelas J. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecol Lett* 2005;8:1010–20.
- [116] Sneller MR, Hayes HD, Pinnaas JL. Pollen changes during five decades of urbanization in Tucson, Arizona. *Ann Allergy* 1993;71:519–24.
- [117] Karl TR, Meehl GA, Miller CD, et al. Weather and climate extremes in a changing climate. Washington: GCRIO; 2008, 162 pp.
- [118] LaDeau SL, Clark JS. Rising CO₂ levels and the fecundity of forest trees. *Science* 2001;292:95–8.
- [119] Jablonski LM, Wang XZ, Curtis PS. Plant reproduction under elevated CO₂ conditions: a meta-analysis of reports on 79 crop and wild species. *New Phytol* 2002;156:9–26.
- [120] Kimball BA, Mauney JR, Nakayama FS, et al. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. *Vegetatio* 1993;104/105:65–75.
- [121] Reddy KR, Hodges HF. Climate change and global crop productivity. Oxon: CABI; 2000, 488 pp.
- [122] Prasad P, Boote K, Allen L, et al. Effects of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Glob Chang Biol* 2002;8:710–21.
- [123] Song X, Kristie DN, Reekie EG. Why does elevated CO₂ affect time of flowering? An exploratory study using the photoperiodic flowering mutants of *Arabidopsis thaliana*. *New Phytol* 2009;181:339–46.
- [124] Ziska LH, Caulfield F. Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health. *Aust J Plant Physiol* 2000;27:893–8.
- [125] Ladeau SL, Clark JS. Pollen production by *Pinus taeda* growing in elevated atmospheric CO₂. *Funct Ecol* 2006;20:541–7.
- [126] Koti S, Reddy KR, Reddy VR, et al. Interactive effects of carbon dioxide, temperature, and ultraviolet-B radiation on soybean (*Glycine max* L.) flower and pollen morphology, pollen production, germination, and tube lengths. *J Exp Bot* 2005;56:725–36.
- [127] Wayne P, Foster S, Connolly J, et al. Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂-enriched atmospheres. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2002;88:279–82.
- [128] Ziska LH, Epstein PR, Schlesinger WH. Rising CO₂, climate change, and public health: exploring the links to plant biology. *Environ Health Perspect* 2008;117:155–8.
- [129] Springer CJ, Ward JK. Flowering time and elevated atmospheric CO₂. *New Phytol* 2007;176:243–55.
- [130] Beggs P, Bambrick HJ. Is the global rise of asthma an early impact of anthropogenic climate change? *Environ Health Perspect* 2005;113:915–9.
- [131] Muñoz-López F. Climatic change and asthma. *Allergol Immunopathol* 2007;35:41–3.
- [132] Augustin J, Franzke N, Augustin M, et al. Does climate change affect the incidence of skin and allergic diseases in Germany? *J Dtsch Dermatol Ges* 2008;6:632–8.
- [133] García-Mozo H, Chuine I, Aira MJ, et al. Regional phenological models for forecasting the start and peak of the *Quercus* pollen season in Spain. *Agric For Meteorol* 2008;148:372–80.
- [134] D'Amato G, Cecchi L, Bonini S, et al. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 2007;62:976–90.
- [135] Kuparinen A, Katul G, Nathan R, et al. Increases in air temperature can promote wind-driven dispersal and spread of plants. *Proc R Soc B* 2009;276:3081–7.
- [136] Caillaud D, Merle P, Marson H, et al. Asthma and thunderstorms. *Rev Fr Allergol Immunol Clin* 2005;45:29–32.
- [137] D'Amato G, Cecchi L, Annesi-Maesano I. A trans-disciplinary overview of case reports of thunderstorm-related asthma outbreaks and relapse. *Eur Respir Rev* 2012;21:82–7.
- [138] De Weger LA, Hiemstra PS. Klimaatverandering en pollenallergie in Nederland. *Ned Tijdschr Geneesk* 2009;153:A1410.
- [139] Gupta J, Van Asselt H, Amelung B, et al. Assessing dangerous climate impacts for the Netherlands. Bilthoven: Netherlands Environmental Assessment Agency; 2006, 167 pp.
- [140] Klein RJT, Huq S, Denton F, et al. Inter-relationships between adaptation and mitigation. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, Van der Linden PJ, Hanson CE, editors. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press; 2007. p. 745–77.

- [141] English PB, Sinclair AH, Ross Z, et al. Environmental health indicators of climate change for the United States: findings from the State Environmental Health Indicator Collaborative. *Environ Health Perspect* 2009;117:1673–81.
- [142] Vincent G, Deslauriers S, Cloutier D. Problems and eradication of *Ambrosia artemisiifolia* L in Quebec in the urban and suburban environment. *Allerg Immunol* 1992;24:84–9.
- [143] Younger M, Morrow-Almeida HR, Vindigni SM, et al. The built environment, climate change, and health: opportunities for co-benefits. *Am J Prev Med* 2008;35:517–26.
- [144] Schmidt CW. Beyond mitigation: planning for climate change adaptation. *Environ Health Perspect* 2009;117:A306–9.
- [145] Yli-Panula E, Rantio-Lehtimäki A. Birch-pollen antigenic activity of settled dust in rural and urban homes. *Allergy* 1995;50:303–7.
- [146] Moriguchi H, Matsumoto M, Nishimoto Y, et al. The development of a pollen information system for the improvement of QOL. *J Med Invest* 2001;48:198–209.
- [147] Elzinga JA, Atlan A, Biere A, et al. Time after time: flowering phenology and biotic interactions. *Trends Ecol Evol* 2007;22:432–9.
- [148] Ziska LH, Dukes JS. *Weed biology and climate change*. Hoboken: Wiley-Blackwell; 2010, 248 pp.
- [149] Kim SH, Park HS, Jang JY. Impact of meteorological variation on hospital visits of patients with tree pollen allergy. *BMC Public Health* 2011;11:890–8.